

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Προσομοίωση Υπόγειας Ροής και Μεταφοράς Μάζας .
Εξυγίανση Υπογείων Υδάτων εφαρμόζοντας την Τεχνολογία των
Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων -Εφαρμογή Πεδίου σε Περίπτωση
Ρύπανσης με Υδρογονάνθρακες Πετρελαίου (BTEX)

ΣΟΦΙΑ Η. ΓΑΡΜΠΗ
ΜΑΝΟΛΗΣ Ι. ΓΕΝΕΙΑΤΑΚΗΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Δρ.Γ ΚΑΡΑΤΖΑΣ (επιβλέπων)
Δρ.Ν. ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΗΣ
Δρ.Ν. ΝΙΚΟΛΑΙΔΗΣ

ΙΟΥΛΗΣ 2003

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

	<u>Σελίδα</u>
Εικόνα Εξώφυλλου.....	i
Πίνακας Περιεχομένων.....	ii
Λίστα Εικόνων.....	xi
Λίστα Πινάκων.....	xv
Λίστα Διαγραμμάτων.....	xvi
Λίστα Χαρτών.....	xvi
Λίστα Παραρτημάτων.....	xvi
Λίστα Γραφημάτων.....	xvii
Πίνακας Συμβόλων.....	xix
Πίνακας Ακρωνύμων.....	xxii
Περίληψη.....	xxiv

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟΝ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
1.1 Η ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	2
1.2 Η ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	4
1.3 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ.....	5
2.ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ.....	6
2.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ.....	6
2.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΧΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΡΥΠΑΝΤΩΝ.....	7
2.3 ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΡΥΠΑΝΤΩΝ.....	8
2.3.1 Αναλυτικά Μοντέλα.....	9
2.3.2 Αριθμητικά Μοντέλα.....	9
2.3.2.1 Κατηγοριοποίηση των Αριθμητικών Μοντέλων με βάση τις χωρο-χρονικές τους διαστάσεις.....	10
2.3.2.2 Μέθοδοι των Αριθμητικών Μοντέλων.....	11

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ (Συνέχεια)

Σελίδα

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

ARGUS ONE GIS.....	19
3.1 ARGUS ONE GIS.....	19
3.2 ΚΩΔΙΚΑΣ PTC.....	20
3.2.1 Δεδομένα Εισαγωγής Και Θέματα Επαλήθευσης.....	21
3.2.2 Η Φιλοσοφία Των Input/ Output.....	23
3.2.3 Χρονική Πορεία Έλεγχου.....	23
3.2.4 Βασικές Εξισώσεις Που Χρησιμοποιούνται Στο “PTC”.....	24
3.2.5 Αλγόριθμος Επίλυσης PTC.....	27
3.2.6 Οριακές Συνθήκες Ροής.....	28
3.2.7 Οριακές Συνθήκες Ελεύθερης Επιφάνειας Ύδατος.....	31
3.2.8 Ισοζύγιο Μάζας Ύδατος.....	33
3.2.9 Ισοζύγιο Μάζας Ρυπαντών.....	34
3.2.10 Οριακές Συνθήκες Μεταφοράς Μάζας.....	34
3.2.11 Προσομοίωση Προσρόφησης Ρυπαντών.....	34

4. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ.....37

5. ΥΠΟΓΕΙΑ ΔΙΑΠΕΡΑΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ ‘PERMEABLE REACTIVE

BARRIERS’	39
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	39
5.2 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ	39
5.3 ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ	40
5.4 ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΟΡΘΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ PRBS.....	41
5.5 ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΩΝ PRBs	44
5.6 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΟΥ ΜΕΙΩΝΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ PRBs ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ.....	45

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ (Συνέχεια)

Σελίδα

5.7 ΙΔΑΝΙΚΕΣ ΤΟΠΟΘΕΣΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ.....	46
5.8 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ / ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΩΝ PRBs.....	47
6. ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΔΩΝ.....	49
6.1 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ.....	49
6.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ.....	54
6.3 ΤΟ ΑΝΤΙΔΡΩΝ ΚΕΛΙ –Η ‘ΚΑΡΔΙΑ’ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ.....	62
6.3.1 Πληρωτικά Υλικά Του Αντιδρώντος Κελιού	62
6.3.2 Απαραίτητα Χαρακτηριστικά Των Μέσων Που Θα Αντιδράσουν Με Τους Ρύπους.....	67
6.3.3 Τεχνικές Εγκατάστασης Του Αντιδρώντος Κελιού.....	68
6.4 ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΙ ΤΟΙΧΟΙ (Funnel Walls)	74
6.4.1 Τοίχοι Από Λάσπη (Slurry Walls).....	75
6.4.2 Τοίχοι Από Ενωμένα Φύλλα Ατσαλιού (Sheet Pile Walls).....	79
6.4.3 Σύνθετα Λασπώδη Φράγματα.....	81
6.4.4. Καινοτόμες Τεχνικές Αδιαπέρατων Τοίχων.....	82
6.5 ΠΑΤΕΝΤΑΡΙΣΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	86
6.5.1 Τάφρος Με Τύρφη Ως Πληρωτικό Υλικό.....	86
6.5.2 Τάφρος Χωρίς Στερεό Πληρωτικό Μέσο.....	86
6.5.3 Τάφρος Με Στερεό Πληρωτικό Μέσο.....	87
6.5.4 Κατασκευή Τοίχου Επεξεργασίας Από Την Wci- UmwelttechnikGmbh.....	87
6.5.5 Πατενταρισμένη Κατασκευή Από Τον Dr. Steffen Ingenieurgesellschaft	88

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ (Συνέχεια)

Σελίδα

6.5.6	Μέθοδος Των Πηγαδιών Μεγάλης Διαμέτρου.....	89
6.5.7	Μέθοδος Της Sax and Klee, Γερμανία.....	89
6.5.8	Συστήματα Συγκλινόντων Φραγμάτων Και Διόδων. Μια Πατέντα Του Waterloo University.....	90
6.5.9	Μέθοδος Διάνοιξης Τάφρου Με Τη Χρήση Λάσπης Βιο- Πολυμερών.....	90
6.5.10	Άλλες Μέθοδοι Κατασκευής.....	91
6.6	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΥ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΡΥΠΑΝΤΗ ΣΤΟ ΑΝΤΙΔΡΩΝ ΚΕΛΙ	93
6.6.1	Μεθοδολογία Βασισμένη Στον Αριθμό Των Χρόνων Ημιζωής.....	93
6.6.2	Μεθοδολογία Βασισμένη Στην Κινητική Της Αντίδρασης Του Ρυπαντή Μέσα Στο Κελί.....	94
6.7	ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ – MONITORING.....	95
7.	ΡΥΠΑΝΣΗ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΑΠΟ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ (BTEX).....	100
7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	100
7.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ BTEX	101
7.3	ΤΥΧΗ ΤΟΥ BTEX ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	103
7.4	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ BTEX ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ.....	105
7.5	ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΟ BTEX.....	106
7.6	ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΤΟ BTEX.....	107
7.7	ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ BTEX.....	108
7.8	ΒΙΟΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΤΟΥ BTEX.....	109
7.9	ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ ΒΙΟΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗΣ.....	115

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ (Συνέχεια)

Σελίδα

8. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΟΣ

ΚΕΛΙΟΥ ΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΛΟΥΜΙΟΥ ΜΕ ΒΤΕΧ.....	117
8.1 ΒΙΟΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΒΤΕΧ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ORC®	117
8.2 ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ ΤΟΥ ΒΤΕΧ ΑΠΟ ΕΝΕΡΓΟ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	119
8.2.1 Γενικά Στοιχεία.....	119
8.2.2 Ρόφηση Και Επιβράδυνση	120
8.2.3 Εκτίμηση Του Μέγιστου Χρόνου Ζωής Ενός Φράγματος Με Ενεργό Άνθρακα.....	123
8.2.4 Παράγοντες Που Επηρεάζουν Το Χρόνο Ζωής Του Φράγματος.....	124
8.2.5 Πλεονεκτήματα Και Περιορισμοί Στη Χρήση Του Ενεργού Άνθρακα.....	124
8.3 ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ ΤΟΥ ΒΤΕΧ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ (ΑΠΟ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ) ΜΕΘΟΔΟΣ HUMASORB-CS™	125

9. ΚΟΣΤΟΣ ΤΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ.....	127
9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	127
9.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ.....	129
9.2.1 Κόστος Κεφαλαίου.....	129
9.2.2 Κόστος Λειτουργίας Και Συντήρησης.....	131
9.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ.....	131
9.4 ΚΟΣΤΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ PRBs.....	132

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ (Συνέχεια)

Σελίδα

10. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ PRBs ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ.....	134
10.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	134
10.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.....	137
10.2.1 Alameda Point, Alameda, CA.....	137
10.2.2 Εγκατάσταση Διοίκησης Ομοσπονδιακού Αυτοκινητοδρόμου, Lakewood, CO.....	141
10.2.3 East Carrington, (Near Olds), Alberta, Canada.....	143

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟΝ

11. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΔΩΝ ΣΕ ΔΥΟ ΑΠΛΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΡΥΠΑΣΜΕΝΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ.....	147
11.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ.....	147
11.1.1 Προσομοίωση Αρχικής Κατάστασης Της Περιοχής.....	147
11.1.2 Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετά Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή.....	173
11.1.3 Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετά Τη Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή Με Την Εφαρμογή Της Τεχνολογίας Εξυγίανσης «Συγκλίνοντα Φράγματα Και Δίοδος».....	175
11.1.4 Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετά Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή Με Την Εφαρμογή Της Τεχνολογίας Εξυγίανσης «Αντληση Και Επεξεργασία (Pump and Treat)».....	184

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ (Συνέχεια)

Σελίδα

11.1.5 Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετά Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή Με Την Εφαρμογή Της Τεχνολογίας Εξυγίανσης «Άντληση Και Επεξεργασία (Pump And Treat)» Σε Συνδυασμό Με Κατασκευή Φράγματος.....	186
11.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ.....	187
11.2.1 Αρχική Κατάσταση Περιοχής.....	189
11.2.2 Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετά Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή.....	190
11.2.3 Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετά Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή Με Την Εφαρμογή Της Τεχνολογίας Εξυγίανσης «Συγκλίνοντα Φράγματα Και Δίοδος».....	191
11.2.4 Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετά Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή Με Την Εφαρμογή Της Τεχνολογίας Εξυγίανσης «Άντληση Και Επεξεργασία (Pump And Treat)».....	192
11.2.5 Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετά Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή Με Την Εφαρμογή Της Τεχνολογίας Εξυγίανσης «Άντληση Και Επεξεργασία (Pump And Treat)» Σε Συνδυασμό Με Κατασκευή Αδιαπέρατου Φράγματος.....	193
11.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	195
11.3.1 Ελεύθερος Υδροφορέας.....	195
11.3.2 Περιορισμένος Υδροφορέας.....	198

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ (Συνέχεια)

Σελίδα

12. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΤΟΥ ΡΥΠΑΣΜΕΝΟΥ, ΑΠΟ ΒΤΕΧ, ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ SEYMOUR.....	201
12.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ SEYMOUR.....	201
12.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΔΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ SEYMOUR.....	204
12.2.1 Προσομοίωση Αρχικής Κατάστασης Της Περιοχής Seymour.....	204
12.2.2 Προσομοίωση Κατάστασης Της Περιοχής Seymour Δυο Χρόνια Μετά Την Παύση Έκχυσης Ρύπων ΒΤΕΧ.....	220
12.2.3 Προσομοίωση Κατάστασης Της Περιοχής Seymour Τρία Χρόνια Μετά Την Παύση Έκχυσης Ρύπων ΒΤΕΧ.....	221
12.2.4 Κατάσταση Περιοχής Μετά Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή Με Την Εφαρμογή Της Τεχνολογίας Εξυγίανσης «Συγκλίνοντα Φράγματα Και Δίοδος» Σε Ευθεία Διάταξη.....	222
12.2.5 Κατάσταση Περιοχής Μετά Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή Με Την Τοποθέτηση Συστήματος «Συγκλινόντων Φραγμάτων Και Διόδου» Σε Γωνία.....	227
12.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΔΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ SEYMOUR.....	232
13. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗ- ΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ SEYMOUR.....	235

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ (Συνέχεια)

Σελίδα

13.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΣΤΗ ΔΙΟΔΟ.....	235
13.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ SEYMOUR.....	236

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	IN- SITU ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ.....	244
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ PRBs.....	246

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Σελίδα

Εικόνα 1-1 Η κατανομή του νερού του πλανήτη (www.groundwater.com).....	2
Εικόνα 1-2 Η κίνηση του νερού στο υπέδαφος (www.groundwater.com).....	3
Εικόνα 1-3 Η ρύπανση του υπόγειου νερού (www.groundwater.com).....	4
Εικόνα 2-1 Διακριτοποίηση χώρου ή χρόνου (www.groundwater.com).....	12
Εικόνα 2-2 Διακριτοποίηση χώρου (Pinder G.F, August 2001)	12
Εικόνα 2-3 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (Anderson and Woessner,1992).....	13
Εικόνα 2-4 Μονοδιάστατη διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών (Pinder G.F, August 2001).....	14
Εικόνα 2-5 Μονοδιάστατο πλέγμα στοιχείων διαφορετικού πλάτους (Pinder G.F, August 2001).....	14
Εικόνα 2-6 Δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία (Huyakorn and Pinder, 1983).....	15
Εικόνα 2-7 Τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία (Huyakorn and Pinder, 1983).....	15
Εικόνα 3-1 Αναπαράσταση τρισδιάστατου στοιχείου (Pinder G.F, August 2001).....	21
Εικόνα 3-2 Αρίθμηση κόμβων και πλάτος ταινίας (Babu D.K et al,June 1997)	22
Εικόνα 3-3 Συνθήκες Ελεύθερης Επιφάνειας Ύδατος (Babu D.K et al,June 1997).....	32
Εικόνα 5-1 Υπόγεια διαπερατά φράγματα (Birke and Roehl, 2001).....	39
Εικόνα 5-2 Ενεργή τάφος (Birke and Roehl, 2001).....	40
Εικόνα 5-3 Funnel and Gate (Birke and Roehl, 2001).....	40
Εικόνα 5-4 Trench and Gate (Bowles W. Marc,1997).....	41
Εικόνα 6-1 Διατάξεις ‘Funnel and Gate’ (Starr and Cherry, 1994).....	50
Εικόνα 6-2 Φράγματα με πολλαπλές διόδους (Starr and Cherry, 1994).....	52
Εικόνα 6-3 Διατάξεις χωρίς προεκτάσεις και με προεκτάσεις 2, 5 και 8 μέτρων (Starr and Cherry, 1994).....	53

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ (Συνέχεια)

Σελίδα

Εικόνα 6-4 Τομή Συστήματος Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων (Suthersan S.S, 1996).....	53
Εικόνα 6-5 Προσομοίωση ‘Funnel and Gate’ με μήκος φραγμάτων 7, 21 και 61 m (Starr and Cherry, 1994).....	55
Εικόνα 6-6 Προσομοίωση ‘Funnel and Gate’ με πλάτος διόδου 1, 3 και 9 m και πλάτος φράγματος 21 m (Starr and Cherry, 1994).....	56
Εικόνα 6-7 Σύμβολα και ονοματολογία (Starr and Cherry, 1994).....	58
Εικόνα 6-8 Επίδραση της κατεύθυνσης της κλίσης της περιοχής στο πλούμιο και στη ζώνη εγκλεισμού (Starr and Cherry, 1994).....	59
Εικόνα 6-9 Συμμετρικά φράγματα πλάτους 21 m σε ευθεία και σε γωνία 90° (Starr and Cherry, 1994).....	59
Εικόνα 6-10 Ασύμμετρα φράγματα πλάτους 21 m σε ευθεία και σε γωνία 90° (Starr and Cherry, 1994).....	59
Εικόνα 6-11 Αποδόμηση χλωριωμένων υδρογονανθράκων (Birke and Roehl, 2001).....	64
Εικόνα 6-12 Αναγωγική ακινητοποίηση του χρωμίου (Birke and Roehl, 2001).....	64
Εικόνα 6-13 Η συμβατική εκσκαφή τάφρου (Environics Directorate U.S Air Force,1997).....	69
Εικόνα 6-14 Η συνεχής διάνοιξη τάφρου (Environics Directorate U.S Air Force,1997).....	71
Εικόνα 6-15 Αποσπώμενος in situ αντιδραστήρας (Suthersan, S.S, 1999)	72
Εικόνα 6-16 Τοίχοι από λάσπη (Suthersan, S.S., 1999).....	75
Εικόνα 6-17 Τοίχοι από Έδαφος-Μπετονίτη (Environics Directorate U.S Air Force, 1997).....	76
Εικόνα 6-18 Sheet Pile Walls (Environics Directorate U.S Air Force,1997).....	79
Εικόνα 6-19 Μονωμένος σύνδεσμος (Suthersan, S.S., 1999).....	79
Εικόνα 6-20 Εγκατάσταση Waterloo Barrier™ με δόνηση (www.oceta.on.ca/profiles/wbi/barrier.html).....	80
Εικόνα 6-21 Σύνθετα λασπώδη φράγματα (Environics Directorate U.S Air Force,1997).....	81
Εικόνα 6-22 Σύστημα παρακολούθησης στα Σύνθετα λασπώδη φράγματα (Environics Directorate U.S Air Force,1997).....	82
Εικόνα 6-23 Στήλες ρευστοκονιάματος (Environics Directorate U.S Air Force,1997)	83
Εικόνα 6-24 Τοίχος διάφραγμα (Environics Directorate U.S Air Force,1997).....	83
Εικόνα 6-25 Σειρά έκχυσης στηλών ρευστοκονιάματος (Environics Directorate U.S Air Force,1997).....	84

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ (Συνέχεια)

Σελίδα

Εικόνα 6-26 Βαθιά ανάμειξη εδάφους (Environics Directorate U.S Air Force,1997).....	85
Εικόνα 6-27 Διατάξεις των πηγαδιών παρακολούθησης (Environics Directorate U.S Air Force,1997).....	97
Εικόνα 7-1 Χημικοί τύποι των συστατικών του BTEX (Καλογεράκης, 2002).....	102
Εικόνα 7-2 Τύχη και μεταφορά του BTEX (www.envirotools.org/factsheets/btex.shtml).....	103
Εικόνα 7-3 Εισαγωγή του BTEX στον άνθρωπο (www.envirotools.org/factsheets/btex.shtml).....	105
Εικόνα 7-4 Συστατικά BTEX της Βενζίνης (www.envirotools.org/factsheets/btex.shtml).....	106
Εικόνα 8-1 Σωρός από ενεργό άνθρακα (Birke and Roehl, 2001).....	119
Εικόνα 8-2 Ο ενεργός άνθρακας στο μικροσκόπιο (Birke and Roehl, 2001).....	120
Εικόνα 9-1 Σύγκριση κόστους τεχνολογίας ‘Pump and Treat’, ‘PRBs’ και ‘Natural Attenuation’ (Vidumsky, 2000).....	128
Εικόνα 10-1 Κατηγοριοποίηση των PRBs με βάση την κλίμακα εφαρμογής του και το ρυπαντή (U.S. EPA, January 2002).....	135
Εικόνα 10-2 Κατηγοριοποίηση των PRBs με βάση την τοποθεσία εγκατάστασης και το ρυπαντή (U.S. EPA, January 2002).....	135
Εικόνα 10-3 Κατηγοριοποίηση των PRBs με βάση τον φορέα υλοποίησής τους (U.S. EPA, January 2002).....	136
Εικόνα 10-4 Κατηγοριοποίηση των PRBs με βάση τη διάταξή τους (U.S. EPA, January 2002)	136
Εικόνα 10-5 Κατηγοριοποίηση των PRBs με βάση το αντιδρών μέσο (U.S. EPA, January 2002).....	137
Εικόνα 11-1 Βασικό παράθυρο του ARGUS ONE και η στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας.....	148
Εικόνα 11-2 Η επιλογή “New PTC Project. . .” από το μενού PIEs	148
Εικόνα 11-3 Διαμόρφωση της εφαρμογής του PTC ‘PTC Configuration’, ‘General’	149
Εικόνα 11-4 Διαμόρφωση της εφαρμογής του PTC ‘PTC Configuration’, ‘Stresses’.....	151
Εικόνα 11-5 Καθορισμός μεγέθους περιοχής σχεδίασης.....	154
Εικόνα 11-6 Σχεδιασμός περιοχής εφαρμογής.....	155
Εικόνα 11-7 Παράθυρο πυκνότητας δικτύου.....	156
Εικόνα 11-8 Καθορισμός μονάδας μήκους.....	156

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ (Συνέχεια)

Σελίδα

Εικόνα 11-9	Ορισμός κλίμακας στον Χ άξονα.....	157
Εικόνα 11-10	Εισαγωγή οριακών συνθηκών ροής.....	158
Εικόνα 11-11	Τοποθέτηση πηγής ρύπανσης.....	159
Εικόνα 11-12	Παράθυρο ‘ Contour Information ’.....	160
Εικόνα 11-13	Εισαγωγή τιμής αρχικού ύψους περιοχής	161
Εικόνα 11-14	Σχηματισμός δικτύου στοιχείων.....	162
Εικόνα 11-15	Βελτιστοποίηση πλάτους ζώνης πίνακα αρίθμησης κόμβων.....	163
Εικόνα 11-16	Παράθυρο ‘ Run ’ του προγράμματος.....	163
Εικόνα 11-17	Παράθυρο ‘ Import Data ’.....	165
Εικόνα 11-18	Παράθυρο ‘ Choose file to import ’.....	166
Εικόνα 11-19	Παράθυρο ‘ Layers ’.....	167
Εικόνα 11-20	Παράθυρο ‘ Contour Diagram ’, επιλογή ‘ Chart ’.....	168
Εικόνα 11-21	Παράθυρο ‘ Contour Diagram ’, επιλογή ‘ Position ’.....	168
Εικόνα 11-22	Παράθυρο ‘ Contour Diagram ’, επιλογή ‘ Titles ’	169
Εικόνα 11-23	Παράθυρο ‘ Vector Diagram ’.....	172
Εικόνα 11-24	Παράθυρο ‘ Contour Information ’.....	173
Εικόνα 11-25	Παράθυρο ‘ Layers ’- ‘ Initial concentrations L1 ’.....	174
Εικόνα 11-26	Σχεδιασμός φραγμάτων.....	177
Εικόνα 11-27	Δημιουργία νέου δικτύου στοιχείων.....	178
Εικόνα 11-28	Τοποθέτηση πηγαδιών.....	185
Εικόνα 12-1	Εγκάρσια τομή της τοποθεσίας Seymour από τα Ν.Α προς τα Β.Δ.....	203
Εικόνα 12-2	Διαμόρφωση της εφαρμογής του PTC ‘ PTC Configuration ’, ‘ General ’.....	205
Εικόνα 12-3	Διαμόρφωση της εφαρμογής του PTC ‘ PTC Configuration ’, ‘ Stresses ’.....	206
Εικόνα 12-4	Επίπεδο πληροφορίας ‘ Layers ’ - επιλογή ‘ Maps ’.....	207
Εικόνα 12-5	Εισαγωγή χάρτη περιοχής από αρχείο προέλευσης.....	207
Εικόνα 12-6	Ο χάρτης της περιοχής στο ‘ PTC Project ’	208
Εικόνα 12-7	Τοποθέτηση του κέρσρα στο αριστερό άκρο της κλίμακας.....	209
Εικόνα 12-8	Ορισμός κλίμακας στον Χ άξονα.....	209
Εικόνα 12-9	Σχεδιασμός περιοχής προσομοίωσης.....	210
Εικόνα 12-10	Εισαγωγή οριακών συνθηκών ροής.....	211
Εικόνα 12-11	Καθορισμός αρχικών υδραυλικών υψών.....	212
Εικόνα 12-12	Επιλογή από τις ‘ Contour interpretation methods ’ την ‘ 624 Interpolation ’.....	213
Εικόνα 12-13	Καθορισμός ανύψωσης πυθμένα.....	214
Εικόνα 12-14	Καθορισμός ανύψωσης επιφάνειας εδάφους.....	215
Εικόνα 12-15	Τοποθέτηση πηγής ρύπανσης.....	216
Εικόνα 12-16	Σχηματισμός δικτύου στοιχείων.....	218

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Σελίδα

Πίνακας 4-1 Παραδείγματα τεχνολογιών εξυγίανσης υπογείων υδάτων (US EPA, 1999).....	38
Πίνακας 6-1 Αντιδρώντα μέσα για ανόργανους ρυπαντές (Birke and Roehl, 2001).....	66
Πίνακας 6-2 Αντιδρώντα μέσα για οργανικούς ρυπαντές (Birke and Roehl, 2001).....	67
Πίνακας 6-3 Διαπερατότητα τοίχων σε εργαστήριο και στο πεδίο (Suthersan, S.S., 1999).....	85
Πίνακας 7-1 MCL όρια για το BTEX (www.envirotools.org/factsheets/btex.shtml).....	107
Πίνακας 7-2 Φυσικές και Χημικές ιδιότητες των ενώσεων του BTEX (Montgomery and Welcom 1989).....	108
Πίνακας 7-3 Χαρακτηριστικά αντιδράσεων βιοαποικοδόμησης (www.water.hut.fi).....	114
Πίνακας 9-1 Σύγκριση Μέσου Κόστους Κεφαλαίου των τεχνολογιών ‘P&T’ και ‘PRBs’ (US.EPA, February 2001).....	127
Πίνακας 9-2 Περίληψη του υπολογιζόμενου κόστους σε DM διαφόρων τεχνικών εξυγίανσης με διάρκεια 50 χρόνων (Trischer και Partner, 1996).....	132
Πίνακας 9-3 Κόστη των μεθόδων κατασκευής των διαπερατών φραγμάτων (χωρίς το πληρωτικό υλικό) (Beitinger, E. NATO/CCMS Pilot Study,1998).....	132
Πίνακας 9-4 Συνολικός Πίνακας με τις τεχνικές εγκατάστασης PRBs (Environics Directorate U.S Air Force,1997)	133
Πίνακας 11-1 Ομάδα παραμέτρων “General control”	152
Πίνακας 11-2 Ομάδα παραμέτρων “Time control”	153
Πίνακας 11-3 Ομάδα παραμέτρων ‘Graphs control’	153
Πίνακας 11-4 Κουτιά γενικού ελέγχου.....	154
Πίνακας 11-5 Τιμές των παραμέτρων εισαγωγής στο μοντέλο.....	161
Πίνακας 11-6 Τα αρχεία του output.....	164
Πίνακας 11-7 Τιμές των παραμέτρων εισαγωγής στο μοντέλο.....	188
Πίνακας 12-1 Δεδομένα πηγαδιών.....	212
Πίνακας 12-2 Δεδομένα ανύψωσης πυθμένα.....	213
Πίνακας 12-3 Δεδομένα ανύψωσης επιφάνειας εδάφους.....	215
Πίνακας 12-4 Χαρακτηριστικά του υδροφορέα (Καρατζάς, 2002).....	217

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Σελίδα

Διάγραμμα 5-1 Βήματα σχεδιασμού PRBs.....	43
(www.estcp.org)	

ΛΙΣΤΑ ΧΑΡΤΩΝ

Σελίδα

Χάρτης 12-1 Περιοχή Seymour.....	202
---	-----

ΛΙΣΤΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

Σελίδα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	IN- SITU ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ.....	244
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ PRBs.....	246

ΛΙΣΤΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Σελίδα

Γράφημα 11-1 ‘Initial Heads’	169
Γράφημα 11-2 ‘Initial Concentrations’	170
Γράφημα 11-3 ‘Initial Velocities’	172
Γράφημα 11-4 Συγκεντρώσεις 2 χρόνια μετά την παύση λειτουργίας της πηγής	175
Γράφημα 11-5 Υδραυλικά ύψη με την ύπαρξη ‘Funnel and Gate’	179
Γράφημα 11-6 Ταχύτητες υπογείου νερού με την ύπαρξη ‘Funnel and Gate’	180
Γράφημα 11-7 Συγκεντρώσεις ρύπου με την ύπαρξη ‘Funnel and Gate’	180
Γράφημα 11-8 Συγκεντρώσεις με την ύπαρξη ‘Funnel and Gate’ με δίοδο 5 m	181
Γράφημα 11-9 Ταχύτητες με την ύπαρξη ‘Funnel and Gate’ με δίοδο 5 m	181
Γράφημα 11-10 Υδραυλικά ύψη με την ύπαρξη ‘Funnel and Gate’ με δίοδο 10m	182
Γράφημα 11-11 Συγκεντρώσεις με την ύπαρξη ‘Funnel and Gate’ με δίοδο 10m	182
Γράφημα 11-12 Ταχύτητες με την ύπαρξη ‘Funnel and Gate’ με δίοδο 10m	183
Γράφημα 11-13 Συγκεντρώσεις με την ύπαρξη ‘U- Funnel and Gate’	183
Γράφημα 11-14 Ταχύτητες με την ύπαρξη ‘U- Funnel and Gate’	184
Γράφημα 11-15 Συγκεντρώσεις με τη χρήση της τεχνικής ‘Pump and Treat’	186
Γράφημα 11-16 Συγκεντρώσεις με τη χρήση της τεχνικής ‘Pump and Treat και ‘Funnel’	186
Γράφημα 11-17 Ταχύτητες με τη χρήση της τεχνικής ‘Pump and Treat’ και ‘Funnel’	187
Γράφημα 11-18 Αρχικές συγκεντρώσεις ρύπου	189
Γράφημα 11-19 Αρχικές ταχύτητες στον περιορισμένο υδροφορέα	190
Γράφημα 11-20 Αρχικά υδραυλικά ύψη περιορισμένου υδροφορέα	190
Γράφημα 11-21 Συγκεντρώσεις ρύπου στον περιορισμένο υδροφορέα	191
Γράφημα 11-22 Συγκεντρώσεις με την ύπαρξη ‘Funnel and Gate’	192
Γράφημα 11-23 Ταχύτητες με την ύπαρξη ‘Funnel and Gate’	192
Γράφημα 11-24 Συγκεντρώσεις ρύπου με την τεχνολογία ‘Pump and treat’	193
Γράφημα 11-25 Συγκεντρώσεις ρύπου με την τεχνολογία ‘Pump and treat and Funnel’	194
Γράφημα 11-26 Ταχύτητες με την τεχνολογία ‘Pump and treat and Funnel’	194
Γράφημα 12-1 ‘Initial Concentrations’ στην περιοχή Seymour	219
Γράφημα 12-2 ‘Initial Velocities’ στην περιοχή Seymour	219
Γράφημα 12-3 ‘Initial Heads’ στην περιοχή Seymour	220
Γράφημα 12-4 ‘Concentrations after 2 years’ στην περιοχή Seymour	221
Γράφημα 12-5 ‘Concentrations after 3 years’ στην περιοχή Seymour	222
Γράφημα 12-6 ‘Concentrations ‘F & G’ μετά από 2 χρόνια’	223
Γράφημα 12-7 ‘Velocities ‘F & G’ μετά από 2 χρόνια’	224
Γράφημα 12-8 ‘Heads ‘F & G’ μετά από 2 χρόνια’	224
Γράφημα 12-9 ‘Concentrations ‘F & G’ μετά από 3 χρόνια’	225
Γράφημα 12-10 ‘Concentrations ‘F & G’ μετά από 5 χρόνια’	226
Γράφημα 12-11 ‘Concentrations ‘F & G’ μετά από 7 χρόνια’	227
Γράφημα 12-12 ‘Concentrations ‘F & G’ με γωνία μετά από 2 χρόνια’	228

ΛΙΣΤΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ (Συνέχεια)

Σελίδα

Γράφημα 12-13	‘Velocities ‘F & G’ με γωνία μετά από 2 χρόνια’	228
Γράφημα 12-14	‘Heads ‘F & G’ με γωνία μετά από 2 χρόνια’	229
Γράφημα 12-15	‘Concentrations ‘F & G’ με γωνία μετά από 3 χρόνια’	230
Γράφημα 12-16	‘Concentrations ‘F & G’ με γωνία μετά από 5 χρόνια’	231

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Ελληνικά Γράμματα

α	Σταθερά
α_L	Διαμήκης διασπορά [L]
α_T	Κατά πλάτος διασπορά [L]
α_N	Κατακόρυφη εγκάρσια διασπορά [L]
β	Σταθερά
γ	Σταθερά
δ	Σταθερά
$\delta()$	Dirac συνάρτηση δέλτα
θ	Γωνία κορυφής
θ	Πορώδες του υδροφορέα, αδιάστατος αριθμός
$KPA_{\text{μελέτης}}$	Καθαρή παρούσα αξία της μελέτης
$KPA_{\text{κόστος } \Lambda \& \Sigma}$	Άθροισμα των ετήσιων κοστών λειτουργίας και συντήρησης προσαρμοσμένα στον πληθωρισμό και την αξία του κεφαλαίου μετά από 30 χρόνια.
μ	Σταθερά
ν	Μέση γραμμική ταχύτητα του υπογείου ύδατος στο φράγμα
ρ	Συνολική πυκνότητα
ρ_b	Συνολική πυκνότητα του μέσου
τ	Χρόνος συγκράτησης
φ	Κλίση της περιοχής
$\varphi(x)$	Βασική εξίσωση του x
Ω	Περιοχή προσομοίωσης

Αγγλικά Γράμματα

A	Επιφάνεια
A	Επιφάνεια από την οποία γίνεται η διαρροή
A	Δείκτης που προσδιορίζει χωρικό σημείο
a_1	Σταθερά
a_2	Σταθερά
a_3	Σταθερά

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ (Συνέχεια)

a_4	Σταθερά
a_5	Σταθερά
B	Δείκτης που προσδιορίζει χωρικό σημείο
b'	Πάχος της διεπιφάνειας
C_{lim}	Συγκέντρωση ρύπων σε αποδεκτά επίπεδα
C_s	Συγκέντρωση ισορροπίας της διαλυμένης ουσίας στην στερεά φάση
C_o	Συγκέντρωση του ρύπου που εισέρχεται στο φράγμα
C_w	Συγκέντρωση ισορροπίας της διαλυμένης ουσίας στην υγρή φάση
$C_{εκροής}$	Συγκέντρωση στην εκροή ή στην ανάντη πλευρά του αντιδραστήρα
$C_{εκροής}$	Συγκέντρωση στην εκροή ή στην κατάντη πλευρά του αντιδραστήρα
c	Χημική συγκέντρωση στο σημείο (x, y, z) τη χρονική στιγμή t [M/L^3]
c^w	Συγκέντρωση του αντλούμενου υγρού στο σημείο (x_i, y_i, z_i)
D_M	Μοριακός όρος διάχυσης, γενικά με μικρή τιμή [L^2/T]
D_{xx}	Όρος της διασποράς στην x οριζόντια κατεύθυνση [L^2T]
D_{yy}	Όρος της διασποράς στην y οριζόντια κατεύθυνση [L^2T]
D_{zz}	Όρος της διασποράς στην z (κατακόρυφη) κατεύθυνση [L^2T]
D_{yx}	Όρος της διασποράς στο y-x επίπεδο [L^2T]
D_{xy}	Όρος της διασποράς στο x-y επίπεδο [L^2T]
D_{yz}	Όρος της διασποράς στο y-z επίπεδο [L^2T]
D_{zy}	Όρος της διασποράς στο z-y επίπεδο [L^2T]
D_{zx}	Όρος της διασποράς στο z-x επίπεδο [L^2T]
D_{xz}	Όρος της διασποράς στο x-z επίπεδο [L^2T]
d	Πάχος της διόδου
$E(c)$	Όρος που αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες της χημικής προσρόφησης
Eh	Δυναμικό οξειδοαναγωγής
$F(c)$	Ισόθερμη προσρόφηση (γραμμική, Freundlich, Langmuir)
F_{OC}	Ποσοστό οργανικού άνθρακα
h	Υδραυλικό ύψος [L]
h	Ύψος του νερού στον υδροφόρο αμέσως μετά ή δίπλα στην πηγή
h_M	Επίπεδο του νερού στο πάνω στρώμα
h_{source}	Ύψος του νερού στην πηγή(λίμνη, ποτάμι)
I	Εκφράζει τη μάζα του προσροφημένου υλικού
$I(c)$	Εκφράζει τη μάζα του προσροφημένου υλικού
$dI(c)/dc$	Εκφράζει το συντελεστή κατανομής
i	Δείκτης που δείχνει τον αριθμό του κόμβου
i	Η μέση οριζόντια υδραυλική κλίση της περιοχής

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ (Συνέχεια)

K_d	Συντελεστή ρόφησης, εκφράζει το λόγο των συγκεντρώσεων των ρύπων που έχουν ροφηθεί προς αυτές της υδατικής φάσης
K_F	Συντελεστής ρόφησης του Freundlich
K_{ow}	Συντελεστής διαχωρισμού οκτανόλης/ νερού
K_{xx}	Υδραυλική αγωγιμότητα στην x οριζόντια κατεύθυνση [LT^{-1}]
K_{yy}	Υδραυλική αγωγιμότητα στην y οριζόντια κατεύθυνση [LT^{-1}]
K_{zz}	Υδραυλική αγωγιμότητα στην z (κατακόρυφη) κατεύθυνση [LT^{-1}]
K'_z	Κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα της διεπιφάνειας που διαχωρίζει τον υδροφόρο από την πηγή
k	Σταθερά ταχύτητας αντίδρασης
$L_{TOIXΟΥ}$	Μήκος του τοίχου
$N_{1/2}$	Αριθμός των ημιζωών που απαιτούνται
n	Πορώδες
n	Δείκτης που δείχνει το χρονικό βήμα
n_e	Ενεργό πορώδες του εδάφους
$1/n$	Εκθέτης αυτός είναι συνήθως μικρότερος από 1
pH	Αντίθετος δεκαδικός λογάριθμος της συγκέντρωσης κατιόντων υδρογόνου
Q	Ισχύς άντλησης (πηγή/ καταβόθρα) [$1/T$]
Q_i	Ογκομετρικός ρυθμός έγχυσης/ αποφόρτισης [L^3/T] στο σημείο (x_i, y_i, z_i)
Q_i	Όρος της πηγής/ καταβόθρας στην περιοχή i [L^3T^{-1}] (π.χ. αντλίες, θετικές τιμές δηλώνουν έγχυση)
Q_L	Ογκομετρική πυκνότητα ροής
q	Πυκνότητας ροής
$dq/dx _i$	Απόκλιση ταχύτητας
R	Διήθηση
R	Παράγοντας καθυστέρησης
R_d	Αριθμός των πόρων του όγκου που είναι ενεργοί πριν πραγματοποιηθεί η διείσδυση των ρύπων
$R(x,t)$	Υπόλοιπο εξίσωσης
r	Αριθμός των πηγών/ ταμιευτήρων
S	Ειδικός συντελεστής αποθηκευτικότητας [L^{-1}]
S_s	Ειδικός συντελεστής αποθηκευτικότητας [L^{-1}]
S_y	Ειδική απόδοση κοντά στο επίπεδο του νερού
t	Χρόνος προσομοίωσης
t_s	Χρόνος ζωής ενός φράγματος με ενεργό άνθρακα
V	Μέγεθος του διανύσματος της ταχύτητας [L/T]
V_{Gate}	Ο όγκος της διόδου
V_x	Ταχύτητα του Darcy στην x οριζόντια κατεύθυνση [LT^{-1}]

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ (Συνέχεια)

V_y	Ταχύτητα του Darcy στην y οριζόντια κατεύθυνση [LT^{-1}]
V_z	Ταχύτητα του Darcy στην z (κατακόρυφη) κατεύθυνση [LT^{-1}]
v_a	Ταχύτητα ροής του υπόγειου ύδατος
v_s	Ταχύτητα μεταφοράς ρύπων
W	Βάρος
$W_{\DeltaΙΟΔΟΣ}$	Πλάτος της διόδου
$W_{ΦΡΑΓΜΑ}$	Πλάτος του φράγματος
$W_{ΦΡΑΓΜΑ \text{ ΚΑΘΕΤΟ}}$	Πλάτος του φράγματος προβαλλόμενο κάθετα στην κλίση της περιοχής
x	Πάχος του φράγματος
Δx	Μήκος ενός στοιχείου πεπερασμένων διαφορών στη x κατεύθυνση
z_M	Ύψος του πυθμένα του πάνω στρώματος
z_{M+1}	Επάνω όριο της περιοχής ροής (επιφάνεια εδάφους)
$z_{WT}-z_M$	Πάχος του υδροφορέα στο πάνω στρώμα
z_{WT}	Πραγματική ανύψωση του νερού

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΚΡΩΝΥΜΩΝ

Ελληνικά Γράμματα

ΚΠΑ	Καθαρή Παρούσα Αξία
-----	---------------------

Αγγλικά Γράμματα

B-P	Βιοπολυμερή ‘Bio-polymer’
BTEX	Βενζένιο, Τολουένιο, Αιθυλοβενζένιο, Ξυλένια
Ca^{2+}	Κατιόν ασβεστίου
C-B	Τσιμέντο-Μπετονίτη
Cl^-	Ανιόν χλωρίου
CO_2	Διοξείδιο του άνθρακα
Cr^{+6}	Εξασθενές χρώμιο
DCE	Διχλωροαιθυλένιο
cDCE	cis-1,2-Διχλωροαιθυλένιο
1,1-DCE	1,1-Διχλωροαιθυλενίου
DNAPL	Μη-Υδατικά Υγρά με Πυκνότητα Μεγαλύτερη του Νερού
DO	Διαλυμένο Οξυγόνο

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΚΡΩΝΥΜΩΝ (Συνέχεια)

Fe ⁰	Σίδηρος με μηδενικό σθένος
Fe(III)	Τρισθενής Σίδηρος
GIS	Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών
H ₂	Υδρογόνο
HCO ₃ ⁻	Ανιόν ανθρακικού οξέος
HDPE	Υψηλής Πυκνότητας Πολυαιθυλένιο
LNAPL	Μη-Υδατικά Υγρά Ελαφρύτερα από το Νερό
LUSTs	Υπόγειες Δεξαμενές Αποθήκευσης με Διαρροή
MCLs	Μέγιστα Επίπεδα Ρυπαντή
Mg ²⁺	Κατιόν μαγνησίου
NAPLs	Μη – Υδατικά Υγρά (Non-Aqueous Phase Liquids)
NO ₃ ⁻	Νιτρική ρίζα
O	Οξυγόνο
ORC TM :	Μείγμα που απελευθερώνει οξυγόνο
PAH	Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες
PCE	Τετραχλωροαιθυλένιο
PO ₄ ²⁻	Φωσφορική ρίζα
PRBs	Υπόγεια Διαπερατά Φράγματα
PTC	Κώδικας Μεταφοράς του Πρίνστον
QAPP	Πρόγραμμα Διασφάλισης ποιότητας
S-B	Έδαφος- Μπετονίτη
S-C-B	Έδαφος- Τσιμέντο- Μπετονίτη
SO ₄ ²⁻	Θεική ρίζα
SPRB	Υπόγειου Φράγμα με Διόδους σε Σειρά
TCA	1,1,1-Τριχλωροαιθάνιο
TCE	Τριχλωροαιθυλένιο
TM	Σήμα Κατατεθέν
TPH	Ολικοί Υδρογονάνθρακες Πετρελαίου
U.S EPA	U.S Environmental Protection Agency
VC	Βινυλοχλωρίδιο
VOCs	Πτητικοί Οργανικοί Υδρογονάνθρακες
XRD	Φωτοηλεκτρική Φασματοσκοπία των ακτινών-X

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το σύστημα ‘Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων’(Funnel and Gate) είναι μια νέα τεχνολογία in situ παθητικής επεξεργασίας και εξυγίανσης ρυπασμένου υπογείου ύδατος. Ο τύπος αυτός υπογείου φράγματος χρησιμοποιεί φράγματα μικρής διαπερατότητας για την τροποποίηση της ροής του υπογείου νερού ,έτσι ώστε αυτό να ρέει κυρίως διαμέσου κενών υψηλής διαπερατότητας όπου γίνεται η επεξεργασία των ρύπων, δηλαδή των διόδων.

Σκοπός της μελέτης είναι η προσομοίωση της ροής του υπογείου ύδατος και της μεταφοράς μάζας, με τη χρήση του μοντέλου ARGUS ONE Student και του κώδικα PTC, για την εύρεση της βέλτιστης διάταξης των ‘Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων’.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται η βέλτιστη διάταξη της τεχνολογίας αυτής με σκοπό την εξυγίανση του υπόγειου υδροφορέα στη περιοχή SEYMOUR, ο οποίος έχει ρυπανθεί από BTEX. Το BTEX είναι ένα αρκτικόλεξο για τους ρύπους Βενζόλιο, Τολουόλιο, Αιθυλοβενζόλιο, και Ξυλόλιο, αρωματικούς υδρογονάνθρακες που είναι ιδιαίτερα βλαβεροί και επικίνδυνοι για το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

Η βέλτιστη διάταξη που προέκυψε είναι το φράγμα σε ευθεία , τοποθετημένο κάθετα στην υδραυλική κλίση της περιοχής. Προτείνεται η κατασκευή συστήματος με αδιαπέρατους τοίχους από Τσιμέντο-Μπετονίτη (Cement - Bentonite Slurry walls) και Δίοδο με ORC[®] ,δηλαδή μείγμα που απελευθερώνει οξυγόνο, ως αντιδρών μέσο, για τη βιοαποδόμηση του BTEX. Αποτέλεσμα της εγκατάστασης του παραπάνω συστήματος είναι η πλήρης εξυγίανση της περιοχής σε διάστημα 7 χρόνων.

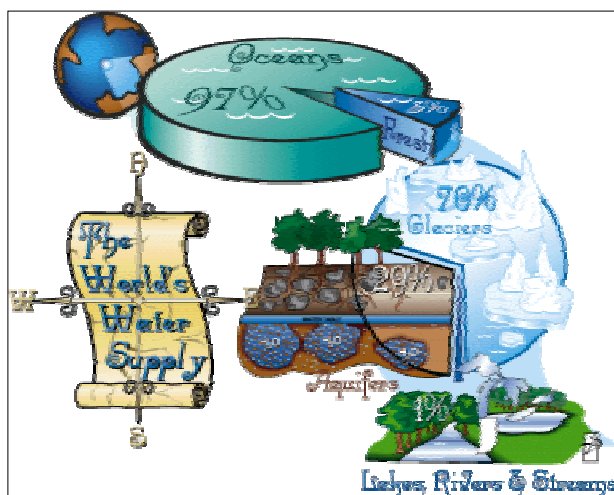
ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ (PRBs), ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ARGUS ONE (ΚΩΔΙΚΑΣ PTC) ΚΑΙ ΤΟΥ ΡΥΠΟΥ BTEX

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

Ο τύπος του νερού που χρησιμοποιείται στις περισσότερες ανθρώπινες δραστηριότητες είναι το γλυκό νερό. Μόνο, όμως το 3% των συνολικών αποθεμάτων νερού του πλανήτη είναι γλυκό νερό. Το ποσοστό αυτό αποτελείται κατά 70% από παγωμένο νερό σε παγόβουνα και παγετώνες, κατά 29 % από υπόγειο νερό και μόνο κατά 1% από νερό σε λίμνες και ποτάμια (Εικόνα 1-1).

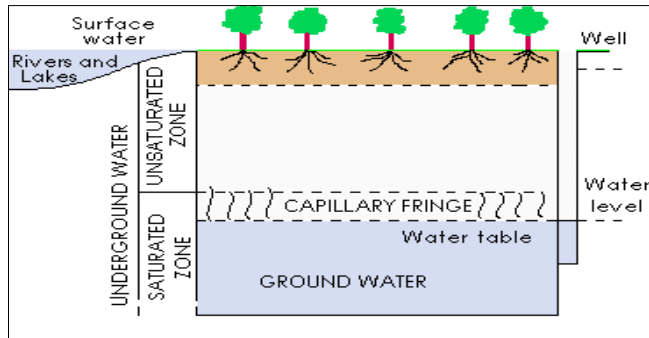


Εικόνα 1-1 Η κατανομή του νερού του πλανήτη
(www.groundwater.com)

Υπόγειο νερό καλείται το νερό που συγκρατείται μέσα στα αλληλοσυνδεόμενα κενά κορεσμένων πετρωμάτων (πόροι), κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Σύμφωνα με τον υδρολογικό κύκλο, όταν η βροχή πέφτει στο έδαφος, ένα μέρος του νερού ρέει επιφανειακά σε ποτάμια ή λίμνες, ένα μέρος εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα, ορισμένη ποσότητα προσλαμβάνεται από τα φυτά, και μια ποσότητα διεισδύει στο έδαφος. Καθώς το νερό αρχίζει να κινείται μέσα στο έδαφος μπαίνει σε μια ζώνη η οποία περιέχει και νερό και αέρα, η ονομαζόμενη ακόρεστη ζώνη (Εικόνα 1-2).

Το πάνω μέρος αυτής της ζώνης, γνωστό ως ζώνη ριζών, υποστηρίζει την ανάπτυξη των φυτών. Κάτω από αυτή τη ζώνη υπάρχει μια ενδιάμεση ζώνη ακολουθούμενη από ένα κορεσμένο στρώμα που χαρακτηρίζεται από τριχοειδή φαινόμενα, που οφείλονται στις ελκτικές δυνάμεις ανάμεσα στο νερό και τα πετρώματα. Σαν αποτέλεσμα αυτής της έλξης το νερό προσκολλάται σαν μια μεμβράνη γύρω από τα εδαφικά σωματίδια.



Εικόνα 1-2 Η κίνηση του νερού στο υπέδαφος (www.groundwater.com)

Στη συνέχεια το νερό κινείται διαμέσου της ακόρεστης ζώνης στην κορεσμένη ζώνη, όπου όλα τα αλληλοσυνδεόμενα κενά ανάμεσα στα εδαφικά σωματίδια είναι γεμάτα νερό. Μόνο μέσα στην κορεσμένη ζώνη ο όρος “Υπόγειο νερό” είναι σωστά χρησιμοποιούμενος.

Συχνά, πιστεύεται πως το υπόγειο νερό είναι σαν μια υπόγεια λίμνη ή ένα ποτάμι. Μόνο μέσα σε σπηλιές ή σε κανάλια ροής σχηματισμένα από λάβα μπορεί το υπόγειο νερό να έχει αυτή τη μορφή. Αντιθέτως το υπόγειο νερό συγκρατείται συνήθως μέσα σε πορώδη εδάφη ή πετρώματα, σχεδόν με τον ίδιο τρόπο που συγκρατείται το νερό μέσα σε ένα σφουγγάρι.

Η σπουδαιότητα του υπόγειου νερού είναι πολύ μεγάλη, γεγονός που φαίνεται ξεκάθαρα από τα ποσοστά που ακολουθούν.

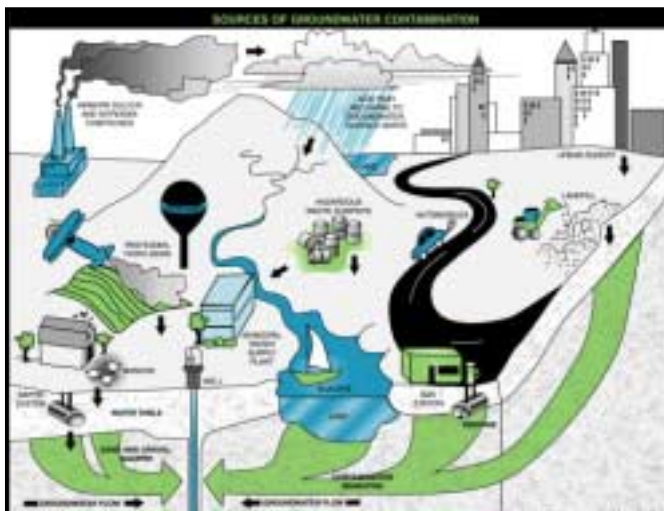
Το υπόγειο νερό παρέχει :

- Το 22 % όλων των καταναλώσεων του γλυκού νερού.
- Το 34 % του νερού για γεωργική χρήση (κυρίως άρδευση)
- Το 40 % της κατανάλωσης των αποθεμάτων νερού από το κοινό
- Το 53 % του συνολικού πόσιμου νερού για όλο τον πληθυσμό
- Το 97 % του πόσιμου νερού για τον αγροτικό πληθυσμό

1.2 Η ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

Εκτός όμως από την ποσότητα του υπόγειου νερό, ίσης ή και μεγαλύτερης σημασίας είναι η ποιότητα του υπόγειου νερού. Η ποιότητά του επηρεάζει όχι μόνο την υγεία, αλλά και την οικονομία και την κοινωνία. Η ρύπανση του υπογείου νερού επιδρά αρνητικά στην αξία της γης, στην οικονομική ανάπτυξη, στην εικόνα που παρουσιάζει η κοινωνία και στη συνολική ποιότητα της ζωής. Οι άνθρωποι χρειάζονται καθαρό νερό σε λογικό κόστος και σε πολλές περιοχές το υπόγειο νερό αποτελεί το μόνο διαθέσιμο οικονομικό πόρο. Όταν όμως ρυπανθεί, η επεξεργασία του είναι συνήθως πολύ δύσκολη και ακριβή.

Οι ρυπαντές του υπόγειου νερού μπορεί να είναι μερικοί από του ρυπαντές των επιφανειακών υδάτων, οι οποίοι από την επιφάνεια έχουν τη δυνατότητα να κινηθούν μέσω του εδάφους και να καταλήξουν στο υπόγειο νερό. Για παράδειγμα, εντομοκτόνα και λιπάσματα συσσωρεύονται στα αποθέματα του υπογείου



Εικόνα 1-3 Η ρύπανση του υπόγειου νερού
(www.groundwater.com)

νερού εδώ και χρόνια. Αλάτι από τους δρόμους (για να μην παγώνουν), τοξικά σκευάσματα από μεταλλεία, και χρησιμοποιημένα λάδια μηχανών καταλήγουν και αυτά στα υπόγεια νερά. Ακόμα είναι πιθανό, ανεπεξέργαστα απόβλητα από σηπτικές δεξαμενές, τοξικά χημικά και πετρελαιοειδή από υπόγειες δεξαμενές να ρυπάνουν το υπόγειο νερό (Εικόνα 1-3).

1.3 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Η πόση αλλά και γενικά η χρήση ρυπασμένου υπογείου νερού, μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στην υγεία. Ασθένειες όπως η ηπατίτιδα και η δυσεντερία προκαλούνται από υπόγειο νερό ρυπασμένο από απόβλητα σηπτικών δεξαμενών. Ακόμα δηλητηριάσεις αλλά και σοβαρότερες ασθένειες όπως λευχαιμία, μέχρι και καρκίνος έχουν συνδεθεί με την χρήση υπογείου νερού ρυπασμένου με τοξίνες και διάφορα άλλα χημικά ή πετρελαιοειδή, όπως για παράδειγμα το εξασθενές χρώμιο (Cr^{+6}), και το BTEX (Βενζόλιο, Τολουόλιο, Αιθυλοβενζόλιο, Ξυλόλια) .

Η ρύπανση του υπόγειου νερού δεν αποτελεί απειλή μόνο για το πόσιμο νερό που αντλείται από τα πηγάδια. Επειδή μέρος του εξατμίζεται μέσα από το έδαφος, οι ατμοί του μπορούν να προκαλέσουν πολλά προβλήματα υγείας, ιδιαίτερα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Το υπόγειο νερό κινείται σχετικά αργά με αποτέλεσμα να περάσει καιρός μέχρι να εμφανιστούν τα διάφορα προβλήματα. Εξαιτίας αυτού και επειδή είναι δύσκολο (αν όχι αδύνατο) να εξυγιανθεί ένας ρυπασμένος υδροφορέας, είναι προτιμότερο να προληφθεί η ρύπανση. Έτσι οι υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης θα πρέπει να κατασκευάζονται έτσι ώστε να προστατεύονται από τη διάβρωση, οι χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων να φτιάχνονται με τέτοιο τρόπο και σε τοποθεσίες όπου τα στραγγίσματα δε θα ρυπαίνουν το υπόγειο νερό, και να απαγορευθεί η ανεξέλεγκτη απόρριψη τοξικών αποβλήτων στο έδαφος.

2.ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Τα μοντέλα των υπογείων υδάτων (www.michigan.gov) περιλαμβάνουν τα μοντέλα ροής (Groundwater flow models) και τα μοντέλα τύχης και μεταφοράς των ρυπαντών (Fate and Transport models).

2.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Τα μοντέλα ροής χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ταχύτητας ή της πυκνότητας ροής (flux) και της κατεύθυνσης του υπογείου νερού μέσα σε υδροφορείς. Αυτοί οι υπολογισμοί αναφέρονται ως προσομοιώσεις. Η προσομοίωση της ροής του υπογείου νερού απαιτεί μια εις βάθος γνώση των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών της περιοχής. Η υδρογεωλογική έρευνα πρέπει να περιλαμβάνει ένα πλήρη χαρακτηρισμό των παρακάτω :

- Έκταση και πάχος των υδροφορέων και των άλλων μονάδων που περιέχουν νερό
- Υδρολογικά όρια (αναφέρονται και ως οριακές συνθήκες ροής – boundary conditions for flow), τα οποία ελέγχουν το ρυθμό και την κατεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού
- Υδρολογικές ιδιότητες των υδροφορέων και των άλλων μονάδων που περιέχουν νερό
- Μια περιγραφή της οριζόντιας και της κατακόρυφης κατανομής των υδραυλικών υψών σε όλη την περιοχή της μοντελοποίησης, στην αρχή (αρχικές συνθήκες - initial conditions), στην ισορροπία (σταθερή ροή – steady state), αλλά και σε μεταβατικές συνθήκες όπου τα υδραυλικά ύψη μεταβάλλονται με το χρόνο (transient conditions) και
- Την κατανομή και το μέγεθος του εμπλουτισμού του υπόγειου νερού, την άντληση ή την διοχέτευση νερού, τη διαρροή από ή προς επιφανειακά σώματα νερού. Αυτά τα φορτία μπορεί να είναι σταθερά ή να μεταβάλλονται με το χρόνο.

Η έξοδος των προσομοιώσεων των μοντέλων (output) είναι τα υδραυλικά ύψη και η ταχύτητα του υπογείου νερού, σε ισορροπία με τις υδρογεωλογικές συνθήκες. Για τη βελτίωση της ακρίβειας των μοντέλων και τη μείωση της διαφοράς μεταξύ των δεδομένων του πεδίου και των προσομοιώσεων των μοντέλων ,οι τιμές των υδρογεωλογικών συνθηκών μεταβάλλονται μέχρι να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός (βαθμονόμηση, επαλήθευση).

2.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΧΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΡΥΠΑΝΤΩΝ

Τα μοντέλα τύχης και μεταφοράς προσομοιώνουν την κίνηση και τη μετατροπή των ρυπαντών, καθώς κινούνται με το υπόγειο νερό μέσα στο υπόδαφος. Αυτά τα μοντέλα απαιτούν την ανάπτυξη ενός βαθμονομημένου μοντέλου ροής υπογείου νερού, ή κατ' ελάχιστο έναν ακριβή προσδιορισμό της ταχύτητας και της κατεύθυνσης ροής του υπογείου νερού. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των παρακάτω διεργασιών :

- Κίνηση των ρυπαντών λόγω συμμεταφοράς και διάχυσης,
- Εξάπλωση και διάλυση των ρυπαντών λόγω διασποράς
- Απομάκρυνση ή απελευθέρωση ρυπαντών λόγω ρόφησης ή εκρόφησης, σε ή από, ιζήματα ή πετρώματα,
- Χημικούς ,φυσικούς ή βιολογικούς μετασχηματισμούς των ρυπαντών

Εκτός από την υδρογεωλογική έρευνα η προσομοίωση αυτών των μοντέλων απαιτεί το χαρακτηρισμό των παρακάτω :

- Την οριζόντια και κατακόρυφη κατανομή της μέσης γραμμικής ταχύτητας του υπογείου νερού
- Την αρχική κατανομή και τις οριακές συνθήκες του ρυπαντή
- Τη θέση, το ιστορικό και το ρυθμό της φόρτισης της μάζας των πηγών και των καταβόθρων

- Το πορώδες και την αντιπροσωπευτική πυκνότητα του εδάφους
- Το συντελεστή κατανομής οκτανόλης – νερού
- Την πυκνότητα και το ιξώδες του υγρού
- Το συντελεστή διάχυσης και τους συντελεστές διασποράς
- Τις σταθερές αποδόμησης και την κινητικής των αντιδράσεων
- Την αρχική κατανομή των δεκτών ηλεκτρονίων ,αν υπάρχει

Η έξοδος των προσομοιώσεων των μοντέλων (output) είναι οι συγκεντρώσεις των ρυπαντών ,οι οποίες είναι σε ισορροπία με το σύστημα ροής του υπόγειου νερού και με τις γεωχημικές συνθήκες της περιοχής.

Όπως και με τα μοντέλα ροής, έτσι και αυτά τα μοντέλα χρειάζονται βαθμονόμηση και επαλήθευση, για τη βελτίωση της ακρίβειας των μοντέλων και τη μείωση της διαφοράς μεταξύ των δεδομένων του πεδίου και των προσομοιώσεων των μοντέλων.

Τέλος, τα μοντέλα τύχης και μεταφοράς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη των συγκεντρώσεων των ρυπαντών στο υπόγειο νερό, ως αποτέλεσμα εφαρμογής συστημάτων εξυγίανσης υδροφορέων και υπογείου νερού. Η παρακολούθηση των υδραυλικών υψών και της χημείας του υπογείου νερού είναι απαραίτητη για τη στήριξη των προσομοιώσεων πρόβλεψης.

2.3 ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΡΥΠΑΝΤΩΝ

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις διεργασίες της ροής του υπόγειου νερού και της τύχης – μεταφοράς των ρυπαντών, μπορούν να λυθούν με διαφορετικούς τύπους μοντέλων. Ορισμένα μοντέλα μπορεί να είναι ακριβείς λύσεις των εξισώσεων που περιγράφουν απλές συνθήκες ροής και μεταφοράς (αναλυτικά μοντέλα), και άλλα μπορεί να είναι προσεγγίσεις εξισώσεων που περιγράφουν πολύπλοκες συνθήκες (αριθμητικά μοντέλα).

2.3.1 Αναλυτικά Μοντέλα

Τα αναλυτικά μοντέλα αποτελούν μια ακριβή λύση μιας ορισμένης, απλοποιημένης εξίσωσης ροής υπόγειου νερού ή μεταφοράς των ρυπαντών. Η εξίσωση αυτή είναι η απλοποίηση πιο πολύπλοκων εξισώσεων ροής υπόγειου νερού ή μεταφοράς των ρυπαντών.

Πριν από την ανάπτυξη και την ευρεία διάδοση των υπολογιστών υπήρχε η ανάγκη να απλοποιηθούν οι τρισδιάστατες εξισώσεις επειδή δεν ήταν δυνατόν να λυθούν εύκολα. Πιο συγκεκριμένα, αυτές οι απλοποιήσεις οδήγησαν στη μείωση της ροής του υπόγειου νερού σε μια διάσταση και την εξίσωση της μεταφοράς των ρυπαντών σε μια ή δύο διαστάσεις. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να αλλάξουν οι εξισώσεις των μοντέλων και να περιλαμβάνουν ομοιόμορφη μονοδιάστατη ροή υπογείου νερού, απλή ομοιόμορφη γεωμετρία των υδροφορέων, ομογενείς και ισότροπους υδροφορείς, ομοιόμορφες υδραυλικές και χημικές ιδιότητες, και απλές οριακές συνθήκες για ροή και χημικές αντιδράσεις.

Τα αναλυτικά μοντέλα δουλεύουν συνήθως σε σταθερές συνθήκες και μονοδιάστατα, αν και ορισμένα μοντέλα είναι δισδιάστατα (π.χ. analytical element models). Τα μοντέλα της υδραυλικής των πηγαδιών, όπως αυτά του Theis ή του Neumann, είναι παραδείγματα αναλυτικών μονοδιάστατων μοντέλων ροής υπογείου νερού.

Εξαιτίας των απλοποιήσεων που γίνονται στα αναλυτικά μοντέλα, δεν είναι δυνατόν να ερμηνεύσουν συνθήκες στο πεδίο που μεταβάλλονται στο χώρο ή το χρόνο. Αυτό περιλαμβάνει μεταβολές στη ροή ή τη διεύθυνση του υπόγειου νερού, μεταβολές στις υδραυλικές ή χημικές ιδιότητες, αλλαγή στα υδραυλικά φορτία, ή πολύπλοκες υδρογεωλογικές και χημικές οριακές συνθήκες.

2.3.2 Αριθμητικά Μοντέλα

Τα αριθμητικά μοντέλα (numerical models) είναι ικανά να λύνουν τις πιο πολύπλοκες εξισώσεις που περιγράφουν την ροή του υπόγειου νερού και τη μεταφορά μάζας. Αυτές οι εξισώσεις γενικά περιγράφουν πολυδιάστατη ροή

υπογείου νερού, μεταφορά μάζας, και χημικές αντιδράσεις , αν και υπάρχουν μονοδιάστατα αριθμητικά μοντέλα.

2.3.2.1 Κατηγοριοποίηση των Αριθμητικών Μοντέλων με βάση τις χωρο-χρονικές τους διαστάσεις.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την κατηγοριοποίηση των αριθμητικών μοντέλων (Anderson and Woessner,1992). Τα μοντέλα αυτά μπορούν να λειτουργούν είτε σε μεταβατικές είτε σε σταθερές συνθήκες, να αναφέρονται σε ελεύθερους ή περιορισμένους υδροφορείς, και να λαμβάνουν υπ' όψιν τους μία, δύο ή τρεις διαστάσεις. Με βάση τις χωρικές διαστάσεις χωρίζονται σε δισδιάστατα στο οριζόντιο επίπεδο (two-dimensional areal), δισδιάστατα στο κάθετο επίπεδο (two-dimensional profile), ημι-τρισδιάστατα (quasi-tree-dimensional) και τρισδιάστατα (full-tree-dimensional).

Τα δισδιάστατα στο οριζόντιο επίπεδο και ημι-τρισδιάστατα μοντέλα βασίζονται στο σύστημα υδροφορέα (aquifer viewpoint). Δηλαδή κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, γίνεται χαρακτηρισμός των υδροφορέων και δεν υπολογίζονται τα υδραυλικά ύψη στα αδιαπέρατα στρώματα που χωρίζουν τους υδροφορείς. Η ροή του υπογείου νερού θεωρείται αυστηρά οριζόντια μέσα στους υδροφορείς και αυστηρά κάθετη διαμέσου των διαχωριστικών στρωμάτων. Αυτή η θεώρηση εφαρμόζεται στην ανάλυση ροής γύρω από πηγάδια άντλησης και αποτελεί την βάση για πολλές αναλυτικές λύσεις συμπεριλαμβανομένων και αυτών του Thiem, Theis, Jacob.

Αντίθετα τα δισδιάστατα στο κάθετο επίπεδο και τα τρισδιάστατα μοντέλα βασίζονται στο σύστημα ροής (flow viewpoint), δηλαδή δεν γίνεται χαρακτηρισμός των υδροφορέων και των αδιαπέρατων στρωμάτων αλλά κατασκευάζεται η τρισδιάστατη κατανομή των υδραυλικών υψών, των αγωγιμοτήτων και των ιδιοτήτων αποθήκευσης σε όλο το σύστημα.

2.3.2.2 Μέθοδοι των Αριθμητικών Μοντέλων

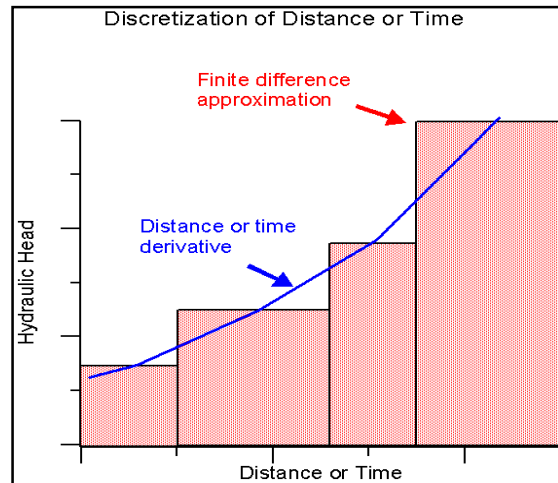
Η προσέγγιση που χρησιμοποιείται από όλες τις αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων είναι η διαίρεση του υλικού ή μέσου σε μικρότερα μαθηματικά και φυσικά τμήματα, (στοιχεία), ο υπολογισμός της συνεισφοράς κάθε τμήματος στο πρόβλημα σε διακριτές χρονικές στιγμές και η υπέρθεση των επιμέρους επιδράσεων για την προσέγγιση της συμπεριφοράς του συνολικού τμήματος. Οποιαδήποτε διαδικασία και αν ακολουθηθεί, αυτή συνήθως καταλήγει στην επίλυση ενός γραμμικού (σπανιότερα μη γραμμικού) συστήματος εξισώσεων του οποίου το μέγεθος εξαρτάται από τον τρόπο διαίρεσης του αρχικού πεδίου και από τον επιθυμητό βαθμό ακρίβειας κατά την επίλυση του προβλήματος.

Κάθε μέθοδος έχει ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όσον αφορά την εφαρμογή της σε συγκεκριμένο πρόβλημα. Χαρακτηριστικά αναφέρονται μερικές τέτοιες αριθμητικές μέθοδοι :

- Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method)
- Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method)
- Μέθοδος των συνοριακών στοιχείων(boundary element method)
- Μέθοδος των διακεκριμένων στοιχείων (distinct element method)
- Υβριδικές μέθοδοι (hybrid method), που συνδυάζουν χαρακτηριστικά από δύο ή περισσότερες μεθόδους.

Τα αριθμητικά μοντέλα συχνότερα χρησιμοποιούν προσεγγίσεις όπως αυτή των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements) ή αυτή των πεπερασμένων διαφορών (finite difference), ή και συνδυασμούς μεθόδων για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την ροή του υπόγειου νερού και τη μεταφορά μάζας. Οι προσεγγίσεις αυτές απαιτούν τη διακριτοποίηση τόσο του χώρου, όσο και του χρόνου.

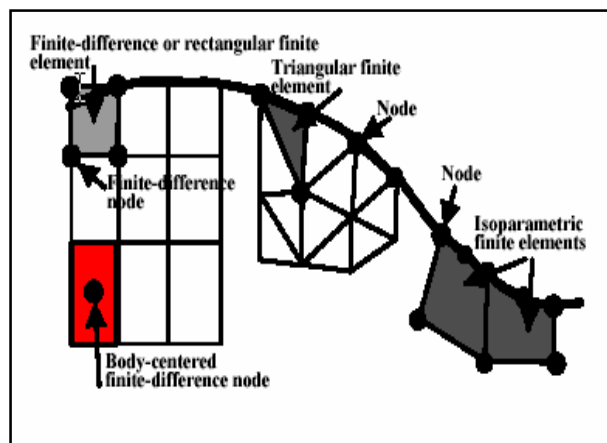
Σε αυτή τη διαδικασία της διακριτοποίησης, ο χώρος παρουσιάζεται σαν ένα δίκτυο κελιών πλέγματος (πεπερασμένες διαφορές), ή στοιχείων, και ο χρόνος της προσομοίωσης σαν χρονικά βήματα (time steps). Ένα απλό γραφικό παράδειγμα διακριτοποίησης παρουσιάζεται στη διπλανή εικόνα. Η καμπύλη αντιπροσωπεύει την συνεχή αλλαγή μιας παραμέτρου στο χώρο ή το χρόνο. Οι στήλες αντιπροσωπεύουν τη διακριτοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.



Εικόνα 2-1 Διακριτοποίηση χώρου ή χρόνου
(www.groundwater.com)

Ένα άλλο παράδειγμα που δείχνει τις διάφορες μορφές διακριτοποίησης του χώρου φαίνεται στη διπλανή εικόνα

Εικόνα 2-2 Διακριτοποίηση χώρου
(Pinder G.F, August 2001)



Η ακρίβεια των αριθμητικών μοντέλων εξαρτάται από την ακρίβεια των δεδομένων που εισάγονται στο μοντέλο, το μέγεθος της διακριτοποίησης του χώρου και του χρόνου (όσο μεγαλύτερο το μέγεθος των βημάτων της διακριτοποίησης, τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα του λάθους), και την αριθμητική μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου.

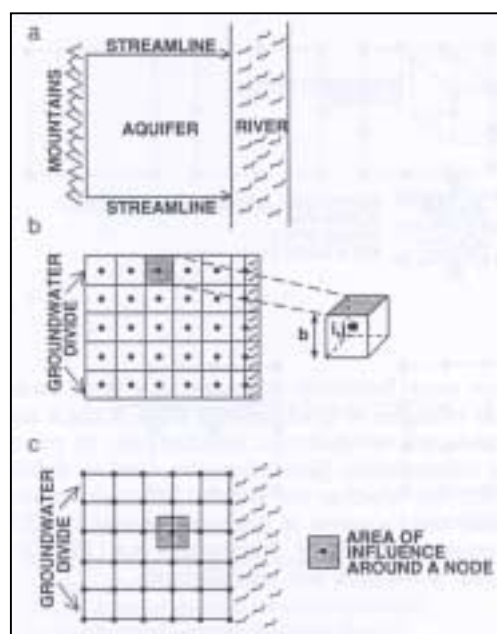
1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

Στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο ως το μέσο ύψος του κελιού που περιβάλλει τον κόμβο και δε λαμβάνονται υπ' όψιν οι μεταβολές του υδραυλικού ύψους του νερού από κόμβο σε κόμβο.

Υπάρχουν δύο είδη πλέγματος πεπερασμένων διαφορών: το *block-centered* πλέγμα (Εικόνα 2-1b) και το *mesh-centered* πλέγμα (Εικόνα 2-1c). Η διαφορά μεταξύ τους έγκειται στον τρόπο που χειρίζονται οι οριακές συνθήκες για πυκνότητα ροής. Στην προσέγγιση *block-centered* οι οριακές συνθήκες για πυκνότητα ροής εφαρμόζονται στην ακμή του κελιού. Στην προσέγγιση *mesh-centered* οι οριακές συνθήκες συμπίπτουν με τους κόμβους.

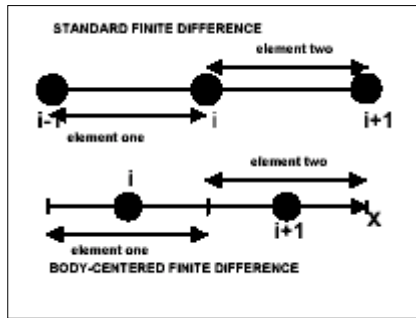
Εικόνα 2-3 Μέθοδος πεπερασμένων Διαφορών
(Anderson and Woessner, 1992).

- a) Περιοχή προσομοίωσης
- b) *Block-centered* δισδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων διαφορών
- c) *Mesh-centered* δισδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων διαφορών

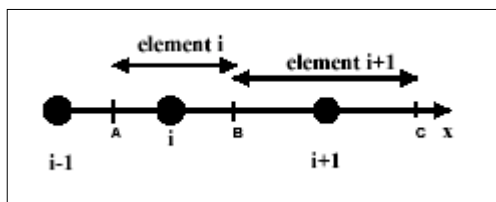


Εξίσωση Ροής Με Τη Μέθοδο Πεπερασμένων Διαφορών

Ο σχηματισμός της εξίσωσης της ροής με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών βασίζεται στην διακριτοποίηση που φαίνεται στις Εικόνες 2-4 και 2-5.



Εικόνα 2-4 Μονοδιάστατη διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών
(Pinder G.F, August 2001)



Εικόνα 2-5 Μονοδιάστατο πλέγμα στοιχείων διαφορετικού πλάτους
(Pinder G.F, August 2001)

Με αρχικές εξισώσεις τις εκφράσεις της πυκνότητας ροής (q) στα εσωτερικά όρια A και B

$$q_A = \left[-K_{xx} \frac{dh}{dx} \right]_A \cong -K_{xx}|_A \frac{h_i - h_{i=1}}{\Delta x_A}$$

$$q_B = \left[-K_{xx} \frac{dh}{dx} \right]_B \cong -K_{xx}|_B \frac{h_i - h_{i=1}}{\Delta x_B}$$

και την απόκλιση ταχύτητας ,

$$\frac{dq}{dx}|_i \cong \frac{q_B - q_A}{\Delta x_i}$$

με μαθηματικούς υπολογισμούς καταλήγουμε στην ακόλουθη μονοδιάστατη εξίσωση της ροής

$$\frac{-K|_B \frac{h_{i+1,n+1} - h_{i,n+1}}{\Delta x_B} + K|_A \frac{h_{i,n+1} - h_{i=1,n+1}}{\Delta x_A}}{\Delta x_i} = S_s \frac{h_{i,n+1} - h_{i,n}}{\Delta t}$$

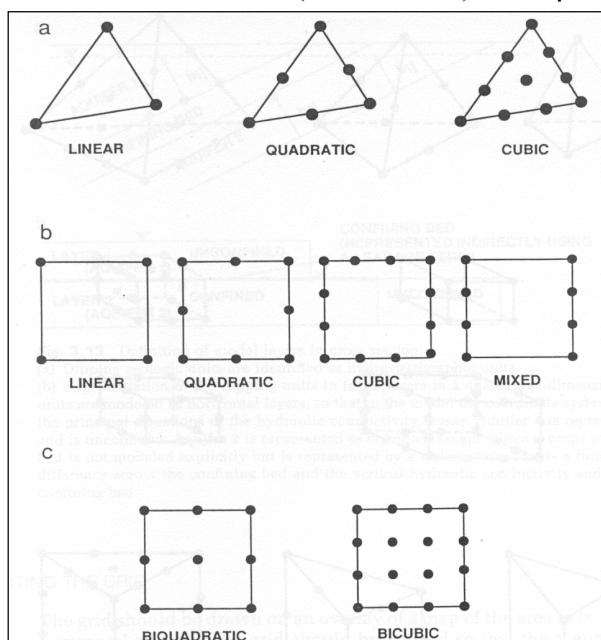
II. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στην μέθοδο αυτή ζητείται ο υπολογισμός των αγνώστων μεγεθών στους κόμβους, οι οποίοι δημιουργούνται από διαίρεση του πεδίου σε στοιχεία. Στην συνέχεια είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τιμή των μεγεθών αυτών σε κάθε σημείο του πεδίου με τη θεώρηση κατάλληλων συναρτήσεων που συνδέουν την κατανομή των μεγεθών στα εσωτερικά σημεία κάθε στοιχείου με τους κόμβους του στοιχείου αυτού.

Τα πεπερασμένα στοιχεία επιτρέπουν περισσότερη ελαστικότητα στο σχεδιασμό του πλέγματος. Χωρίζονται σε δισδιάστατα (Εικόνα 2-6) και τρισδιάστατα (Εικόνα 2-7).

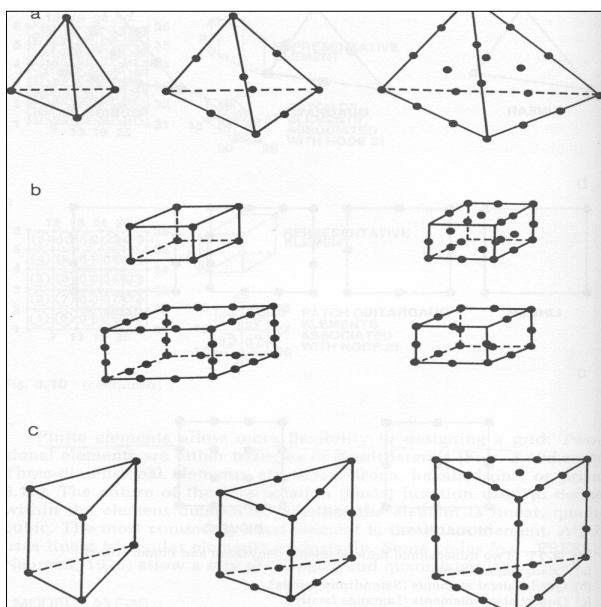
Εικόνα 2-6 Δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία (Huyakorn and Pinder, 1983)

- a) Τριγωνικά στοιχεία
- b) Τετράπλευρα στοιχεία
- c) Τετράπλευρα στοιχεία (Lagrange)



Εικόνα 2-7 Τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία (Huyakorn and Pinder, 1983)

- a) Τετράεδρα στοιχεία
- b) Εξάεδρα στοιχεία
- c) Πρίσματα



Εξίσωση Ροής Με Τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων

Με αρχικές εξισώσεις την έκφραση του υδραυλικού ύψους,

$$h(x, t) = \hat{h}(x, t) = \sum_{i=1}^r h(t)_i \varphi(x)_i$$

της ροής,

$$\nabla \cdot K \cdot \nabla \hat{h} - S_s \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} Q = R(x, t)$$

το υπόλοιπο $R(x, t)$,

$$\int_{\Omega} R(x, t) \varphi(x)_i d\Omega = 0, \quad i = 1, \dots, i$$

και της χρονικής παραγώγου με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών,

$$\left. \frac{\partial h(t_{n+1})}{\partial t} \right|_{x_i} = \frac{h_{n+1} - h_n}{\Delta t} \Big|_{x_i} + O(\Delta t)$$

καταλήγουμε στην ακόλουθη εξίσωση της ροής

$$\int_I \left[\left(K \frac{d}{dx} \sum_{j=1}^J h_{n+1,j} \varphi(x)_j \right) \frac{d}{dx} \varphi(x)_i - \left(S_s \sum_{j=1}^J \frac{h_{n+1,j} - h_{n,j}}{\Delta t} \varphi(x)_j + Q \varphi(x)_i \right) \right] dx$$
$$+ K \frac{\partial h}{\partial n} \varphi(x)_i \Big|_{x_0}^{x_i} = 0, i = 1, \dots, J$$

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

Πιο συγκεκριμένα, οι μέθοδοι των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών έχουν ορισμένες ομοιότητες αλλά και διαφορές. Οι μέθοδοι μοιάζουν στα παρακάτω :

1. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν μια προσέγγιση για τον υπολογισμό της συμπεριφοράς του υδροφόρου ορίζοντα , αν και ο τρόπος της προσέγγισης είναι διαφορετικός.
2. Οι λύσεις που δίνουν και οι δυο μέθοδοι για τη ροή του υπόγειου νερού είναι σχεδόν οι ίδιες.
3. Ο χρόνος επίλυσης είναι σχεδόν ο ίδιος .
4. Η δομή των δεδομένων εισόδου είναι βασικά η ίδια
5. Τα γραφικά που εξάγονται είναι παρόμοια

Οι μέθοδοι διαφέρουν στα παρακάτω σημεία :

1. Υπάρχει μια βασική διαφορά στη φιλοσοφία των δύο μεθόδων. Στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο ως το μέσο ύψος του κελιού που περιβάλλει τον κόμβο και δε λαμβάνονται υπ' όψιν οι μεταβολές του υδραυλικού ύψους του νερού από κόμβο σε κόμβο. Αντίθετα στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ορίζεται με ακρίβεια η μεταβολή του υδραυλικού ύψους μέσα σε κάθε στοιχείο με μεθόδους παρεμβολής. Τα ύψη υπολογίζονται στους κόμβους για ευκολία, αλλά προσδιορίζονται παντού.
2. Ο αριθμός των κόμβων στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι σημαντικά μικρότερος από τον αριθμό των κόμβων στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

3. Η προσαρμογή του πλέγματος στην περίπτωση που υπάρχουν σημειακές πηγές, όπως πηγάδια ή πηγές ρύπανσης γίνεται αυτόματα στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.
4. Η προσομοίωση της υδραυλικής κλίσης κοντά σε πηγές ή καταβόθρες, γίνεται ακριβέστερα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Anderson and Woessner, 1992), γιατί τα δεδομένα του νερού παίρνονται από κόμβους και όχι από περιοχές γύρω από κόμβους (δηλαδή από όλο το κελί στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών).
5. Ακανόνιστα όρια μπορούν ευκολότερα να προσεγγιστούν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων επειδή υπάρχει η δυνατότητα χρήσης τριγωνικών στοιχείων.
6. Στα μοντέλα των πεπερασμένων διαφορών υπάρχουν πακέτα που υποστηρίζουν και περιγράφουν υδρολογικές συνθήκες που συναντούνται συχνά.
7. Ο καθορισμός των οριακών συνθηκών, στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι πιο αφηρημένος από μαθηματική άποψη, ενώ τα μοντέλα με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών τείνουν να είναι πιο περιγραφικά όσον αφορά την υδρολογικά φαινόμενα
8. Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου είναι περισσότερα, αφού κάθε κόμβος και κάθε στοιχείο πρέπει να αριθμηθούν, και οι συντεταγμένες κάθε κόμβου αλλά και οι αριθμοί τους πρέπει να συνδεθούν με τα επηρεαζόμενα στοιχεία (Anderson and Woessner, 1992).

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ARGUS ONE GIS ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ PTC

3.1 ARGUS ONE GIS

Το Argus ONE GIS ([www.argusint.com/Ground Water.html](http://www.argusint.com/Ground_Water.html)), υποστηρίζει το μεγαλύτερο αριθμό μοντέλων υπογείων νερών που κυκλοφορούν σήμερα. Για επαγγελματίες υδρολόγους που χρησιμοποιούν τα δικά τους μοντέλα είναι πολύ εύκολο να αναπτύξουν τα δικά τους, βασισμένα σε GIS, μέσα αλληλεπίδρασης με το χρήστη, για τα μοντέλα τους (GUIs — Guided User Interface). Οι λόγοι αυτοί, το καθιστούν το ιδανικό περιβάλλον μοντελοποίησης, βασισμένο σε GIS, για τα υπόγεια νερά, αφού επιτρέπει την επίλυση σχεδόν κάθε τύπου προβλήματος χρησιμοποιώντας το ίδιο γραφικό μέσο αλληλεπίδρασης με το χρήστη.

Το Argus ONE GIS υποστηρίζει τα παρακάτω μοντέλα :

- **MODFLOW** – Τρισδιάστατο ,αποτελούμενο από υπομονάδες, μοντέλο πεπερασμένων διαφορών, για τη μοντελοποίηση ροής και μεταφοράς μάζας ,και τον υπολογισμό παραμέτρων
- **PTC** – (Princeton Transport Code) Τρισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και διαφορών για τη μοντελοποίηση ροής και μεταφοράς μάζας .Το μοντέλο είναι του George Pinder και το GUI του J.Olivares
- **NAPL**- Προσομοιώνει τη ρύπανση εδαφών και υδροφορέων από οργανικά υγρά που δεν αναμιγνύονται με το νερό. Το μοντέλο είναι του Joe Guarnaccia και το GUI του J.Olivares
- **SUTRA** - Τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων μεταφοράς μάζας και ενέργειας (USGS)
- **HST3D** - Τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων διαφορών μεταφοράς μάζας και θερμότητας (Model by the USGS, GUI by Richard Winston.)
- **FEMWATER**- Τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για ροή (G.T. Yeh, GUI by Wahyu Hardyanto.)

- **CFEST-Τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για ροή και μεταφορά (Model and GUI by CFEST Co.)**

Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο κώδικας PTC ο οποίος περιγράφεται στο ακόλουθο υποκεφάλαιο.

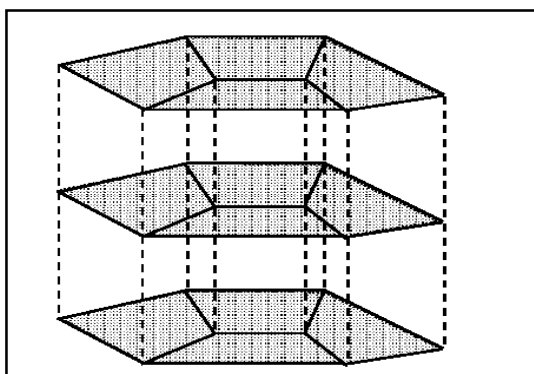
3.2 ΚΩΔΙΚΑΣ PTC

Ο κώδικας μεταφοράς του Πρίνστον “PTC” είναι το αποτέλεσμα της συμβολής πολλών μεμονωμένων κωδίκων. Ο κώδικας της δισδιάστατης ροής του υπόγειου ύδατος και μεταφοράς ρύπων αναπτύχθηκε αρχικά από τους G. F. Pinter και W.G Gray. Η επέκταση του κώδικα στο χώρο των τριών διαστάσεων πραγματοποιήθηκε από τον D. K. Babu, 1992 ο οποίος αντικατέστησε επίσης το τετράεδρο του Γκάους με αριθμητική ολοκλήρωση των βασικών συναρτήσεων.

Ο A.Niemi επανέκδωσε τον κώδικα και τον προσαρμοσε στο IBM-PC. Επί πρόσθετα, η ικανότητα οριακής συνθήκης και ο εσωτερικός έλεγχος της υπολογιζόμενης λύσης για ισορροπία μάζας ενσωματώθηκε από τον D.Ahlfeld. Ο S. Stothoff υλοποίησε την οδηγούμενη από τις εντολές δομή input/ output, εμπνευσμένος από μια παρόμοια δομή δημιουργημένη από τον R. Page, και ανέπτυξε την επαλήθευση των δεδομένων, την παραγωγή χρονικών βημάτων και τη σειρά εντολών για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων γραφικά. Ο R. Page έκανε επίσης πολυάριθμες τροποποιήσεις στους κώδικες για να βελτιώσει την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα του μοντέλου. Ο K.Yamada του Chiba Chigaku Ltd στην Ιαπωνία βρήκε πρόσφατα ενοχλητικά λάθη στους κώδικες και τα διόρθωσε.

Το PTC είναι γραμμένο σε FORTRAN 77. Είναι ένας υβριδικός κώδικας που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για την προσέγγιση του κάθετου προβλήματος, και τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για το οριζόντιο (δισδιάστατο) πρόβλημα. Έτσι, κάθε τρισδιάστατο στοιχείο είναι μια στήλη με τριγωνική διατομή. Για τον υπολογισμό των εξισώσεων της ροής και της μεταφοράς μάζας χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος διαχωρισμού. Πρώτα λύνονται τα οριζόντια στρώματα και μετά οι κάθετες γραμμές. Το απο-

τέλεσμα είναι μια πλήρης λύση σε τρεις διαστάσεις που επιτυγχάνεται χωρίς να πρέπει να λυθεί ο πίνακας που δημιουργείται από το τρισδιάστατο πλέγμα



Εικόνα 3-1 Αναπαράσταση τρισδιάστατου στοιχείου (Pinder G.F, August 2001)

3.2.1 Δεδομένα Εισαγωγής Και Θέματα Επαλήθευσης

A. Προσδιορισμός παραμέτρων

Για να λυθεί ένα πρόβλημα υπογείου ύδατος με κάποιο αριθμητικό κώδικα απαιτείται ο προσδιορισμός ειδικών παραμέτρων. Αυτοί οι παράμετροι είναι δυνατόν να προσδιοριστούν, στη θεωρία, είτε για κάθε κόμβο είτε για κάθε στοιχείο. Επειδή η αριθμητική λύση απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό φόρτο εργασίας όταν οι παράμετροι θεωρούνται σταθεροί σ' ένα στοιχείο, και καθώς όλες οι ολοκληρώσεις σε αυτόν τον κώδικα εκτελούνται αναλυτικά, θεωρείται ότι αυτοί οι παράμετροι προσδιορίζονται ως σταθερές σε κάθε κόμβο. Στην περίπτωση που ο χρήστης αποφασίσει να προσδιορίσει τις παραμέτρους σε κάθε κόμβο, ο κώδικας αυτομάτως υπολογίζει τους αριθμητικούς μέσους των τιμών σε κάθε στοιχείο και χρησιμοποιεί τον υπολογιζόμενο μέσο σαν το πραγματικό input δεδομένο.

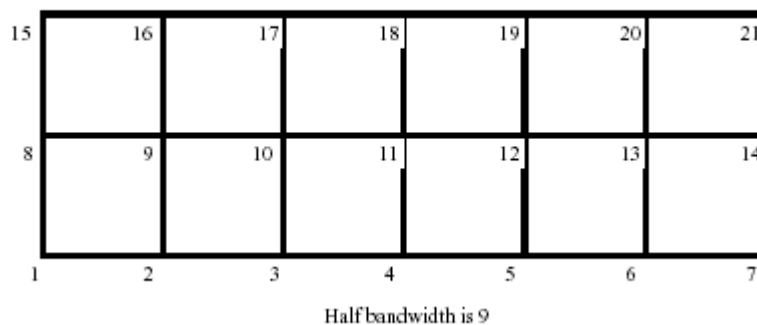
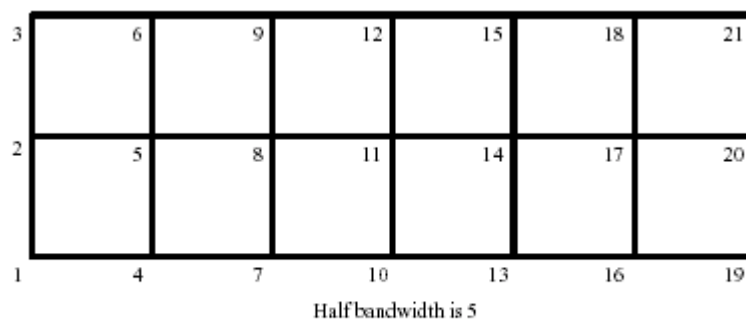
B. Αρίθμηση των Κόμβων

Μια προσεχτική εξέταση των εξισώσεων πεπερασμένων στοιχείων θα αποκαλύψει ότι ο συντελεστής με τη μορφή πίνακα που δημιουργείται από αυτές τις εξισώσεις θα έχει ταινιωτή δομή.

Το πλάτος της ταινίας των μη μηδενικών στοιχείων των πινάκων συντελεστών παίζει σημαντικό ρόλο στο μέγεθος του υπολογιστικού φόρτου που απαιτείται για τη λύση των εξισώσεων, και είναι σημαντικό να ελαχιστοποιεί-

ται αυτή η ποσότητα. Το πλάτος της ταινίας είναι μια συνάρτηση της μέγιστης διαφοράς μεταξύ των αριθμών των κόμβων που εμφανίζονται στο ίδιο στοιχείο. Προσδιορίζοντας τη χειρότερη διαφορά σαν τη μέγιστη διαφορά σε ολόκληρο το δίκτυο, το συνολικό πλάτος της ταινίας ισούται με ένα συν τη δύο φορές τη χειρότερη διαφορά και το μισό πλάτος ταινίας ισούται με ένα συν το χειρότερη διαφορά. Από την εμπειρία φαίνεται ότι το ελάχιστο πλάτος ταινίας επιτυγχάνεται αριθμώντας διαδοχικά στην διεύθυνση του μικρότερου αριθμού στοιχείων στο μοντέλου.

Για να απεικονιστεί αυτό το σημείο, δίνεται στην παρακάτω εικόνα ένα δίκτυο που αποτελείται από 12 στοιχεία και 21 κόμβους το οποίο αριθμείται με δύο τρόπους. Στην πρώτη περίπτωση η αρίθμηση στην διεύθυνση της μικρότερης διάστασης του δικτύου δίνει το μισό πλάτος ταινίας ίσον με πέντε. Στην δεύτερη περίπτωση η αρίθμηση στην διεύθυνση της μεγαλύτερης διάστασης του δικτύου δίνει το μισό πλάτος ταινίας ίσον με εννιά.



Εικόνα 3-2 Αρίθμηση κόμβων και πλάτος ταινίας (Babu D.K et al, June 1997)

Όταν χρησιμοποιείται η επιλογή της τυχαίας παραγωγής, η αρίθμηση των κόμβων αυξάνει κυκλικά στον άξονα X, ωστόσο μια εσωτερική αναρίθμηση εμφανίζεται έτσι ώστε το αποτέλεσμα της αρίθμησης να είναι το ευνοϊκότερο.

Γ. Έλεγχος λαθών του PTC

Ένας μεγάλος αριθμός πληροφοριών πρέπει να εισαχθούν στο PTC, και αναπόφευκτα πολλά μπορεί να είναι λανθασμένα ή να μην ορίζονται σωστά στα πρώτα στάδια δημιουργίας του μοντέλου. Είναι λοιπόν απαραίτητο να επαληθεύονται όλα τα δεδομένα που εισάγονται στο PTC. Το PTC βοηθά σε αυτό με λειτουργίες που ελέγχουν ορισμένα βασικά λάθη, όπως τα λάθη στα γραφικά και στην ισορροπία της μάζας.

3.2.2 Η Φιλοσοφία Των Input/ Output

Το PTC είναι ένα πακέτο που λειτουργεί με εντολές, και είναι αρκετά ευέλικτο στη δομή των input/ output. Η δομή input είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να αποτελεί μια γλώσσα προγραμματισμού από μόνη της, καθώς η χρήση του προγράμματος είναι δυνατόν να ποικίλει ευρέως ανάμεσα σε διαφορετικές εφαρμογές. Επομένως το PTC παρέχει σημαντικές ευκολίες στον καθορισμό του input και του απαιτούμενου output. Σημειώνεται ότι όλα τα output πρέπει να έχουν ζητηθεί: κανένα output δεν θα δοθεί αν δεν έχει πρώτα ζητηθεί.

3.2.3 Χρονική Πορεία Έλεγχου

Καθότι οι χρονικές κλίμακες, στην προσομοίωση της ροής και της μεταφοράς, είναι συχνά αρκετά διαφορετικές, το PTC διατηρεί δύο ξεχωριστές ομάδες παραμέτρων χρονικών βημάτων. Σε κάθε συγκεκριμένο σημείο του χρόνου, η μόνη πληροφορία που χρειάζεται για τον προσομοιωτή είναι το ακριβές μέγεθος του χρονικού βήματος. Καθότι το μέγεθος του χρονικού βήματος θα είναι άμεσα συσχετιζόμενο με την αλλαγή στην λύση κατά την διάρκεια του χρονικού βήματος, μπορούμε να βάλουμε μεγαλύτερα χρονικά βήματα καθώς η μεταβαλλόμενη συμπεριφορά εξασθενεί.

3.2.4 Βασικές Εξισώσεις Που Χρησιμοποιούνται Στο “PTC”

(Babu D.K et al, June 1997)

Το PTC χρησιμοποιεί τις παρακάτω μερικές διαφορικές εξισώσεις για να παρουσιάσει την κίνηση του υπόγειου ύδατος περιγραφόμενη από το υδραυλικό ύψος, h ,

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

(1)

από τις συνιστώσες της ταχύτητας του υπογείου ύδατος

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

(2)

και την μεταφορά ρύπων περιγραφόμενη από την συγκέντρωση, c ,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + Q(c^w - c) - \theta[1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned}$$

(3)

Οι παραπάνω εξισώσεις προέρχονται από τις αρχές διατήρησης μάζας και από τον νόμο του Darcy.

Η λύση των παραπάνω εξισώσεων ακολουθεί την εξής διαδικασία: αρχικά λύνεται η πρώτη εξίσωση (1) ως προς τα υδραυλικά ύψη, h , στην συνέχεια υπολογίζονται οι ταχύτητες του Darcy V_x , V_y , V_z , από τη σχέση (2) και τελικά λύνουμε την εξίσωση (3) ως προς τις συγκεντρώσεις των ρυπαντών, c .

I. ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΑΤΟΣ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

Βασική εξίσωση

Το PTC προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά του συστήματος του υπόγειου ύδατος επιλύνοντας ως προς το υδραυλικό ύψος την παρακάτω μερική διαφορική εξίσωση

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} \\ & + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

όπου, οι θεμελιώδεις μονάδες χαρακτηρίζονται ως μήκος [L], χρόνος [T], και μάζα [M].

h είναι το υδραυλικό ύψος [L]

K_{xx} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην x οριζόντια κατεύθυνση [LT^{-1}]

K_{yy} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην y οριζόντια κατεύθυνση [LT^{-1}]

K_{zz} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην z (κατακόρυφη) κατεύθυνση [LT^{-1}]

S είναι ο ειδικός συντελεστής αποθηκευτικότητας [L^{-1}]

Q_i είναι ο όρος της πηγής/ καταβόθρας στην περιοχή i [L^3T^{-1}] (π.χ. αντλίες, θετικές τιμές δηλώνουν έγχυση)

$\delta(\)$ είναι η Dirac συνάρτηση δέλτα

r είναι ο αριθμός των πηγών/ ταμιευτήρων

Για ευκολία, ο τελευταίος όρος στη σχέση (4) θα συντομευτεί ως Q .

Η βασική εξίσωση (4) λύνεται αριθμητικά από το PTC χρησιμοποιώντας τις μεθόδους των πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών.

II. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

Η εξίσωση μεταφοράς είναι:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\
 & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\
 & + Q(c^w - c) - \theta[1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Οι όροι της διασποράς στην εξίσωση (5) καθορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 D_{xx} &= (\alpha_L V_x^2 + \alpha_T V_y^2 + \alpha_V V_z^2) / V + D_M \\
 D_{yy} &= (\alpha_T V_x^2 + \alpha_L V_y^2 + \alpha_V V_z^2) / V + D_M \\
 D_{zz} &= (\alpha_V V_x^2 + \alpha_V V_y^2 + \alpha_L V_z^2) / V + D_M \\
 D_{yx} &= D_{xy} = \frac{(a_L - a_T) V_x V_y}{V} \\
 D_{yz} &= D_{zy} = \frac{(a_L - a_V) V_y V_z}{V} \\
 D_{zx} &= D_{xz} = \frac{(a_L - a_V) V_x V_z}{V}
 \end{aligned}$$

και οι εναπομείναντες όροι έχουν ως εξής:

D_M είναι ο μοριακός όρος διάχυσης, γενικά με μικρή τιμή [L^2/T]

α_L είναι η διαμήκης διασπορά [L]

α_T είναι η κατά πλάτος διασπορά [L]

α_V είναι η κατακόρυφη εγκάρσια διασπορά [L]

V είναι το μέγεθος του διανύσματος της ταχύτητας [L/T]

$$\left(V \equiv \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \right)$$

- c είναι η χημική συγκέντρωση στο σημείο (x, y, z) τη χρονική στιγμή t
 $[M/L^3]$
- θ είναι το πορώδες του υδροφορέα, αδιάστατος αριθμός
- $E(c)$ είναι ο όρος που αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες της χημικής προσρόφησης
- Q είναι η ισχύς άντλησης (πηγή/ καταβόθρα) $[1/T]$
 $Q \equiv Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i)$
- Q_i είναι ο ογκομετρικός ρυθμός έγχυσης/ αποφόρτισης $[L^3/T]$ στο σημείο
 (x_i, y_i, z_i)
- c^w είναι η συγκέντρωση του αντλούμενου υγρού στο σημείο (x_i, y_i, z_i)
- $\delta()$ είναι η Dirac συνάρτηση δέλτα

Σε όλες τις περιπτώσεις υποχώρησης με άντληση ($Q_i \leq 0$), θεωρούμε ότι η συγκέντρωση του (υγρού) ύδατος που απομακρύνεται c^w στην άντληση εξισώνει την συγκέντρωση c του ύδατος στο γύρω περιβάλλον. Έτσι, για όλες τις αντλίες αποφόρτισης ο όρος $Q(c^w - c) \equiv 0$ στη σχέση (5). Ο κώδικας συνεπώς διατηρεί τους όρους με Q στην (5) μόνο όταν υπάρχει αντλία να εκχύνει ($Q_i > 0$) την διαλυμένη ουσία, με τη συγκέντρωση c^w να αντιπροσωπεύει τη συγκέντρωση του υγρού που εκχύνεται.

3.2.5 Αλγόριθμος Επίλυσης PTC

Η λύση του συστήματος των εξισώσεων ροής και μάζας (1)-(3) για πολύπλοκα φυσικά συστήματα απαιτεί γενικά την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Για συστήματα πεδίου, ο υπολογιστικός φόρτος που απαιτείται για την αριθμητική διακριτοποίηση αυτών των τρισδιάστατων εξισώσεων είναι μεγάλος. Το PTC χρησιμοποιεί ένα μοναδικό αλγόριθμο διαχωρισμού για την επίλυση των τρισδιάστατων αυτών εξισώσεων, ο οποίος μειώνει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο.

Ο αλγόριθμος χωρίζει την περιοχή μελέτης σε ένα αριθμό σχεδόν παράλληλων οριζοντίων στρωμάτων. Μέσα σε κάθε στρώμα λαμβάνει χώρα διακριτοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Pinder and

Gray,1977) για την ακριβή αναπαράσταση των διαφορετικών χαρακτηριστικών της περιοχής. Τα στρώματα ενώνονται κάθετα με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Αυτό το υβριδικό πάντρεμα των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών δίνει την ευκαιρία στον αλγόριθμο να εφαρμόσει τις διαδικασίες διαχωρισμού των στρωμάτων. Κατά τη διάρκεια ενός ορισμένου χρόνου επανάληψης ,όλοι οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο όλες οι οριζόντιες διακριτοποιήσεις πεπερασμένων στοιχείων επιλύονται ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Στο δεύτερο στάδιο, επιλύονται όλες οι εξισώσεις που ενώνουν κάθετα τα στρώματα.

3.2.6 Οριακές Συνθήκες Ροής (Babu D.K et al,June 1997) and (Anderson and Woessner,1992).

Το PTC περιλαμβάνει τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση ροής. Οι τρεις τύποι είναι του Dirichlet (σταθερό υδραυλικό ύψος), του Neumann (σταθερή πυκνότητα ροής) και τρίτου τύπου (διαρροή) .Ο τρίτος τύπος καλείται ‘οριακές συνθήκες ροής εξαρτώμενες από το υδραυλικό ύψος’, (Cauchy ή μικτού τύπου). Οι οριακές συνθήκες μπορεί να αλλαχθούν από το χρήστη και κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Οι προκαθορισμένες οριακές συνθήκες για όλα τα όρια είναι μηδενική πυκνότητα ροής. Αυτό υπονοεί πως έχουμε περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατο πυθμένα και πλευρές. Επιλέγοντας διαφορετικές οριακές συνθήκες μέσα στην περιοχή, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες.

▪ Τύπος του Dirichlet (1^ο Είδος)

Είναι σημαντικό να αναγνωριστεί πως το όριο του καθορισμένου υδραυλικού ύψους αντιπροσωπεύει μια ατελείωτη πηγή νερού. Το σύστημα του υπογείου νερού μπορεί να αντλεί νερό από το όριο ή να παρέχει νερό στο όριο, χωρίς όμως να αλλάζει το καθορισμένο ύψος νερού στον κόμβο. Σε μερικές περιπτώσεις η αντίδραση αυτή του συστήματος δεν είναι ρεαλιστική. Ο τύπος του Dirichlet χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το όριο είναι μια λίμνη ή ένας ταμιευτήρας (σταθερό ύψος).

Σε δισδιάστατες προσομοιώσεις περιοχών, οι οριακοί κόμβοι σταθερού ύψους αντιπροσωπεύουν πλήρως διαπερνόντα σώματα νερού ή το κάθετα μέσο υδραυλικό ύψος του υδροφορέα στα υδραυλικά όρια.

Σε τρισδιάστατες προσομοιώσεις ή σε μοντέλα προφίλ, οι κόμβοι σταθερού ύψους συνήθως αντιπροσωπεύουν τον υδροφόρο ορίζοντα ή επιφανειακά σώματα νερού.

▪ Τύπος του Neumann(2^ο Είδος)

Οι συνθήκες καθορισμένης ροής χρησιμοποιούνται για την περιγραφή πυκνοτήτων ροής σε επιφανειακά σώματα νερού, πηγών ,υπόγειας ροής ή διαρροής από ή προς το αδιαπέρατο στρώμα που υπόκειται της μοντελοποιημένης περιοχής. Μπορούν ακόμα να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση υδραυλικών ορίων ορισμένα από πληροφορίες της τοπικής ροής του συστήματος. Όποτε είναι δυνατό, οι συνθήκες καθορισμένου ύψους προτιμούνται από τις συνθήκες καθορισμένης ροής, επειδή είναι ευκολότερο να μετρηθεί το υδραυλικό ύψος παρά η ροή. Επίσης οι συνθήκες καθορισμένου ύψους βοηθούν πολύ στη βαθμονόμηση των μοντέλων, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις είναι καλύτερο να χρησιμοποιηθούν συνθήκες καθορισμένης ροής. Για παράδειγμα, η ροή σε ένα σύστημα μπορεί να είναι σταθερή, ενώ τα ύψη κατά μήκος του ορίου να αλλάζουν στη διάρκεια της προσομοίωσης.

Σε μοντέλα πεπερασμένων διαφορών , οι συνθήκες καθορισμένης ροής προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας πηγάδια εμπλουτισμού ή άντλησης, για την προσθήκη ή απομάκρυνση νερού με τον καθορισμένο ρυθμό. Οι εισροές θεωρούνται όγκοι νερού που "τοποθετούνται" στα κελιά. Θεμελιωδώς, το νερό μπορεί να εισαχθεί στην κορυφή του κελιού σαν εισροή υπογείου νερού ή από τα πλάγια των κελιών σαν υπόγεια ροή. Η πυκνότητα ροής θεωρείται πως κατανέμεται ανομοιόμορφα στην επιφάνεια του κελιού

Σε μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, ο χρήστης ορίζει μια πυκνότητα ροής στο κομμάτι του ορίου που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο κόμβους.

Ορια μηδενικής ροής

Συνθήκες μηδενικής ροής συμβαίνουν όταν η πυκνότητα ροής διαμέσου του ορίου είναι μηδενική. Ένα όριο μηδενικής ροής αντιπροσωπεύει ένα αδιαπέρατο στρώμα, μια αδιαπέρατη διερρηγμένη ζώνη, στρωτή ροή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της διεπιφάνειας αλμυρού και γλυκού νερού σε παράκτιους υδροφορείς.

Στα περισσότερα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων γίνεται αυτόματα η θεώρηση ορίων μηδενικής ροής στις άκρες της περιοχής μελέτης. Ο χρήστης πρέπει να ενεργοποιήσει μια οριακή συνθήκη άλλου τύπου για να ακυρώσει τις συνθήκες μηδενικής ροής.

▪ Τύπος του Cauchy (3^ο Είδος)

Η πυκνότητα ροής διαμέσου αυτού του τύπου ορίου εξαρτάται από τη διαφορά μεταξύ του καθορισμένου από το χρήστη υδραυλικού ύψους στη μια μεριά του ορίου, και του υπολογισμένου από το μοντέλο υδραυλικού ύψους στην άλλη μεριά του ορίου. Η συμπεριφορά των εξαρτημένων, από το υδραυλικό ύψος, ροών στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων είναι παρόμοια, με τη διαφορά ότι στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών οι πυκνότητες ροής υπολογίζονται για τα κελιά, ενώ στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων στους κόμβους.

Η διαρροή από ή προς ένα ποτάμι, μια λίμνη, ή ταμιευτήρα μπορεί να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας συνθήκες τρίτου τύπου. Η πυκνότητα ροής ή ρυθμός διαρροής υπολογίζεται ως εξής :

$$L = \frac{Q_L}{A} = \frac{K'_z}{b' \cdot (h_{source} - h)}$$

όπου Q_L η ογκομετρική πυκνότητα ροής, A η επιφάνεια από την οποία γίνεται η διαρροή, h_{source} το ύψος του νερού στην πηγή (λίμνη, ποτάμι) και h το ύψος του νερού στον υδροφόρο αμέσως μετά ή δίπλα στην πηγή. Το K'_z είναι η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα της διεπιφάνειας που διαχωρίζει τον υδροφόρο από την πηγή, και b' το πάχος της διεπιφάνειας.

Ως συνθήκη τρίτου τύπου μπορεί να προσομοιωθεί και η εξατμισοδιαπνοή από τον υδροφόρο ορίζοντα, όπου η πυκνότητα ροής διαμέσου του ορίου είναι ανάλογη με το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα από την επιφάνεια του εδάφους.

Τέλος, ένα άλλο παράδειγμα ορίων εξαρτώμενων από το ύψος είναι η ροή σε ένα χαντάκι. Η διαρροή σε ένα χαντάκι προσομοιώνεται όποτε το h της παραπάνω εξίσωσης είναι μεγαλύτερο του h_{source} . Ο ρυθμός της διαρροής ισούται με μηδέν όταν το h είναι μικρότερο του h_{source} . Οι παράμετροι K'_z και b' αντιπροσωπεύουν τις ιδιότητες της διεπιφάνειας μεταξύ στο χαντάκι και τον υδροφορέα. Ένα χαντάκι μπορεί αντιπροσωπευθεί από συνθήκες πρώτου τύπου όταν το ύψος του νερού στον υδροφορέα δεν πέφτει ποτέ κάτω από το χαντάκι.

3.2.7 Οριακές Συνθήκες Ελεύθερης Επιφάνειας Ύδατος

Επιβολή οριακών συνθηκών ελεύθερης επιφάνειας νερού ή ελεύθερου υδροφορέα απαιτεί την εισαγωγή δύο οριακών συνθηκών εφαρμοσμένες στο επίπεδο του νερού στο πάνω στρώμα του σχηματισμού.

Η πρώτη οριακή συνθήκη εκφράζει πως το επίπεδο του νερού στο πάνω στρώμα (h_M) ορίζει το πάχος του υδροφορέα στο πάνω στρώμα ($z_{WT} - z_M$), όπου z_{WT} η πραγματική ανύψωση του νερού και z_M το ύψος του πυθμένα του πάνω στρώματος. Έτσι σε κάθε κόμβο απαιτούμε $(z_{WT})_i = (h_M)_i$

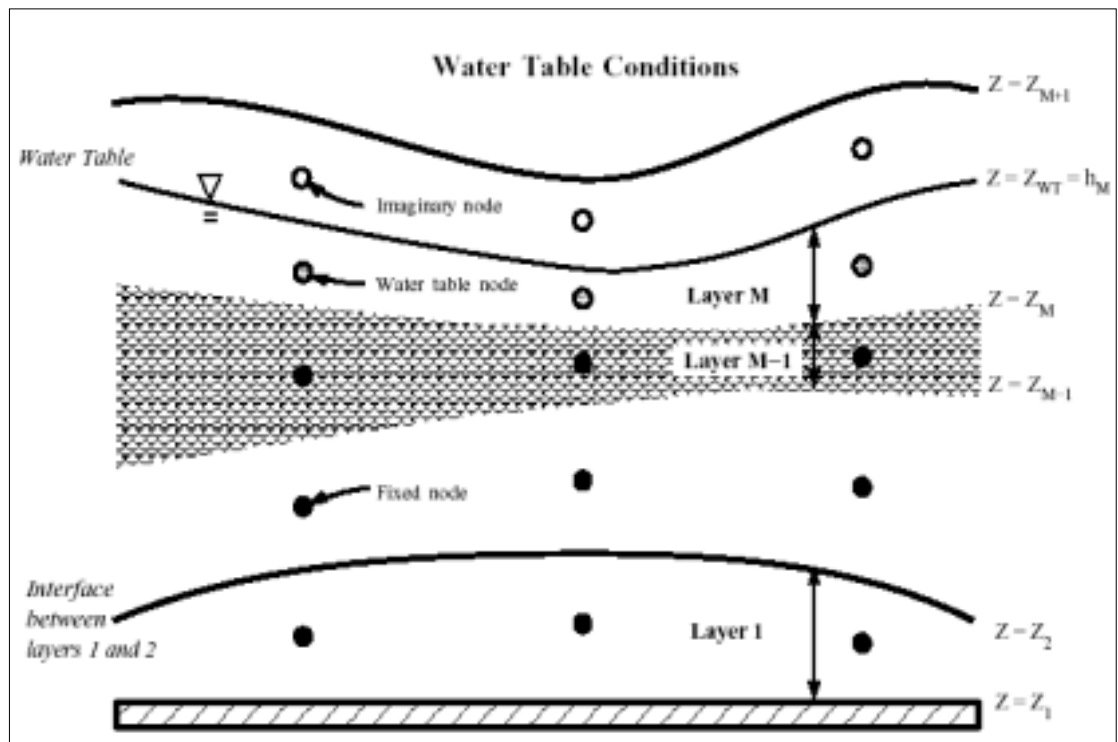
Στην παρούσα εργασία γίνεται η παραδοχή πως το επίπεδο του νερού βρίσκεται πάντα στο πάνω στρώμα ($k = M$). Για αυτό το λόγο όταν το πρόγραμμα υπολογίζει τα ύψη νερού στο πάνω στρώμα, ελέγχει αν οι τιμές του h_M στους κόμβους είναι μέσα στο εύρος των τιμών που δίνει η εξίσωση

$$z_M \leq h_M \leq z_{M+1}$$

όπου z_{M+1} το επάνω όριο της περιοχής ροής (επιφάνεια εδάφους), αλλά και αν ικανοποιούν τις αρχικές συνθήκες των υψών.

Η δεύτερη οριακή συνθήκη περιγράφει τη μεταβατική απόκριση της επιφάνειας του νερού στην διήθηση. Έστω S_y η ειδική απόδοση κοντά στο επίπεδο του νερού. Τότε οι εξισώσεις που σχετίζονται με αυτή την περίπτωση δίνονται από τη σχέση

$$S_y \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + K_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z} = R$$



Εικόνα 3-3 Συνθήκες Ελεύθερης Επιφάνειας Ύδατος
(Babu D.K et al, June 1997)

3.2.8 Ισοζύγιο Μάζας Ύδατος

Οι βασικές εξισώσεις της ροής του υπόγειου νερού ,που περιγράφηκαν προηγουμένως, βασίζονται εν μέρει στην αρχή διατήρησης της μάζας. Εξαιτίας όμως των προσεγγίσεων που γίνονται κατά τη λύση τους, δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί ακριβές ισοζύγιο μάζας. Παρόλα αυτά, η χωρική και χρονική διακριτοποίηση μπορούν να παράγουν ένα ικανοποιητικό ισοζύγιο μάζας. Το PTC παρέχει τη δυνατότητα να εκτελεστεί ένας έλεγχος ισοζυγίου μάζας, ο οποίος είναι ανεξάρτητος της λύσης των βασικών εξισώσεων. Αυτό επιτυγχάνεται με τον απευθείας υπολογισμό της πυκνότητας ροής της μάζας διαμέσου των ορίων και της αλλαγής της μάζας μέσα στην περιοχή του μοντέλου. Η καθαρή πυκνότητα ροής διαμέσου των ορίων πρέπει να είναι ίση με την αλλαγή της μάζας μέσα στην περιοχή, ώστε να ικανοποιείται το ισοζύγιο της μάζας

Το PTC υπολογίζει ένα ισοζύγιο όγκου ως υποκατάστατο του ισοζυγίου της μάζας. Οι δύο προσεγγίσεις είναι ισοδύναμες, καθώς η πυκνότητα του νερού θεωρείται σταθερή. Η αλλαγή του όγκου του νερού σε ένα κόμβο είναι ίση με την αλλαγή στο υδραυλικό ύψος στον κόμβο, πολλαπλασιασμένη με την έκταση που έχει σχέση με τον κόμβο (ισούται με το ένα τέταρτο της έκτασης του κάθε στοιχείου που συνορεύει με τον κόμβο), και με το συντελεστή αποθήκευσης που σχετίζεται με τον κόμβο. Το άθροισμα όλων αυτών των κομβικών αλλαγών στον όγκο είναι η συνολική αλλαγή στον όγκο.

Η ογκομετρική πυκνότητα ροής διαμέσου των ορίων αποτελείται από ένα αριθμό συνιστωσών. Αυτές περιλαμβάνουν ειδικές ογκομετρικές πυκνότητες ροής, είτε σαν όρια είτε σαν σημεία πηγαδιών, υπολογισμένες πυκνότητες ροής οι οποίες προκύπτουν από τη διαρροή από μονάδες νερού που συνορεύουν , και πυκνότητες ροής που σχετίζονται με ειδικά ύψη νερού σε κόμβους. Η εξίσωση των πεπερασμένων στοιχείων που σχετίζεται με ένα κόμβο περιέχει ένα όρο που περιγράφει την ογκομετρική πυκνότητα ροής σε αυτόν τον κόμβο. Αυτή η εξίσωση αποβάλλεται για κόμβους που καθορίζουν τα ύψη, όταν λύνονται οι εξισώσεις ροής. Με δεδομένη τη λύση των υδραυλικών υψών για όλη την περιοχή, αυτή η εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντικαταστήσει την πυκνότητα ροής που αφορά κόμβο που καθορίζει τα ύψη.

3.2.9 Ισοζύγιο Μάζας Ρυπαντών

Το PTC εκτελεί ένα ισοζύγιο μάζας στην υπολογισμένη από την επίλυση συγκέντρωση. Το ισοζύγιο μάζας πραγματοποιείται σχεδόν με τον ίδιο τρόπο που γίνεται και το ισοζύγιο για τη ροή.

Το νέο στοιχείο είναι ότι πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν τόσο η συμμεταφορά αλλά και η διασπορά στην πυκνότητα ροής της μάζας. Η πυκνότητα ροής λόγω συμμεταφοράς είναι απλά το γινόμενο της πυκνότητας ροής του ρευστού επί τη συγκέντρωση του ρυπαντή στο ρευστό. Η πυκνότητα ροής λόγω διασποράς εξάγεται από την οριακή πυκνότητα ροής λόγω διασποράς (Θεώρημα Green). Έτσι η πυκνότητα ροής λόγω διασποράς στους κόμβους μπορεί να υπολογιστεί βάσει των υπολογισμένων συγκεντρώσεων.

3.2.10 Οριακές Συνθήκες Μεταφοράς Μάζας

Το PTC επιδέχεται τον καθορισμό δύο ειδών οριακών συνθηκών στην εξίσωση μεταφοράς μάζας: καθορισμένη συγκέντρωση στους κόμβους και καθορισμένη πυκνότητα ροής λόγω συμμεταφοράς. Οι οριακές συνθήκες είναι μηδενική πυκνότητα ροής λόγω διασποράς στην κάθετη πλευρά των ορίων και μηδενική συνολική πυκνότητα ροής του ρυπαντή στην κορυφή και στο απώτατο σημείο των ορίων.

Οι καθορισμένες πυκνότητες ροής λόγω συμμεταφοράς ορίζονται με την υπόδειξη μιας συγκέντρωσης σχετιζόμενη με τις ογκομετρικές πυκνότητες ροής του ρευστού στο σημείο εισαγωγής δεδομένων του μοντέλου. Παρομοίως, η καθορισμένη πυκνότητα ροής λόγω συμμεταφοράς εισάγεται και έμμεσα από τη συγκέντρωση που σχετίζεται με τη διαρροή ρευστού στην τρίτου τύπου οριακή συνθήκη της ροής.

3.2.11 Προσομοίωση Προσρόφησης Ρυπαντών

Ο όρος προσρόφηση εφαρμόζεται όταν μέρος του ρυπαντή, που μεταφέρεται μέσω του κινούμενου ρευστού, προσκολλάται στα εδαφικά σωματίδια.

Τα στοιχεία που ακολουθούν προέρχονται από τους Geraghty and Miller (1979).

Θεωρείται πως η προσρόφηση συμβαίνει άμεσα, υπονοώντας πως η διαλυμένη ουσία στο ρευστό βρίσκεται σε ισορροπία με την προσροφημένη. Αυτό σημαίνει πως υπάρχει μια ισόθερμη προσρόφησης της μορφής

$$I = I(c)$$

Οι ακόλουθες επιλογές παρουσιάζονται στο μοντέλο

$$\text{Γραμμική ισόθερμη} \quad I = a_1 c$$

$$\text{Ισόθερμη Freundlich} \quad I = a_2 c^{a_3}$$

$$\text{Ισόθερμη Langmuir} \quad I = a_4 c / (1 + a_5 c)$$

Οι ισόθερμες σχετίζονται με τη συνάρτηση $E(c)$ της σχέσης (5), σελίδα 26 με την εξίσωση

$$E(c) = \frac{\rho}{\theta} \cdot \frac{dI(c)}{dc}$$

όπου θ το πορώδες και ρ η συνολική πυκνότητα. Το $I(c)$ εκφράζει τη μάζα του προσροφημένου υλικού και το $dI(c)/dc$ εκφράζει το συντελεστή κατανόμης. Περισσότερα στοιχεία για τις ισόθερμες μπορεί κανείς να βρει στο Perry's Chemical Engineering Handbook (1963)

Η γραμμική ισόθερμη

$$\frac{dI(c)}{dc} = a$$

$$a = \text{σταθερό}$$

είναι η απλούστερη περίπτωση από πλευρά υπολογισμών. Αυτό το είδος ισόθερμης χρησιμοποιείται συνήθως για τη μοντελοποίηση ραδιενεργών ουσιών

Η ισόθερμη του Freundlich

$$\frac{dI(c)}{dc} = \beta \cdot c^{\gamma} \quad \text{όπου } \beta, \gamma \text{ σταθερές}$$

χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση προσρόφησης αραιών διαλυμάτων με χαμηλές συγκεντρώσεις, για τη μοντελοποίηση προσρόφησης οργανικών χημικών και σε περιπτώσεις όπου η ταυτότητα της διαλυμένης ουσίας παραμένει άγνωστη. (Treybal,1968).

Η ισόθερμη του Langmuir είναι

$$\frac{dI(c)}{dc} = \frac{\mu \cdot \delta}{(1 + \delta \cdot c)^2} \quad \text{όπου } \mu, \delta \text{ σταθερές}$$

Το δ είναι η σταθερά ισορροπίας προσρόφησης, και το μ είναι η μάζα της προσροφημένης διαλυμένης ουσίας ανά μονάδα μάζας του προσροφητή όταν όλες οι ενεργές θέσεις για προσρόφηση έχουν καλυφθεί. Από τότε που ανακαλύφθηκε αυτή η ισόθερμη το 1916 έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πολλές διαδικασίες προσρόφησης λόγω της εύκολης προσαρμογής της (Smith,1970).

Ο κώδικας του PTC χρησιμοποιεί την ακόλουθη γενική αναλυτική έκφραση για την εκτίμηση του όρου της προσρόφησης.

$$E(c) = \frac{a \cdot c^{\beta}}{(1 + \gamma \cdot c)^2}$$

Από αυτή τη γενική μορφή εξάγονται και οι τρεις τύποι ισόθερμων, η γραμμική ($\beta = \gamma = 0$), του Freundlich ($\gamma = 0$), του Langmuir ($\beta = 0$). Ο χρήστης παρέχει τις τιμές των a , β και γ όταν έχει επιλέξει την προσρόφηση. Σημείωση- το a πρέπει να περιέχει την συνολική πυκνότητα όταν ορίζεται στα δεδομένα εισαγωγής του PTC!

4. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

Ο σκοπός της εξυγίανσης του υπόγειου νερού είναι η μείωση των συγκεντρώσεων των ρυπαντών, ή η ακινητοποίησή τους, ή η απομάκρυνσή τους ή η μετατροπή τους σε μια λιγότερη τοξική μορφή. Το είδος της τεχνολογίας που θα εφαρμοστεί, καθώς και η απόδοσή της εξαρτάται από τη φύση και το είδος των ρυπαντών. Οι ιδιότητες των ρυπαντών και η χημική τους δομή που επηρεάζουν την επεξεργασία, δεν περιλαμβάνουν μόνο τους χημικούς τύπους που είναι παρόντες στο υπόγειο νερό, αλλά και το εύρος των συγκεντρώσεων τους, την κατανομή τους σε διάφορες φάσεις και την προέλευσή τους.

Οι τεχνολογίες επεξεργασίας μπορούν να διαχωριστούν με βάση τις διεργασίες που χρησιμοποιούν. Έτσι χωρίζονται σε βιολογικές, χημικές, φυσικές, στερεοποίησης / σταθεροποίησης, και θερμικές.

Ένας δεύτερος διαχωρισμός τους είναι με βάση την τοποθεσία που εφαρμόζονται. Οι **ex situ** μέθοδοι αναφέρονται σε υπόγειο νερό που έχει αντληθεί, ενώ οι **in situ** μέθοδοι αναφέρονται στην επεξεργασία του υπόγειου ύδατος μέσα στον υδροφορέα. Οι **on site** τεχνικές είναι αυτές που εφαρμόζονται στο πεδίο ενώ οι **off site** τεχνικές επεξεργάζονται υπόγειο νερό που έχει απομακρυνθεί από το πεδίο (*ex situ*).

Μερικές από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την εξυγίανση του υπόγειου νερού είναι: (Bardos et al,2000)

1. Air sparging
2. Dual- Phase Extraction
3. Fluid / Vapor Extraction
4. In situ Bioremediation
5. Bioreactors
6. Permeable Reactive Barriers
7. Bio Slurping
8. Phytoremediation
9. Adsorption
10. Pump and Treat Systems

Οι μέθοδοι αυτοί περιγράφονται αναλυτικότερα στο Παράρτημα Ι

Ανάλογα με τη φύση του ρυπαντή του υπόγειου νερού χρησιμοποιείται και η κατάλληλη μέθοδος. Στον Πίνακα 4-1 που ακολουθεί δίνονται παραδείγματα τεχνολογιών κατάλληλων για την επεξεργασία διαφορετικών τύπων ρυπαντών.

Contaminants treated	Suitable Remediation Technologies
Groundwater, surface water and leachate	
VOCs	Air sparging; Dual-Phase Extraction; Fluid/Vapor Extraction; <i>In Situ</i> Bioremediation; Bioreactors; Permeable Reactive Barriers
SVOCs	<i>In situ</i> bioremediation; Bioslurping; Permeable Reactive Barriers; Phyto Remediation
Inorganic compounds	Adsorption; Permeable Reactive Barriers; Phytoremediation
Fuels	Air sparging; Dual-Phase Extraction; <i>In Situ</i> Bioremediation, Bioreactor; Bioslurping; Fluid /Vapor Extraction
Explosives	Bioreactor; Permeable Reactive Barriers; Phytoremediation

VOC= Volatile Organic Compounds; SVOC= Semi-Volatile Organic Compounds; SVE= Soil Vapor Extraction

Πίνακας 4-1 Παραδείγματα τεχνολογιών εξυγίανσης υπογείων υδάτων (US EPA, 1999)

Στην παρούσα μελέτη θα εξετάσουμε την *In situ* εξυγίανση υπογείων υδάτων με την Τεχνολογία των *Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων* και θα εφαρμόσουμε τα αποτελέσματα της διερεύνησης σε εφαρμογή πεδίου με ρύπανση από Υδρογονάνθρακες Πετρελαίου (BTEX) .

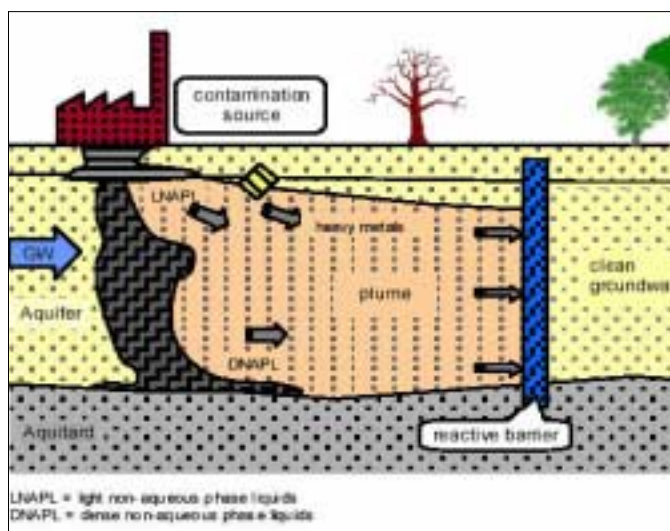
5. ΥΠΟΓΕΙΑ ΔΙΑΠΕΡΑΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ 'PERMEABLE REACTIVE BARRIERS'

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε πολυάριθμες τοποθεσίες με επικίνδυνα απόβλητα παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις σε μέταλλα, υδρογονάνθρακες πετρελαίου, αλογονωμένες οργανικές και ραδιενεργές ουσίες που ρυπαίνουν το υπόγειο νερό. Οι παραδοσιακές τεχνολογίες, όπως άντληση - και - επεξεργασία (pump-and-treat), απαιτούν μια εξωτερική πηγή ενέργειας, το κόστος τους είναι υψηλό, και δεν είναι αποτελεσματικές στην περίπτωση που οι ρυπαντές καθιζάνουν ή ροφούνται σε εδαφικά σωματίδια. Για αυτό το λόγο τα υπόγεια διαπερατά φράγματα (PRBs) γίνονται όλο και συχνότερα μια αποδοτικότερη οικονομικά εναλλακτική λύση. Ορθά σχεδιασμένα και τοποθετημένα, τα υπόγεια διαπερατά φράγματα μπορούν να μειώσουν τα επίπεδα πολλών ρυπαντών στα όρια που θέτει η νομοθεσία.

5.2 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Τα υπόγεια διαπερατά φράγματα (PRBs) είναι μια νέα τεχνολογία εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπογείου νερού. Αποτελούν μια *in situ* παθητική ζώνη επεξεργασίας που περιέχει αντιδρών υλικό, το οποίο αποδομεί, μετατρέπει ή ακινητοποιεί τους ρυπαντές καθώς το υπόγειο νερό ρέει δια μέσου της



(Εικόνα 5-1).

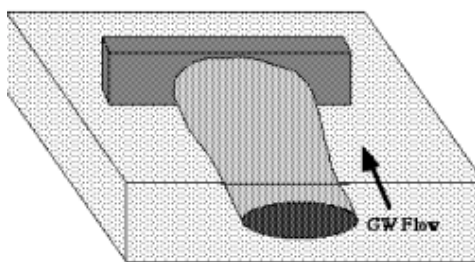
Εικόνα 5-1 Υπόγεια διαπερατά φράγματα
(Birke and Roehl, 2001)

Τοποθετούνται κάτω από το έδαφος ως μόνιμες ή αντικαταστάσιμες κατασκευές κάθετα στο μονοπάτι της ροής του ρυπασμένου πλούμιου και εκμεταλλεύονται την φυσική ροή του υπογείου νερού για την παθητική του εξυγίανση καθώς δεν απαιτείται καμία εξωτερική πηγή ενέργειας. Η θέση τους μπορεί να είναι μπροστά από το πλούμιο για την αποφυγή περαιτέρω αύξησής του, ή αμέσως κατάντη της πηγής ρύπανσης για την αποφυγή σχηματισμού πλούμιου ρυπαντών.

5.3 ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

1. Ενεργή Τάφρος Υψηλής Διαπερατότητας (Permeable reactive trench)

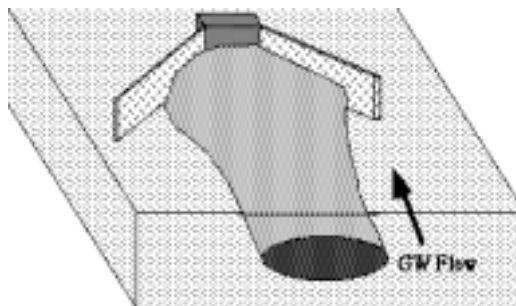
Αποτελεί την πιο απλή μορφή των υπογείων φραγμάτων όπου μια τάφρος, γεμισμένη με το κατάλληλο αντιδρών υλικό, τοποθετείται έτσι ώστε να καλύπτει όλο το εύρος του ρυπασμένου πλούμιου. Το ρυπασμένο πλούμιο κινείται λόγω της φυσικής κλίσης διαμέσου της τάφρου όπου και απορρυπαίνεται.



Εικόνα 5-2 Ενεργή τάφρος (Birke and Roehl, 2001)

2. Συστήματα Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων (Funnel and Gate)

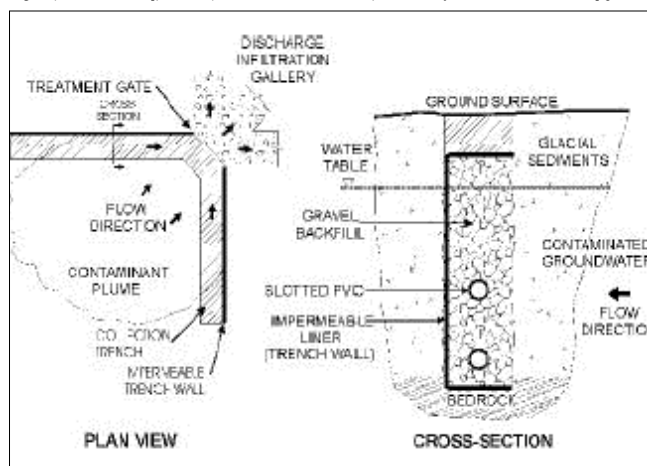
Είναι μια μέθοδος παθητικής εξυγίανσης που χρησιμοποιεί συγκλίνοντα φράγματα μικρής διαπερατότητας για την τροποποίηση της ροής του υπογείου νερού, έτσι ώστε αυτό να ρέει κυρίως διαμέσου κενών υψηλής διαπερατότητας όπου γίνεται η επεξεργασία των ρύπων, δηλαδή των διόδων. (Starr and Cherry, 1994). Ο τύπος αυτός θα αναλυθεί εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 6.



Εικόνα 5-3 Funnel and Gate (Birke and Roehl, 2001)

3.Συστήματα Τάφρου και Διόδου (Trench and Gate)

Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια τροποποίηση της μεθόδου *Funnel and Gate* και είναι κατάλληλη σε περιπτώσεις που το σύστημα εγκαθίσταται σε περιοχές με πολλή μικρή υδραυλική αγωγιμότητα. Η τροποποίηση περιλαμβάνει την πρόσθεση τάφρων αποστράγγισης υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας κατά μήκος του αδιαπέρατου φράγματος (ανάντη), (Εικόνα 5-4) και μια συστοιχία επαναδιήθησης στα κατάντη της διόδου. Έτσι μεγαλώνει η ζώνη εγκλεισμού του πλουμίου, αυξάνεται η αποστράγγιση της ρυπασμένης ζώνης και αποφεύγεται η κίνηση των ρυπαντών γύρω ή κάτω από τους αδιαπέρατους τοίχους.



Εικόνα 5-4 Trench and Gate
(Bowles W. Marc,1997)

5.4 ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΟΡΘΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ PRBS

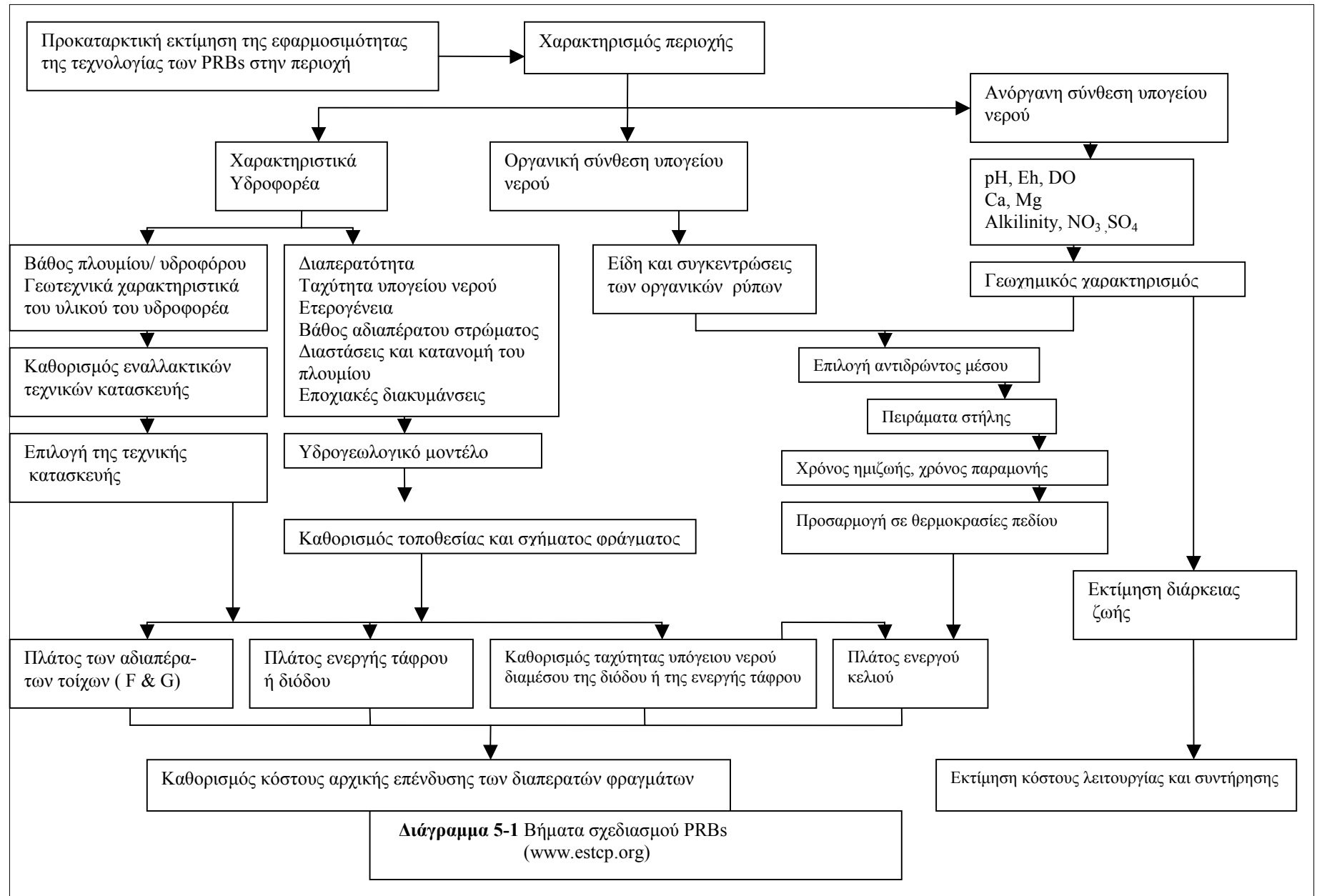
Τα δεδομένα που χρειάζονται είναι η υδραυλική κλίση, τα χαρακτηριστικά του ρυπαντή (το είδος ,ο ρυθμός αποδόμησής του ανάλογα με το αντιδρών μέσο, το βάθος στο οποίο βρίσκεται, η έκταση που καλύπτει και η συγκέντρωσή του), το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο υδροφόρος ορίζοντας συμπεριλαμβανομένων των διακυμάνσεων του, το βάθος στο οποίο βρίσκεται το αδιαπέρατο στρώμα στο οποίο θα θεμελιωθούν τα υπόγεια διαπερατά φράγματα και η στρωματογραφία της περιοχής.

Απαιτείται ακόμα η υδρολογία του υπόγειου νερού, η ποιότητα του νερού, ο ρυθμός της ροής, η κατεύθυνση της ροής, η διαπερατότητα του εδάφους και η ικανότητα εξισορρόπησης των αλλαγών του pH.

Με βάση το ρυθμό ροής διαμέσου του φράγματος και το ρυθμό αποδόμησής του ρυπαντή ανάλογα με το αντιδρών μέσο, προκύπτει ο απαιτούμενος

χρόνος παραμονής στη ζώνη επεξεργασίας για την επίτευξη των στόχων της εξυγίανσης, που με τη σειρά του οδηγεί στην επιλογή του πάχους της ζώνης επεξεργασίας. Για την επίτευξη αυτού απαιτούνται συγχρόνως εργαστηριακές δοκιμές και προσεκτικός χαρακτηρισμός την τοποθεσίας προς εξυγίανση.

Στο Διάγραμμα 5-1 περιγράφονται τα βήματα σχεδιασμού των υπόγειων διαπερατών φραγμάτων.



5.5 ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΩΝ PRBs (NATO/CCMS Pilot Study, 1998)

Η υδραυλική συμπεριφορά των δυο κυριότερων σχεδιαστικών τύπων των υπόγειων διαπερατών φραγμάτων- *Ενεργή Τάφρος Υψηλής Διαπερατότητας και Συγκλίνοντα Φράγματα & Δίοδος*- βασίζεται στην υδραυλική αγωγιμότητα όλης της κατασκευής. Συμπεριλαμβάνει δηλαδή την αγωγιμότητα των στρωμάτων που δρουν σαν φίλτρα και του ίδιου του αντιδρώντος μέσου. Η συνολική αγωγιμότητα του φράγματος πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια από την αγωγιμότητα του υδροφορέα. Ίσως, όμως, είναι ακόμα καλύτερο να επιλεγεί αγωγιμότητα 10 φορές μεγαλύτερη από την αγωγιμότητα του υδροφορέα, εξαιτίας των περιοριστικών παραγόντων οι οποίοι θα ελαττώσουν την αγωγιμότητα με το χρόνο.

Οι κύριοι αναμενόμενοι περιοριστικοί παράγοντες είναι οι ακόλουθοι:

- Εισροή και κατακάθιση λεπτόκοκκων εδαφικών σωματιδίων, τα οποία θα φράξουν τους πόρους του φράγματος και θα μειώσουν την αγωγιμότητα.
- Κατακρήμνιση ανθρακικών όπως ανθρακικό ασβέστιο ή μαγνήσιο, οξείδια ή υδροξείδια του σιδήρου, στο στρώμα που δρα σαν φίλτρο, ή στο αντιδρών μέσο.
- Ανεξέλεγκτη ανάπτυξη μικροοργανισμών (bio-clogging).
- Άλλοι, κυρίως μακροπρόθεσμοι ή άγνωστοι παράγοντες ,που ενδεχομένως θα ελαττώσουν την αγωγιμότητα.

Οι ακόλουθοι σχεδιαστικοί στόχοι αφορούν κυρίως τη χρήση ενεργού άνθρακα σαν πληρωτικό μέσο, αλλά οι περισσότεροι από αυτούς μπορούν να φανούν χρήσιμοι στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μονοσθενής σίδηρος ή άλλα υλικά ως αντιδρώντα μέσα.

Οι κύριοι σχεδιαστικοί στόχοι είναι :

- Η αποφυγή της εισροής λεπτόκοκκων εδαφικών σωματιδίων με την εγκατάσταση φίλτρων ανάμεσα στο πληρωτικό μέσο και το έδαφος, με βάση τα γνωστά κριτήρια για τα εδαφικά φίλτρα.

- Η αποφυγή των αλλαγών στις φυσικοχημικές ιδιότητες του υπόγειου νερού όπως στη θερμοκρασία, στην πίεση, στο pH, στο δυναμικό οξειδοαναγωγής, στα θρεπτικά, αφού πιθανώς θα προκαλέσουν την ανεξέλεγκτη ανάπτυξη μικροοργανισμών, ή την κατακρήμνιση μετάλλων.
- Ο σχεδιασμός ενός συστήματος στο φράγμα που θα επιτρέπει την απομάκρυνση και αντικατάσταση του μέσου επεξεργασίας μετά από μια περίοδο μερικών ετών ή δεκαετιών.
- Ο σχεδιασμός ενός συστήματος σωληνώσεων στο φράγμα που θα επιτρέπει την εισαγωγή νερού ή αέρα για την διάλυση των συσσωματωμάτων που έχουν σχηματιστεί ή για την ανάμιξη του πληρωτικού μέσου με ανατάραξη.
- Ο σχεδιασμός ανοιγμάτων για επιθεώρηση, απομάκρυνση ή δειγματοληψία του αντιδρώντος μέσου.

Η παραπάνω λίστα των στόχων σχεδιασμού μπορεί να μην εφαρμόζεται σε κάθε περίπτωση. Με βάση τις ιδιαιτερότητες και τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής, τη φύση της ρύπανσης, και το σκοπό της εξυγίανσης θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν πρόσθετοι στόχοι σχεδιασμού.

5.6 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΟΥ ΜΕΙΩΝΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ PRBs ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

Οι διεργασίες που επηρεάζουν την μακροχρόνια απόδοση των υπόγειων διαπερατών φραγμάτων είναι οι ακόλουθες (Birke and Roehl, 2001):

Επικάλυψη της επιφάνειας του αντιδρώντος υλικού από:

- ✎ Από καθιζήσεις δευτερευόντων ανόργανων μετάλλων
- ✎ Διάβρωση (“σκουριά”)

Φράξιμο των πόρων του αντιδρώντος υλικού από:

- ↗ Από καθιζήσεις δευτερευόντων ανόργανων μετάλλων
- ↗ Δημιουργία αερίων (H_2)
- ↗ Παραγωγή βιομάζας

Μείωση της αντιδραστικότητας

- ↗ Προερχόμενη από τη μείωση της ικανότητας ρόφησης του αντιδρώντος μέσου (Οριακή ικανότητα προσρόφησης)
- ↗ Από την διάλυση των αντιδρώντων υλικών

5.7 ΙΔΑΝΙΚΕΣ ΤΟΠΟΘΕΣΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Οι ιδανικές τοποθεσίες για την εγκατάσταση υπογείων διαπερατών φραγμάτων έχουν τα εξής χαρακτηριστικά

- Η ρύπανση είναι σε μικρό βάθος (μικρότερο των 15 m)
- Είναι σχετικά πορώδης
- Τα εδάφη είναι αμμώδη, αργιλώδη ή μίγματα άμμου- αργίλου. Η ετερογένεια της περιοχής δεν προκαλεί προβλήματα
- Κάτω από την περιοχή της ρύπανσης υπάρχει αδιαπέρατο στρώμα

5.8 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ / ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΩΝ PRBs (Striegel Jami et al, 2001)

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ PRBs

- Η in – situ εξυγίανση του ρυπασμένου εδάφους και υπογείου νερού γίνεται παθητικά με τη βοήθεια των φυσικών ιδιοτήτων ροής της περιοχής.
- Δεν απαιτείται ή καταναλώνεται εξωτερική ενέργεια.
- Η τοποθεσία μπορεί να χρησιμοποιείται παραγωγικά κατά τη διάρκεια της εξυγίανσης.
- Δεν απαιτούνται επίγειες κατασκευές εκτός από τα πηγάδια παρακολούθησης.
- Δεν απαιτείται ακριβής προσδιορισμός της πηγής ρύπανσης.
- Το σχέδιο ροής του υπογείου νερού στην περιοχή αλλάζει ελάχιστα
- Το κόστος επεξεργασίας του υπόγειου νερού είναι σχεδόν το $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$ του κόστους επεξεργασίας των συστημάτων άντληση - και - επεξεργασία (pump-and-treat). Το αρχικό κόστος μπορεί να είναι υψηλό λόγω της κατασκευής σε σχέση με ένα σύστημα pump-and-treat, αλλά κατά τη συνολική διάρκεια του έργου έχουμε σημαντική εξοικονόμηση χρημάτων λόγω μειωμένων λειτουργικών εξόδων, εξόδων συντήρησης και εξόδων παρακολούθησης.
- Είναι σχεδιασμένα για πολυετή λειτουργία χωρίς συντήρηση και λειτουργικά έξοδα (πιθανών να χρειαστεί αντικατάσταση του αντιδρώντος μέσου — Fe^0 κάθε 10 έως 20 χρόνια).
- Μπορούν να τροποποιηθούν ανάλογα με το ρυπαντή και το επιθυμητό επίπεδο επεξεργασίας.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ / ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

- Αυξημένο κόστος κατασκευής και εγκατάστασης.
- Με βάση τη σύγχρονη τεχνολογία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βάθη μέχρι τα 12 ή 15 m.
- Μπορεί να μειωθεί η διαπερατότητα τους εξαιτίας βιολογικής ή χημικής καθίζησης και να χρειαστεί συντήρηση ή και αντικατάσταση του αντιδρώντος μέσου.
- Απαιτείται λεπτομερής χαρακτηρισμός του πλουμίου των ρυπαντών.
- Το πλάτος τους πρέπει να υπερβαίνει σημαντικά το πλάτος του πλουμίου για την επίτευξη πλήρους εγκλεισμού του (Fitts, 1997).
- Αντιοικονομικά σε περιπτώσεις πλουμίων μεγάλου πλάτους (πάνω από 300 m).
- Αντιοικονομικά σε περιπτώσεις που απαιτείται μεγάλος όγκος αντιδρώντος υλικού.
- Δεν είναι αποδοτικά για πολύ μικρές ή πολύ μεγάλες ταχύτητες υπογείου νερού.
- Μπορεί να χρειαστεί έλεγχος του pH
- Είναι δύσκολο να κατασκευαστούν όταν υπάρχουν επιγειακές κατασκευές ή υπόγειες χρήσεις.
- Είναι δύσκολο (αλλά όχι αδύνατον) να κατασκευαστούν όταν είναι πολύ λεπτό το αδιαπέρατο στρώμα κάτω από αυτά (δεν ισχύει για τα φράγματα που δεν εκτείνονται σε όλο το βάθος του υδροφορέα).
- Είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν όταν η υπόγεια λιθολογία εμποδίζει την κατασκευή τους.

6. ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΔΩΝ

6.1 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Υπάρχουν δύο λόγοι που συνιστούν την προσθήκη των αδιαπέρατων φραγμάτων σ' ένα in situ παραπέτασμα αντιδραστηρίων. *Πρώτον*, αυξάνει το ποσό του ύδατος που ρέει μέσα από τη δίοδο, κάνοντας με αυτό τον τρόπο ευρύτερη τη ζώνη εγκλεισμού. Πέρα από την τοπική επιρροή του φράγματος, το πλάτος της ζώνης εγκλεισμού είναι ανάλογο με την εκροή από τη δίοδο. *Δεύτερον*, η παρουσία φράγματος δημιουργεί τη ζώνη εγκλεισμού κοντά σε αυτό, και ελέγχει ως ένα βαθμό τη θέση της ζώνης εγκλεισμού σχετικά με την δίοδο.

Όταν πρέπει να διαλέξει την διαμόρφωση ενός Συστήματος Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων, ο σχεδιαστής είναι απαραίτητο να ισορροπήσει διάφορα αντικρουόμενα κριτήρια.

Πρώτον, πρέπει να είναι έτσι εγκατεστημένο ώστε όλο το ύδωρ που ρέει από την ζώνη ρύπανσης να περνάει από την δίοδο. Με άλλα λόγια το Σύστημα Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων πρέπει να είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε η ζώνη εγκλεισμού να περικλείει την ζώνη ρύπανσης την οποία το σύστημα πρόκειται να διαχειριστεί. Οι διευθύνσεις ροής του υπόγειου ύδατος μεταβάλλονται, έχοντας σαν αποτέλεσμα η τοποθεσία του πλούμιου και η ζώνη εγκλεισμού να ποικίλει με το χρόνο, κάτι που δεν μπορεί να θεωρηθεί ασήμαντο.

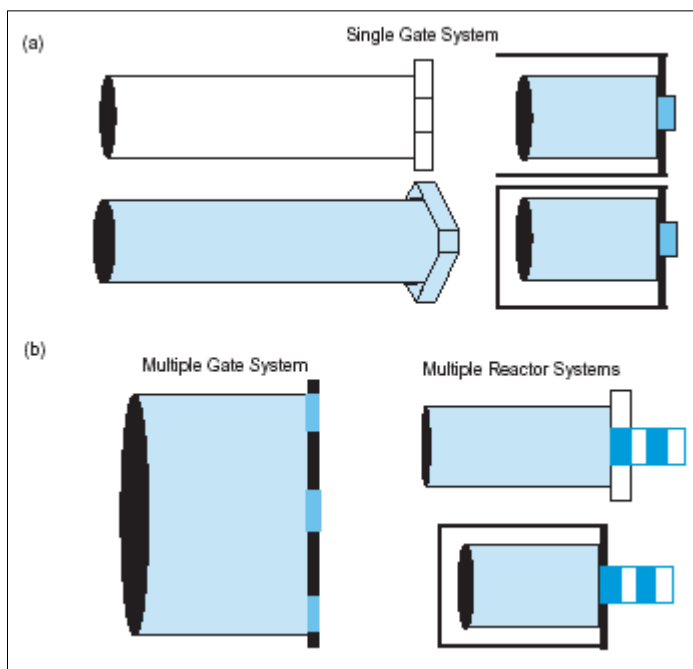
Δεύτερον, ο χρόνος συγκράτησης του ρυπασμένου υπόγειου ύδατος στην δίοδο πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή μείωση στις συγκεντρώσεις των ρύπων. Ο απαραίτητος χρόνος συγκράτησης εξαρτάται από την συγκέντρωση στην εισροή, την συγκέντρωση στην εκροή και από το ρυθμό αντίδρασης.

Τρίτον, το μέγεθος των φραγμάτων και ο αριθμός των διόδων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος. Όταν ο σχεδιαστής βρεθεί αντιμέτωπος με τέτοια θέματα θα είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσει μοντέλα ροής και μεταφοράς για να αξιολογήσει τις προτεινόμενες μορφές του Συστήματος Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων.

Η πιο απλή μορφή ενός Συστήματος Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων είναι μία δίοδος με φράγματα που εκτείνονται αριστερά και δεξιά από αυτή (Εικόνα 6-1a). Μονές ή πολλαπλές δίοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης με φράγματα που κατασκευάζονται στα ανάντη του πλουμίου, περιβάλλοντας μερικώς τη ζώνη της πηγής ρύπανσης.

Μια ζώνη ρύπανσης είναι δυνατόν να περικυκλωθεί ολοκληρωτικά από φράγματα, τα οποία έχουν μία δίοδο που κατασκευάζεται στην κατάντη πλευρά. Το φράγμα που βρίσκεται πίσω από την πηγή εκτρέπει μεγάλο μέρος του υπόγειου ύδατος γύρω από τη ζώνη της ρύπανσης. Το ύδωρ που διεισδύει στην περίφραξη ή ρέει δια μέσω των φραγμάτων στο κελί εξέρχεται από τη δίοδο, όπου ένα αντιδραστήριο το απορρυπαίνει. Αυτή η διαμόρφωση ελαχιστοποιεί τη ποσότητα ύδατος που ρέει μέσα στη ζώνη της ρύπανσης, άρα και τη ποσότητα του ρυπασμένου ύδατος που πρέπει να εξυγιανθεί. Συγχρόνως όμως μεγιστοποιείται ο χρόνος συγκράτησης στη δίοδο οδηγώντας σε περισσότερο πολύπλοκη εξυγίανση.

Οι πολλαπλές δίοδοι παράλληλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον έλεγχο ευρέων πλουμίων (Εικόνα 6-1b). Πλούμια που περιέχουν μείγμα ρύπων όπου απαιτούνται περισσότεροι από έναν τύπο *in situ* αντιδραστήρια είναι δυνατόν να ελεγχθούν από πολλαπλές διόδους σε σειρά. Για παράδειγμα, ένα πλούμιο από εργοστάσιο γαλβανισμού



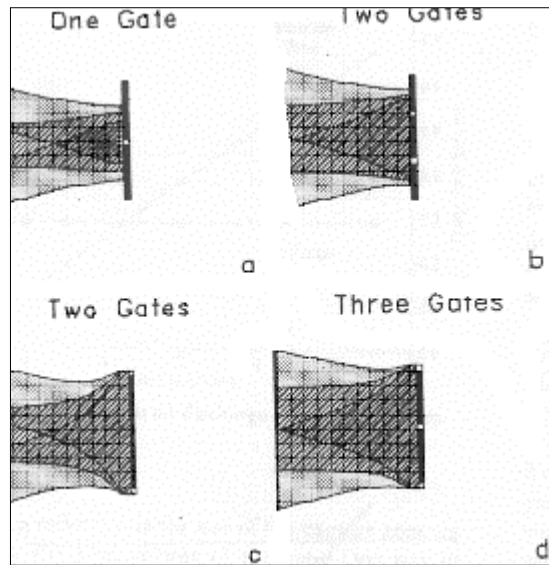
Εικόνα 6-1 Διατάξεις ‘Funnel and Gate’
(Starr and Cherry, 1994)

που περιλαμβάνει χλωριωμένους υδρογονάνθρακες και μέταλλα μπορεί να αποκατασταθεί χρησιμοποιώντας ένα αντιδραστήριο που θα υποβαθμίζει τα οργανικά και ένα δεύτερο για την κατακρήμνιση των μετάλλων.

Όταν ανιχνευτεί η εστία της ρύπανσης πριν το σχηματισμό πλουμίου ρυπαντών, τότε η ζώνη ρύπανσης περικυκλώνεται από αδιαπέραστους τοίχους, εκτός από ένα άνοιγμα που συμπληρώνεται με ένα *in situ* αντιδραστήρα στον τοίχο που βρίσκεται στα κατάντη (Εικόνα 6-1a δεξιά). Ο τοίχος στα ανάντη αντανakλά το καθαρό υπόγειο ύδωρ γύρω από την ζώνη της πηγής ρύπανσης και μειώνει την παροχή του υπόγειου ύδατος μέσα από την ζώνη της πηγής ρύπανσης. Οι τοίχοι ουσιαστικά μειώνουν το ποσό του υπόγειου ύδατος που έρχεται σε επαφή με τη ζώνη της πηγής ρύπανσης αλλά δεν το μηδενίζουν.

Το ύδωρ που εισέρχεται στο κελί αποτελείται από καθιζήσεις που πέφτουν στην επιφάνεια του εδάφους του κελιού και φιλτράρονται, το υπόγειο ύδωρ που ρέει προς τα πάνω από τη βάση του κελιού, και το υπόγειο ύδωρ που ρέει μέσα από τους τοίχους. Λίγο ύδωρ θα περάσει από τους τοίχους, αν αυτοί έχουν κατασκευαστεί σωστά. Ουσιαστικά όλο το ύδωρ που εισέρχεται στο κελί βγαίνει από τη διόδο. Η παροχή της διόδου είναι πολύ μικρότερη απ' ό,τι θα ήταν χωρίς τον εγκλεισμό αφού όλο το ποσό του ύδατος που θα περνούσε από τη ζώνη ρύπανσης τώρα ανακλάται από τους ανάντη αδιαπέραστους τοίχους. Αυτές οι διαμορφώσεις αποδίδουν τους μεγαλύτερους χρόνους συγκράτησης για ένα δοσμένο μήκος αδιαπέραστων τοίχων, και δημιουργούν μία ζώνη εγκλεισμού που δεν επηρεάζεται από την μεταβολή στην διεύθυνση ροής του υπογείου ύδατος.

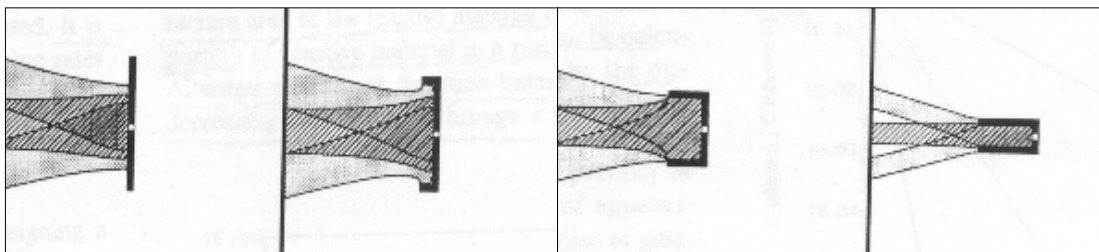
Με τη χρήση πολλαπλών διόδων τροποποιείται επίσης το μέγεθος και το σχήμα της ζώνης εγκλεισμού. Οι πολλαπλές διόδους είναι δυνατόν να τοποθετηθούν με διάφορους τρόπους σε ένα Σύστημα Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων (Εικόνα 6-2). Για παράδειγμα είναι πιθανόν να έχουμε δύο διόδους χωρίζοντας τους τοίχους σε τρία ίσα κομμάτια, ή δύο διόδους στα άκρα του φράγματος ή ακόμη διόδους τόσο στα άκρα όσο και στη μέση του φράγματος. Οι πολλαπλές διόδους δημιουργούν σύνθετες ζώνες εγκλεισμού που είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές που δημιουργούνται στην περίπτωση μίας και



Εικόνα 6-2 Φράγματα με πολλαπλές διόδους
(Starr and Cherry, 1994)

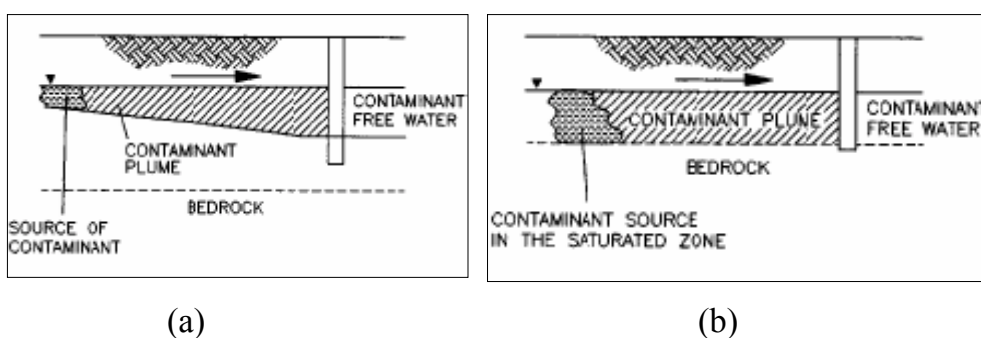
μόνο διόδου. Η διαφορά στο μέγεθος των σύνθετων ζωνών εγκλεισμού για μεταβλητότητα 30 μοιρών με τη κλίση της περιοχής στις διαμορφώσεις δύο διπλών διόδων είναι πολύ μικρή, αλλά οι σύνθετες ζώνες εγκλεισμού έχουν αρκετά διαφορετικό σχήμα. Οι τριπλές διόδους δημιουργούν την μεγαλύτερη σύνθετη ζώνη εγκλεισμού από όλες τις προσομοιωμένες διαμορφώσεις. Είναι πιθανόν, ένα σύστημα που αποτελείται από εναλλακτικές διόδους και αδιαπέραστους τοίχους να δημιουργούσε μεγαλύτερη σύνθετη ζώνη εγκλεισμού.

Μια άλλη διάταξη ενός Συστήματος Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων είναι η χρήση αδιαπέρατων τοίχων ίδιου μήκους με προεκτάσεις στα άνω (Εικόνα 6-3). Η διάταξη αυτή ονομάζεται ‘Φράγματα σε σχήμα U’. Στην Εικόνα 6-3 όπου οι διατάξεις έχουν το ίδιο μήκος αδιαπέρατων τοίχων παρατηρείται ότι τα φράγματα με μεγαλύτερες προεκτάσεις είναι πιο στενά. Προεκτάσεις δύο μέτρων δεν εμφανίζουν σημαντική επίδραση στο μέγεθος της σύνθετης ζώνης εγκλεισμού συγκρίνοντάς την με αυτή ενός φράγματος χωρίς προεκτάσεις. Προεκτάσεις πέντε μέτρων δημιουργούν τη μεγαλύτερη σύνθετη ζώνη εγκλεισμού και προεκτάσεις οκτώ μέτρων μειώνουν το μέγεθος της σύνθετης ζώνης εγκλεισμού (Starr and Cherry, 1994).



Εικόνα 6-3 Διατάξεις χωρίς προεκτάσεις και με προεκτάσεις 2, 5 και 8 μέτρων (Starr and Cherry, 1994)

Η διάταξη των Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων εξαρτάται και από το αν το ρυπασμένο πλούμιο εκτείνεται σε όλο το πάχος του υδροφορέα. Αν συμβαίνει αυτό, όπως στην περίπτωση της DNAPL ρύπανσης, το αντιδρών κελί (δίοδος επεξεργασίας) καταλαμβάνει όλο το πάχος του υδροφορέα (Εικόνα 6-4b). Αν το πλούμιο καταλαμβάνει μόνο το ανώτερο μέρος του υδροφορέα, για παράδειγμα όταν οι ρύποι είναι LNAPL, ή ένα πτητικό υγρό στην ακόρεστη ζώνη, τότε μια εγκατάσταση που εκτείνεται μόνο στο ανώτερο μέρος του υδροφορέα θα είναι αρκετή (Εικόνα 6-4a) (Starr and Cherry, 1994).



Εικόνα 6-4 Τομή Συστήματος Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων (Suthersan S.S, 1996)

- a) Hanging Gate
- b) Fully Penetrated Gate

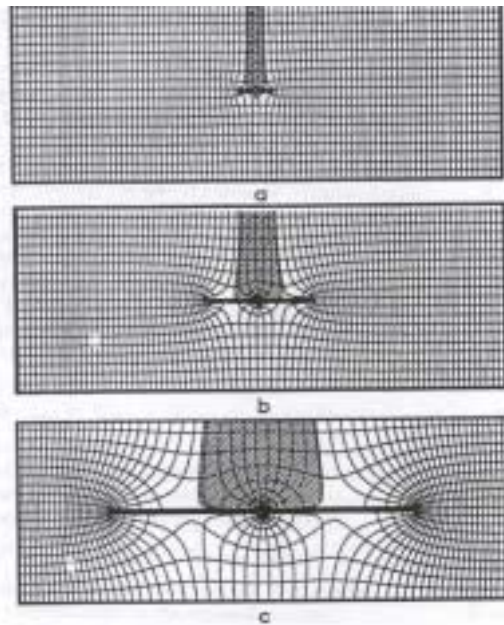
6.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Στον όρο γεωμετρία του Συστήματος Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων περιλαμβάνονται οι διαστάσεις των αδιαπέραστων τοίχων και των διόδων, η θέση και ο αριθμός των διόδων, η γωνία μεταξύ των πλευρών των φραγμάτων, και ο προσανατολισμός του Συστήματος Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων ως προς την υδραυλική κλίση της περιοχής. Ο βαθμός μείωσης της συγκέντρωσης καθώς το υπόγειο ύδωρ περνάει μέσα από την δίοδο ελέγχεται από το ρυθμό αντίδρασης και το χρόνο συγκράτησης στην δίοδο, τα οποία με τη σειρά τους εξαρτώνται από το μέγεθος της διόδου και την εκροή από αυτή. Αυτές οι επιδράσεις αξιολογούνται χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις δύο διαστάσεων και είναι εφαρμόσιμες σε Συστήματα Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων που διαπερνούν ολόκληρο το πάχος του υδροφορέα και εκτείνονται μέχρι τα υποκείμενα αδιαπέραστα στρώματα. Συστήματα που εκτείνεται μερικώς σ' ένα υδροφορέα, ίσως επειδή τα πλούμια του υπόγειου ύδατος καταλαμβάνουν μόνο το ρηχό μέρος ενός υδροφορέα, περιγράφονται καλύτερα από προσομοιώσεις τριών διαστάσεων.

Δύο αντικρουόμενοι παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν στην αξιολόγηση των διαμορφώσεων των Συστημάτων Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων. Απ' την μια, η εκροή από τη δίοδο πρέπει να μεγιστοποιείται για να είναι τελικά η ζώνη εγκλεισμού όσον γίνεται πιο ευρεία. Και από την άλλη, ο χρόνος συγκράτησης του ρυπασμένου υπόγειου ύδατος στη δίοδο να γίνεται όσον το δυνατόν μεγαλύτερος για να είναι τελικά οι συγκεντρώσεις περισσότερες μειωμένες. Ο χρόνος συγκράτησης και η εκροή είναι αντιστρόφως ανάλογα, έτσι η προσδοκία για μια μεγάλη ζώνη εγκλεισμού θα πρέπει να εξισορροπηθεί με την απαίτηση για καλύτερη επεξεργασία.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Καθώς το πλάτος του φράγματος αυξάνει, αυξάνεται η εκροή από την δίοδο και η ζώνη εγκλεισμού ευρύνεται (Εικόνα 6-5). Η εκροή δεν αυξάνει ανάλογα με το πλάτος του φράγματος. Αντίθετα, η εκροή του ύδατος από το ροϊφόρο σωλήνα που τέμνεται κάθετα από το φράγμα αυξάνει ανάλογα με το πλάτος του φράγματος. Με άλλα λόγια, το ποσοστό του ύδατος που περνάει από τη δίοδο μειώνεται και το ποσοστό του ύδατος που ανακλάται γύρω από τις άκρες του φράγματος αυξάνει όσο το πλάτος του φράγματος αυξάνει.

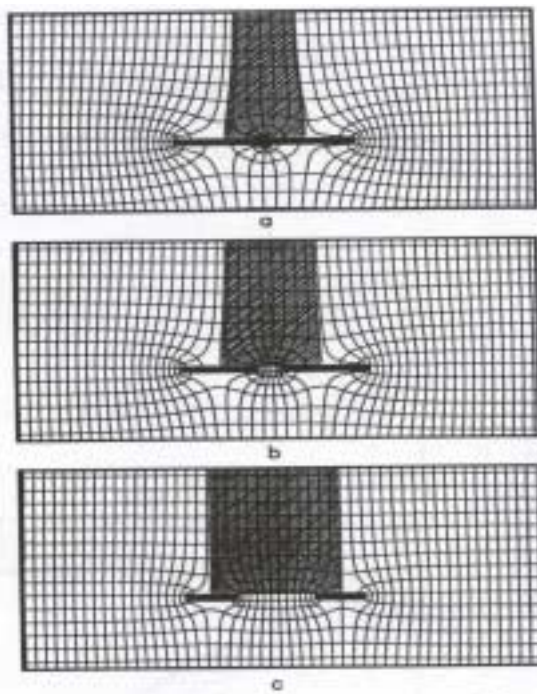


Εικόνα 6-5 Προσομοίωση ‘Funnel and Gate’ με μήκος φραγμάτων 7, 21 και 61 m (Starr and Cherry, 1994)

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΤΗΣ ΔΙΟΔΟΥ

Καθώς η δίοδος μεγαλώνει σχετικά με το φράγμα, η απόλυτη και σχετική εκροή και το πλάτος της ζώνης εγκλεισμού αυξάνουν. Γι' αυτό το λόγο, είναι επιθυμητό η δίοδος να είναι η μέγιστη δυνατή.

Εικόνα 6-6 Προσομοίωση 'Funnel and Gate' με πλάτος διόδου 1, 3 και 9 m και πλάτος φράγματος 21 m. (Starr and Cherry, 1994)



ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΔΙΟΔΟΥ

Η εκροή από την δίοδο αυξάνει με την αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας, αλλά είναι σχετικά μικρή η αύξηση για αγωγιμότητες μεγαλύτερες από 10 φορές από αυτή του υδροφορέα. Η επιπλοκή στην πράξη είναι ότι ενώ οι σχεδιαστές θα προσπαθήσουν να κάνουν την υδραυλική αγωγιμότητα της διόδου όσο γίνεται πιο υψηλή, οι μεγάλες τιμές όμως δεν σημαίνει απαραίτητα ότι εξασφαλίζουν την ορθή λειτουργία του συστήματος. Γενικά η υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα αντιστοιχεί σε πορώδη στρώματα που γενικά έχουν κόκκους μεγάλου μεγέθους άρα και μικρή ειδική επιφάνεια. Οι ρυθμοί αντίδρασης σε πολλά *in situ* αντιδραστήρια είναι αναμενόμενο να είναι ανάλογοι με την επιφάνεια, έτσι πιο αργοί ρυθμοί αντίδρασης θα έχουν πιθανόν ένα αρνητικό αποτέλεσμα όταν τοποθετηθεί ένα μέσο υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας στην δίοδο.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΟΡΥΦΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΤΗΝ ΕΚΡΟΗ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΟΔΟ

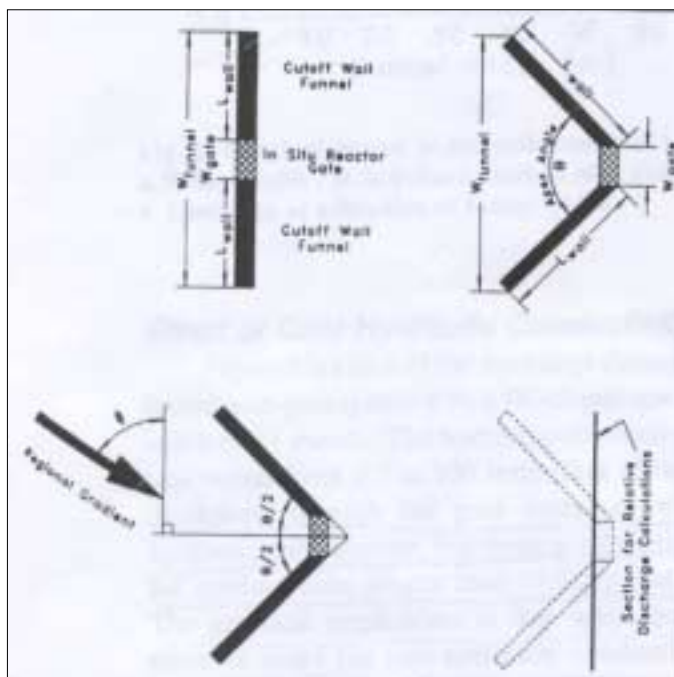
Η εκροή από την δίοδο, ενός Συστήματος Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων χωρίς γωνία μεταξύ των φραγμάτων και τοποθετημένο κάθετα στην υδραυλική κλίση της περιοχής, σχετίζεται με το μήκος του φράγματος. Στη γενική περίπτωση όπου το φράγμα δεν είναι κάθετο στην υδραυλική κλίση, το κάθετα προβαλλόμενο πλάτος του φράγματος στην κλίση της περιοχής σχετίζεται εξίσου με την γωνία κορυφής και το προσανατολισμό ως προς την υδραυλική κλίση. Το πλάτος του φράγματος $W_{\text{ΦΡΑΓΜΑ}}$ με την γωνία κορυφής θ και με το μήκος του τοίχου $L_{\text{ΤΟΙΧΟΥ}}$ δίνεται από τη σχέση και σύμφωνα με την Εικόνα 6-7 (Starr and Cherry, 1994).

$$W_{\text{ΦΡΑΓΜΑ}} = W_{\text{ΔΙΟΔΟΣ}} + 2L_{\text{ΤΟΙΧΟΥ}} \sin(\theta/2)$$

Για σταθερού μήκους τοίχο, το πλάτος του φράγματος είναι μέγιστο για τοίχο σε ευθεία ($\theta=180^\circ$) και μειώνεται όσο η γωνία θ απομακρύνεται από τις 180 μοίρες. Το πλάτος του φράγματος προβαλλόμενο κάθετα στην κλίση της περιοχής είναι:

$$W_{\text{ΦΡΑΓΜΑ ΚΑΘΕΤΟ}} = W_{\text{ΦΡΑΓΜΑ}} \sin(\varphi)$$

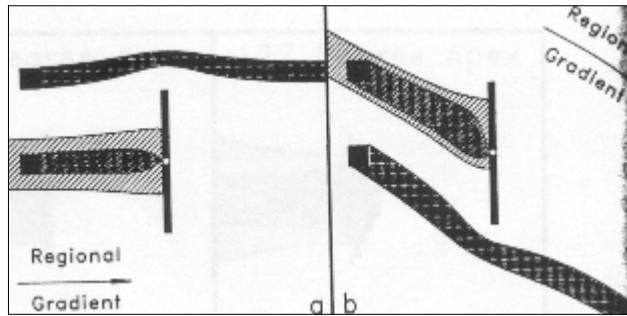
Το προβαλλόμενο πλάτος γίνεται μέγιστο για $\varphi=90$ μοίρες, π.χ. για φράγματα κάθετα στην κλίση της περιοχής.



Εικόνα 6-7 Σύμβολα και ονοματολογία (Starr and Cherry, 1994)

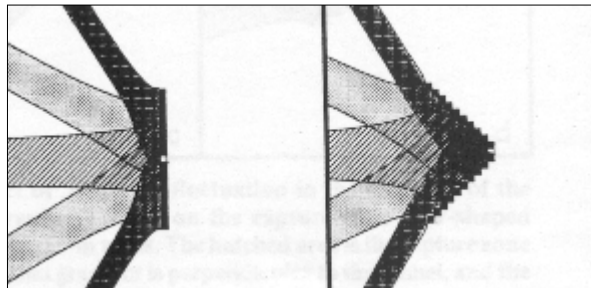
Για όλους τους προσανατολισμούς ως προς την κλίση της περιοχής, η μέγιστη παροχή εμφανίζεται για την γωνία κορυφής των 180 μοιρών. Η αλλαγή είναι μικρή για γωνίες κορυφής μεταξύ 127 και 233 μοιρών, αλλά η παροχή πέφτει κατακόρυφα για γωνίες κορυφής έξω από αυτή την ακτίνα. Τα παραπάνω εισάγουν ότι η πιο αποτελεσματική διαμόρφωση είναι το φράγμα σε ευθεία, αλλά και γωνίες που είναι κοντά στις 180 μοίρες είναι ελάχιστα λιγότερο αποτελεσματικές.

Για όλες τις γωνίες κορυφής, η μέγιστη παροχή εμφανίζεται όταν το φράγμα είναι κάθετο στην κλίση της περιοχής. Για ένα φράγμα με δοσμένη γωνία κορυφής, η παροχή από την δίοδο όταν το φράγμα δεν είναι κάθετο στην κλίση της περιοχής είναι το γινόμενο του ημίτονου της γωνίας (που σχηματίζει το φράγμα με την κλίση της περιοχής) με την παροχή από την δίοδο για φράγμα κάθετο στην κλίση της περιοχής (Εικόνα 6-8). Η σχέση ισχύει για συμμετρικά φράγματα και όχι απαραίτητα για ασύμμετρα φράγματα.

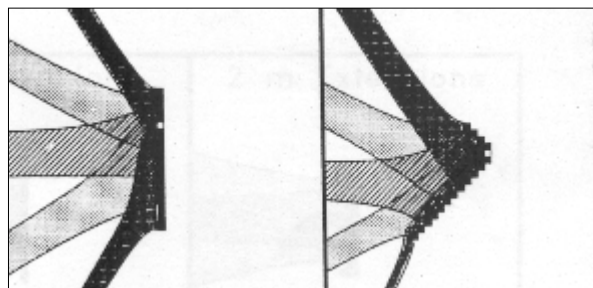


Εικόνα 6-8 Επίδραση της κατεύθυνσης της κλίσης της περιοχής στο πλούμιο και στη ζώνη εγκλεισμού (Starr and Cherry, 1994).

Στην περίπτωση που τα συμμετρικά φράγματα (Εικόνα 6-9) είναι περισσότερο αποτελεσματικά από τα μη συμμετρικά (Εικόνα 6-10) για μία γωνία με την κλίση της περιοχής, τότε είναι περισσότερο αποτελεσματικά και για κάθε άλλη γωνία. Αν και η μέγιστη παροχή εμφανίζεται σε φράγμα κάθετο στην κλίση της περιοχής, η παροχή μειώνεται λιγότερο από 15% για προσανατολισμούς μέχρι 30 μοίρες από την κάθετο.



Εικόνα 6-9 Συμμετρικά φράγματα πλάτους 21 m σε ευθεία και σε γωνία 90° (Starr and Cherry, 1994).



Εικόνα 6-10 Ασύμμετρα φράγματα πλάτους 21 m σε ευθεία και σε γωνία 90° (Starr and Cherry, 1994).

Η παροχή της διόδου για τοίχους με δοσμένο μήκος μπορεί περίπου να μεγιστοποιηθεί αν χρησιμοποιηθούν γωνίες κορυφής 180 ± 50 μοίρες, και προσανατολίζοντας το φράγμα μέσα στις 30 μοίρες από την κάθετο με την υδραυλική κλίση της περιοχής.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ

Σχεδιάζοντας ένα Σύστημα Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων ως στόχος μπορεί να θεωρηθεί η επιλογή εκείνης της διαμόρφωσης που οδηγεί στην μεγαλύτερη παροχή ανά μήκος αδιαπέραστου τοίχου στο φράγμα. Το πλάτος της ζώνης εγκλεισμού, πέρα από την περιοχή κοντά στο φράγμα, είναι ανάλογη με την παροχή στην διόδο, έτσι μεγιστοποιώντας την παροχή μεγιστοποιείται επίσης και το πλάτος της ζώνης εγκλεισμού. Το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους κατασκευής ενός φράγματος είναι ανάλογο με το μήκος των αδιαπέραστων τοίχων που εγκαθίστανται, συνεπώς το κόστος μπορεί να ελαχιστοποιηθεί αν χρησιμοποιηθούν διαμορφώσεις που δημιουργούν μέγιστη παροχή ανά μονάδα μήκος του τοίχου. Η διαμόρφωση που οδηγεί σε μέγιστη παροχή ανά μονάδα μήκος του τοίχου είναι το φράγμα με γωνία 180 μοιρών προσανατολισμένο κάθετα στην κλίση της περιοχής.

Σε πολλές περιπτώσεις, μπορεί να μην είναι εφικτό να κατασκευαστεί ένα Σύστημα Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων με αυτή την μορφή λόγω περιορισμών πρόσβασης όπως η υπάρχουσα υποδομή ή κάποια όρια ιδιοκτησίας. Επί προσθέτως, σε άλλες περιπτώσεις ο στόχος μπορεί να είναι διαφορετικός από το να μεγιστοποιηθεί το πλάτος της ζώνης εγκλεισμού, όπως συζητήθηκε παραπάνω.

Η γεωμετρία ενός Συστήματος Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων και ο προσανατολισμός με την κλίση της περιοχής επηρεάζουν το μέγεθος και το σχήμα της ζώνης εγκλεισμού πλησίον του φράγματος, συγχρόνως όμως ε-

πηρεάζουν και το πλάτος της ζώνης εγκλεισμού μακρύτερα από την περιοχή του φράγματος. Αν η ζώνη ρύπανσης είναι κοντά στο φράγμα, τότε θα είναι επωφελές να επιλεγεί μια διαμόρφωση που μεγιστοποιεί το μέγεθος της ζώνης εγκλεισμού κοντά στο φράγμα, ακόμα κι αν αυτή δεν μεγιστοποιεί το πλάτος της ζώνης εγκλεισμού μακριά από αυτό.

Οι διευθύνσεις της ροής του υπόγειου ύδατος μεταβάλλονται με το χρόνο λόγω των φυσικών διακυμάνσεων στην εκροή, του εμπλουτισμού και των ανθρωπογενών επιδράσεων όπως αλλαγές στους ρυθμούς άντλησης. Οι Rivett et al.(1992) και Farrell et al (1993) αναφέρουν μια ετήσια διακύμανση της διεύθυνσης της ροής του υπόγειου ύδατος στο Canadian Forces Base Borden, στο Οντάριο, περίπου 30 μοίρες. Καθώς οι διευθύνσεις ροής μεταβάλλονται, η ζώνη εγκλεισμού ενός Συστήματος Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων, ή ένα φρέαρ άντλησης, επίσης αλλάζουν. Γι' αυτό το λόγο, είναι πιθανόν όταν η ζώνη ρύπανσης βρίσκεται στην ζώνη εγκλεισμού κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ροής μπορεί να μην συμβαίνει το ίδιο αν αυτές αλλάξουν. Είναι λοιπόν αναγκαίο, να λαμβάνεται υπ' όψιν ένα λογικό διάστημα στις διευθύνσεις ροής κατά τον σχεδιασμό του Συστήματος Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΩΝ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ & ΔΙΟΔΩΝ (Starr and Cherry, 1994).

Η μοντελοποίηση, με ροή δύο διαστάσεων, των Συστημάτων Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων σ' ένα ομογενή, ισοτροπικό υδροφορέα δείχνει ότι το πλάτος της ζώνης εγκλεισμού που παράγεται από το Σύστημα Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων είναι ανάλογο της παροχής από τη δίοδο. Η παροχή από τη δίοδο μπορεί να αυξηθεί, αν αυξηθούν το πλάτος, το μήκος, και η υδραυλική αγωγιμότητα της διόδου και το πλάτος του φράγματος.

Για ένα δοσμένο μήκος αδιαπέραστων τοίχων, η πιο αποτελεσματική διαμόρφωση σε ένα ισοτροπικό υδροφορέα είναι το φράγμα με πλευρές σε

γωνία 180 μοιρών και προσανατολισμένες κάθετα στην υδραυλική κλίση της περιοχής. Ωστόσο, άλλες διαμορφώσεις εμφανίζουν μεγαλύτερες ζώνες εγκλεισμού πλησίον του φράγματος. Σε περιπτώσεις όπου η διεύθυνση της υδραυλικής κλίσης της περιοχής ποικίλει, η περιοχή που καταλαμβάνει η ζώνη εγκλεισμού σε ολόκληρη την ακτίνα μεταβολής της διεύθυνσης ροής εξαρτάται αυστηρά από την διαμόρφωση του φράγματος. Σχήματα διαφορετικά από φράγματα των 180 μοιρών παράγουν μεγαλύτερη σύνθετη ζώνη εγκλεισμού σε ολόκληρη την ακτίνα μεταβολής της διεύθυνσης ροής.

Η ισορροπία μεταξύ της μεγιστοποίησης του μεγέθους της ζώνης εγκλεισμού για μια δίοδο και της μεγιστοποίησης του χρόνου συγκράτησης του ρυπασμένου υπογείου ύδατος μέσα από τη δίοδο, είναι απαραίτητο να επιτευχθεί. Ωστόσο, ο χρόνος συγκράτησης μπορεί εύκολα να αυξηθεί χωρίς ουσιαστική επίδραση στη ζώνη εγκλεισμού κάνοντας τις διόδους μακρύτερες σε κατεύθυνση παράλληλη με τη ροή. Εναλλακτικά, μεγάλοι χρόνοι συγκράτησης επιτυγχάνονται αν η ζώνη της πηγής ρύπανσης περιβληθεί ολοκληρωτικά από αδιαπέραστους τοίχους, εκτός από ένα άνοιγμα που περιλαμβάνει *in situ* αντιδραστήρα και βρίσκεται στον κατάντη τοίχο.

6.3 ΤΟ ΑΝΤΙΔΡΩΝ ΚΕΛΙ –Η ‘ΚΑΡΔΙΑ’ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

6.3.1 Πληρωτικά Υλικά Του Αντιδρώντος Κελιού

Το αντιδρών κελί είναι το τμήμα του υδροφορέα που τροποποιείται ώστε να περιέχει το αντιδρών υλικό, διαμέσου του οποίου θα κινηθεί το πλούμιο των ρυπαντών και θα επεξεργαστεί. Σε ένα σύστημα *Ενεργής Τάφρου*, το αντιδρών κελί εκτείνεται σε όλο το πλάτος του φράγματος, ενώ σε συστήματα *Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων* αποτελεί ένα μόνο μικρό τμήμα του πλάτους του φράγματος (δίοδος).

Το αντιδρών υλικό αποδομεί, προσροφά, καταβυθίζει ή απομακρύνει χλωριωμένους διαλύτες, μέταλλα (χρώμιο), ραδιενεργές ουσίες (ουράνιο), πτητικούς οργανικούς υδρογονάνθρακες (BTEX) και άλλους ρυπαντές.

Πιο συγκεκριμένα η δίοδος μπορεί να περιέχει χημικά αντιδραστήρια για την αποδόμηση πτητικών υδρογονανθράκων, χηλικά για την ακινητοποίηση των μετάλλων, θρεπτικά, μικρόβια και οξυγόνο για την εντατικοποίηση της βιοαποδόμησης, ροφητικά υλικά για τη συγκράτηση των ρυπαντών, ιόν-εναλλακτικούς ζεόλιθους για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων, ασβεστόλιθο για ουδετεροποίηση του pH και κατακρήμνιση μετάλλων και μέταλλα με μηδενικό σθένος (Fe^0) που δρουν ως δότες ηλεκτρονίων για την αβιοτική αναγωγική αφαλογόνωση υδρογονανθράκων (TCE, PCE, DCE) και το σχηματισμό μη-τοξικών ή ακινητοποιημένων ουσιών (Gillham and O'Hannesin, 1996).

Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στα φράγματα εξαρτώνται από παραμέτρους όπως το pH, το δυναμικό οξειδοαναγωγής, οι συγκεντρώσεις και η κινητική των αντιδράσεων. Με βάση τις διεργασίες που πραγματοποιούνται με τη χρήση των διαφόρων υλικών πλήρωσης διακρίνονται οι παρακάτω κατηγορίες αντιδρώντων μέσων:

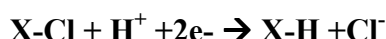
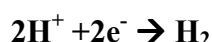
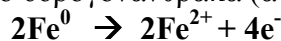
Η πρώτη κατηγορία τροποποιεί τις συνθήκες του pH και Eh στο υλικό κάτω από την επιφάνεια. Αυτές οι αλλαγές επηρεάζουν τη διαλυτότητα του pH ή την οξειδοαναγωγή των ευαίσθητων ειδών, τον ρυθμό των αντιδράσεων υποβάθμισης. Για παράδειγμα, το χρώμιο είναι λιγότερο διαλυτό σε αναγωγικές συνθήκες παρά σε οξειδωτικές.

Επίσης μερικές τάξεις οργανικών συστατικών, όπως οι αρωματικές ενώσεις που προέρχονται από τη βενζίνη, είναι πιο εύκολα βιοαποικοδομήσιμα κάτω από αερόβιες συνθήκες παρά σε αναερόβιες (Wilson and McNabb, 1983). Τροποποιώντας τις οξειδοαναγωγικές συνθήκες είναι δυνατόν να αυξηθεί οι ρυθμοί υποβάθμισης αυτών των συστατικών. Οι Shields and Reagin, 1992 περιγράφουν βακτήρια που υποβαθμίζουν το τριχλωροαιθυλενιο και άλλους χλωριωμένους υδρογονάνθρακες κάτω από αερόβιες συνθήκες. Ένας *in situ* αντιδραστήρας που περιλαμβάνει αυτούς τους μικροοργανισμούς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σ' έναν αερόβιο υδροφορέα, ή να συνδυαστεί μ' έναν αντι-

δραστήρα που αερίζει το πλούμιο. Οι ρυθμοί των αβιοτικών αντιδράσεων επηρεάζονται επίσης από την οξειδοαναγωγική κατάσταση.

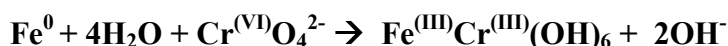
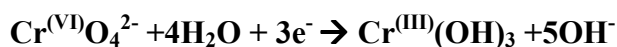
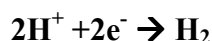
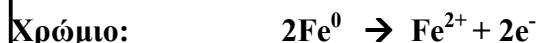
Οι Gillham and O'Hannesin (1992) περιγράφουν ένα αντιδραστήρα που προκαλεί αβιοτική υποβάθμιση των αλογονομένων αλειφατικών υδρογονανθράκων όπως είναι το τρι- και τετραχλωροαιθυλένιο υπό αναγωγικές συνθήκες. Οι εργαστηριακές δοκιμές (Gillham and Matheson, 1994) και οι δοκιμές πεδίου (Focht and O'Hannesin, 1996) έδειξαν πως κάτω από ισχυρά αναγωγικές συνθήκες, και με την παρουσία μετάλλων, ορισμένες διαλυμένες χλωριωμένες οργανικές ουσίες όπως τα TCE, PCE, DCE αποδομούνται αυθόρμητα σε μη-τοξικές ουσίες όπως αιθάνιο, αιθένιο, και χλωριούχα, αφού η μεταβολή της ενέργειας του Gibbs είναι αρνητική ($\Delta G < 0$), με χρόνο ημιζωής της τάξεως μερικών ωρών. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο μέταλλο είναι ο κοκκώδης σίδηρος (Fe^0), ένα ισχυρό αναγωγικό, που εκτός από την αβιοτική αναγωγική αφαλογόνωση υδρογονανθράκων (Εικόνα 6-11), ανάγει και το εξασθενές χρώμιο σε τρισθενές (Εικόνα 6-12).

Μεταφορά ηλεκτρονίων από την επιφάνεια του Fe^0 (οξείδωση) στο χλωριωμένο υδρογονάνθρακα (αναγωγή, αφαλογόνωση)



Εικόνα 6-11 Αποδόμηση χλωριωμένων υδρογονανθράκων (Birke and Roehl, 2001)

Η αναγωγή των ευκίνητων και οξειδωμένων μεταλλικών στοιχείων ακολουθείται από καθίζηση τους



Εικόνα 6-12 Αναγωγική ακινητοποίηση του χρωμίου (Birke and Roehl, 2001)

Αν και οι μηχανισμοί των μετασχηματισμών παρουσία κοκκώδους σιδήρου δεν είναι απολύτως κατανοητοί, πιστεύεται πως οι μετασχηματισμοί λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια του μέσου (Weber, 1995 and Burris et al, 1995) και πως ο ρυθμός της αντίδρασης ελέγχεται από τη συγκέντρωση των διαλυμένων οργανικών και τη διαθεσιμότητα της επιφάνειας του στερεού μέσου (Gillham, Johnson and Devlin)

Η **δεύτερη κατηγορία** των *in situ* αντιδραστήρων περιλαμβάνει υλικά που διαλύουν και προκαλούν κατακρήμνιση μιας ορυκτής φάσης ακινητοποιώντας το ρύπο. Για παράδειγμα, Xu and Schwartz (1992) περιγράφουν ένα αντιδραστήρα που περιλαμβάνει ορυκτό φωσφορικού ασβεστίου. Η διάλυση του ορυκτού φωσφορικού ασβεστίου αυξάνει την συγκέντρωση του φωσφόρου, το οποίο μετά προκαλεί κατακρήμνιση των εναποθέσεων ορυκτού φωσφόρου.

Η **τρίτη κατηγορία** των *in situ* αντιδραστήρων απομακρύνει υλικά από τη φάση διάλυσης με ρόφηση. Για παράδειγμα, ενεργοποιημένος άνθρακας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην απομάκρυνση υδροφοβικών οργανικών ουσιών, και ζεολιθικές ή συνθετικές ιονοανταλλακτικές ρητίνες στην απομάκρυνση ιοντικών ρύπων από το υπόγειο ύδωρ. Η ρόφηση είναι αντιστρεπτή, γι' αυτό το λόγο κρίνεται αναγκαία η περιοδική απομάκρυνση και αντικατάσταση του χρησιμοποιημένου απορροφητικού υλικού. Οι Burris και Antworth (1992) περιγράφουν μια τεχνική για τη δημιουργία ενός ροφητικού φράγματος αυξάνοντας την ικανότητα του πορώδους μέσου στην προσρόφηση υδροφοβικών οργανικών διαλυμένων ουσιών με έκχυση κατιονικού απορρυπασμένου διαλύματος στο υλικό κάτω από την επιφάνεια. Το ιονισμένο άκρο των απορρυπασμένων μορίων απορροφάται από ανόργανες επιφάνειες, και οι οργανικές διαλυμένες ουσίες απορροφούνται από το υδροφοβικό άκρο των απορρυπασμένων μορίων.

Η **τέταρτη κατηγορία** των *in situ* αντιδραστήρων τροφοδοτεί με θρεπτικά των οποίων η διαθεσιμότητα περιορίζει τους ρυθμούς της βιοαποικοδόμησης. Οι Denvil και Barker (1993) περιγράφουν μια μέθοδο έκχυσης θρεπτι-

κών διαλυμάτων συμβάλλοντας θετικά αν αναμιχτούν με το πλούμιο του υπόγειου ύδατος. Εναλλακτικά, τα στερεά υλικά που στραγγίζουν διαλυμένα θρεπτικά ενεργούν διεγερτικά στην βιοαποικοδόμηση. Οι Robertson & Cherry (1993) και ο Vogan (1993) έκαναν εργαστηριακές και δοκιμές πεδίου στις οποίες χρησιμοποιήθηκε πριονίδι για την τροφοδότηση διαλυτού οργανικού άνθρακα και την τελική αύξηση των ρυθμών αποδόμησης νιτρικών.

Η **πέμπτη κατηγορία** των in situ αντιδραστήρων είναι αυτοί στους οποίους λαμβάνουν χώρα διαδικασίες φυσικής απομάκρυνσης και μετασχηματισμού. Οι Pankow et al (1992) περιγράφουν την in situ διοχέτευση αέρα για την απομάκρυνση πτητικών ουσιών από το υπόγειο ύδωρ. Αυτός ο τύπος αντιδραστήρα διαφέρει από τους άλλους αντιδραστήρες στους ρύπους που απομακρύνονται από το υπόγειο ύδωρ και μεταφέρονται πάνω από τη γη, όπου δευτερεύουσες διεργασίες είναι πιθανόν να κριθούν αναγκαίες.

Στους πίνακες που ακολουθούν περιέχονται τα αντιδρώντα υλικά που χρησιμοποιούνται ανάλογα με το είδος του ρύπου.

Πληρωτικό Υλικό	Ρυπαντές	Διεργασίες	Εφαρμογές
Fe ⁰	CrO ₄ ²⁻	Αναγωγή & Κατακρήμνιση	Πιλοτικές
Ζεόλιθοι	CrO ₄ ²⁻ , SO ₄ ²⁺	Απορρόφηση, Αναγωγή, Επιφανειακή Κατακρήμνιση (?)	Εργαστήρια
Fe ⁰ / Ζεόλιθοι	CrO ₄ ²⁻	Απορρόφηση, Αναγωγή	Εργαστήρια
Hydroxylapatite	Pb ²⁺	Κατακρήμνιση	Δοκιμές πεδίου
Hydroxylapatite	Zn ²⁺	Απορρόφηση /Συν-κατακρήμνιση	Εργαστήρια
Hydroxylapatite	Cd ²⁺	Συν-κατακρήμνιση	Εργαστήρια
Ασβεστόλιθος, Ιπτάμενη Τέφρα	UO ²⁺	Συν-κατακρήμνιση	Εργαστήρια
Fe ⁰	UO ²⁺	Αναγωγή & Κατακρήμνιση	Εργαστήρια
Fe ⁰	TcO ₄ ⁻	Αναγωγή & Κατακρήμνιση	Εργαστήρια
Κυτταρίνη	UO ²⁺	Αναγωγή & Κατακρήμνιση	Εργαστήρια
Τύρφη, οξείδια Fe ²	MoO ₄ ²⁺	Απορρόφηση /Συν-κατακρήμνιση	Εργαστήρια
Ζεόλιθοι	⁹⁰ Sr ²⁺	Απορρόφηση	Εργαστήρια
Fe ⁰	NO ₃ ⁻	Αναγωγή	Εργαστήρια
Πριονίδι	NO ₃ ⁻	Αναγωγή	Πεδίο
Οξείδια Fe / Ca	PO ₄ ⁻	Απορρόφηση /Συν-κατακρήμνιση	Εργαστήρια

Πίνακας 6-1 Αντιδρώντα μέσα για ανόργανους ρυπαντές (Birke and Roehl, 2001)

Πληρωτικό Υλικό	Ρυπαντές	Διεργασίες	Εφαρμογές
Fe ⁰ , Fe ⁰ / Al ⁰ , Fe ⁰ /Pd-μείγμα	CHC, FCHC	Αβιοτική Αναγωγική Αφαλογόνωση	Εργαστήρια, πιλοτικές,
Fe ⁰ / Σιδηροπυρίτης-μείγμα, Fe/Ni	Χλωριωμένα αρωματικά	----	Εργαστήρια
Fe ⁰ & μεθανοτροφικά βακτήρια	CHC	Αβιοτική Αναγωγική Αφαλογόνωση & Μικροβιακή Αποικοδόμηση	Εργαστήρια
Ζεόλιθοι & μεθανοτροφικά βακτήρια	TCE	Απορρόφηση & Μικροβιακή Αποικοδόμηση	Εργαστήρια,
Ζεόλιθοι	MTBE, CHCl ₃ , TCE	Απορρόφηση	Εργαστήρια
Ζεόλιθοι	PCE, PAH	Απορρόφηση	Πιλοτικές
Fe ⁰ /Ζεόλιθοι	PCE	Απορρόφηση, Αναγωγή	Εργαστήρια
Οργανομετανοίτης	TCE, Βενζόλιο, φαινόλες	Απορρόφηση	Εργαστήρια
ORC	BTEX	Οξειδωτική Αποικοδόμηση, Μικρόβια	Εργαστήρια, Πεδίο
Ενεργός Άνθρακας	PAH	Απορρόφηση & Μικροβιακή Αποικοδόμηση (?)	Εργαστήρια

Πίνακας 6-2 Αντιδρώντα μέσα για οργανικούς ρυπαντές (Birke and Roehl, 2001)

6.3.2 Απαραίτητα Χαρακτηριστικά Των Μέσων Που Θα Αντιδράσουν Με Τους Ρύπους (Birke and Roehl, 2001)

Το υλικό που θα επιλεγεί για την πλήρωση του αντιδρώντος κελιού είναι σημαντικό να έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά, για την αποδοτική λειτουργία του όλου συστήματος :

- ◇ Υψηλή μείωση των συγκεντρώσεων των ρύπων
- ◇ Γρήγορους ρυθμούς αντίδρασης
- ◇ Ικανοποιητική επιλεκτικότητα όσον αφορά τους ρύπους που μας ενδιαφέρουν
- ◇ Υψηλή υδραυλική διαπερατότητα
- ◇ Χημική σταθερότητα για μεγάλο χρονικό διάστημα

- ◇ Περιβαλλοντική συμβατότητα
- ◇ Εμφάνιση ομογενών ιδιοτήτων σε ικανοποιητικό βαθμό
- ◇ Λειτουργικό ως προς το οικονομικό επίπεδο

6.3.3 Τεχνικές Εγκατάστασης Του Αντιδρώντος Κελιού.

(Environics Directorate U.S Air Force, 1997)

Το αντιδρών κελί είναι το τμήμα του υδροφορέα που τροποποιείται ώστε να περιέχει το αντιδρών υλικό, διαμέσου του οποίου θα κινηθεί το πλούμιο των ρυπαντών.

Κατασκευάζεται έτσι ώστε η πάνω του επιφάνεια να φτάνει περίπου τα 2 πόδια πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, για την περίπτωση που υπάρχει διακύμανση στο ύψος του νερού. Η κάτω του επιφάνεια θεμελιώνεται 1 περίπου πόδι μέσα στο αδιαπέρατο στρώμα. Σε ένα σύστημα *Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων* οι αδιαπέρατοι τοίχοι θεμελιώνονται περίπου 5 πόδια μέσα στο αδιαπέρατο στρώμα. Αν η συνέχεια ή η ακεραιότητα του υποκείμενου αδιαπέρατου στρώματος αμφισβητείται, τοποθετείται γεώφασμα ή τσιμέντο στη βάση του αντιδρώντος κελιού για την αποφυγή ρύπανσης από τη ροή ρυπασμένου υπόγειου νερού κάτω από το κελί.

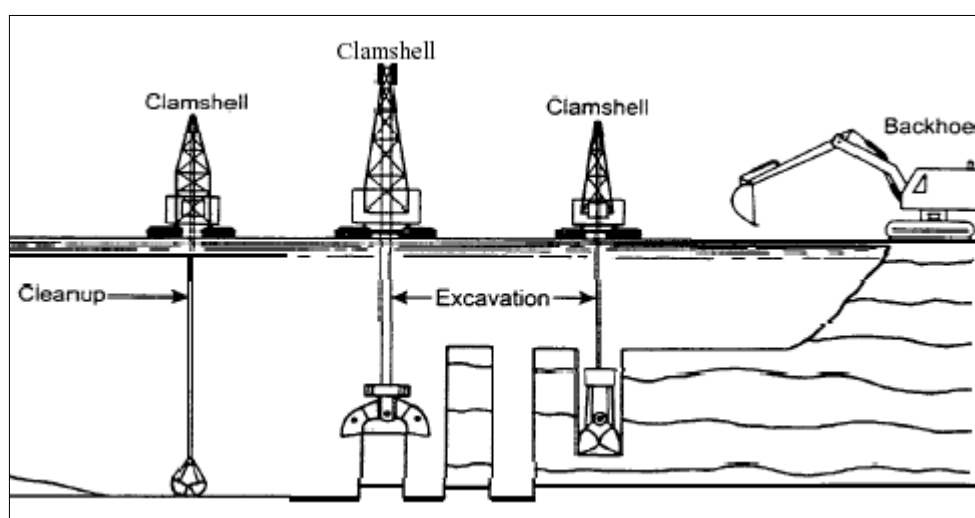
Σε ορισμένα αντιδρώντα κελιά, ιδιαίτερα όταν ο περιβάλλον υδροφορέας είναι ετερογενής, το αντιδρών μέσο περιορίζεται και στα ανάντη και στα κατόντη από λεπτά τμήματα χαλικιών. Το χαλίκι αυξάνει την υδραυλική αγωγιμότητα γύρω από το αντιδρών μέσο, οδηγεί ομοιόμορφα το υπόγειο νερό στη ζώνη επεξεργασίας, διαμέσου ενός ομογενούς υλικού, και εμποδίζει την εισροή λεπτόκοκκων εδαφικών σωματιδίων στο αντιδρών μέσο. Ακόμα παρέχει μια ομοιογενή περιοχή για την παρακολούθηση της εισροής και της εκροής από το αντιδρών μέσο.

Εμπορικές μέθοδοι εγκατάστασης του αντιδρώντος κελιού :

1. Η συμβατική εκσκαφή τάφρου
(Conventional trench excavation)
2. Η βασισμένη σε “Caisson” εγκατάσταση
(Caisson-based emplacement)
3. Η βασισμένη σε άξονα εγκατάσταση
(Mandrel-based emplacement)
4. Η συνεχής διάνοιξη τάφρου
(Continuous trenching)
5. Τοποθέτηση αντικαταστάσιμου περιέκτη

1. Η συμβατική εκσκαφή τάφρου

Ανάλογα με το σχέδιο του διαπερατού φράγματος , για την εγκατάσταση του αντιδρώντος κελιού μπορεί να χρειαστεί η εκσκαφή μιας τάφρου , η οποία θα φιλοξενήσει το αντιδρών μέσο. Τα συνηθισμένα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για τη συμβατική εκσκαφή τάφρων είναι οι τσάπες και οι εκσκαφείς με διπλοσάγονο κουβά (Εικόνα 6-13).



Εικόνα 6-13 Η συμβατική εκσκαφή τάφρου
(EnviroNics Directorate U.S Air Force,1997)

Για τη διασφάλιση της σταθερότητας των τοίχων της τάφρου κατά τη διάρκεια της κατασκευής χρησιμοποιούνται πολλές τεχνικές. Μερικές από αυτές είναι η προσωρινή εγκατάσταση ενωμένων ατσάλινων φύλλων περιμετρικά

της περιοχής που θα καταλαμβάνει το κελί, η εκσκαφή μέσα σε λάσπη βιοπολυμερών και η αφαίρεση του νερού από την περιοχή αν ο υδροφόρος ορίζοντας είναι πολύ ψηλά.

2. Η βασισμένη σε Caisson εγκατάσταση (Caisson-based emplacement)

Το “Caisson” είναι μια κούφια κατασκευή, ικανή να δεχτεί υψηλά μηχανικά φορτία, που γενικά χρησιμοποιείται σαν μια μέθοδος συγκράτησης των τοιχωμάτων σε εκσκαφές. Οι κατασκευές αυτές ποικίλουν σε μέγεθος και σχήμα ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται. Για την εγκατάσταση αντιδρώντων κελιών χρησιμοποιούνται προκατασκευασμένα ανοιχτά, ατσάλινα “Caissons”. Όσο πιο μικρή είναι η διάμετρος τους, τόσο ευκολότερα τοποθετούνται μέσα στη γη με δόνηση ή πίεση. Συνήθως, για τεχνικούς και κατασκευαστικούς λόγους, χρησιμοποιούνται “Caissons” διαμέτρου 8 ποδιών (2.4 μέτρων) ή μικρότερα.

Μόλις το “Caisson” φτάσει το επιθυμητό βάθος, το χώμα που βρίσκεται μέσα σε αυτό αντικαθίσταται με το αντιδρών υλικό. Μετά από την τοποθέτηση του πληρωτικού υλικού το “Caisson” αφαιρείται.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε βάθη μέχρι 45 πόδια (13.7 μέτρα), είναι σχετικά φτηνή και εφαρμόζεται σε περιοχές χωρίς μεγάλους λίθους γιατί η ύπαρξη μεγάλων λίθων ενδεχομένως να επηρεάσει την κάθετη εγκατάσταση του “Caisson” .

3. Η βασισμένη σε άξονα εγκατάσταση (Mandrel-based emplacement)

Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ένας κούφιος ατσάλινος πάσσαλος ή άξονας, για τη δημιουργία ενός κάθετου κενού στο έδαφος, το οποίο θα πληρωθεί με το αντιδρών υλικό. Ο άξονας τοποθετείται στο έδαφος με τη χρήση σφύρας δόνησης. Το αντιδρών υλικό μπορεί να τοποθετηθεί μόνο του μέσα στο κενό ή να συνδυαστεί με τη χρήση γεωφασμάτων, γεωμεμβρανών στον πυθμένα του κελιού.

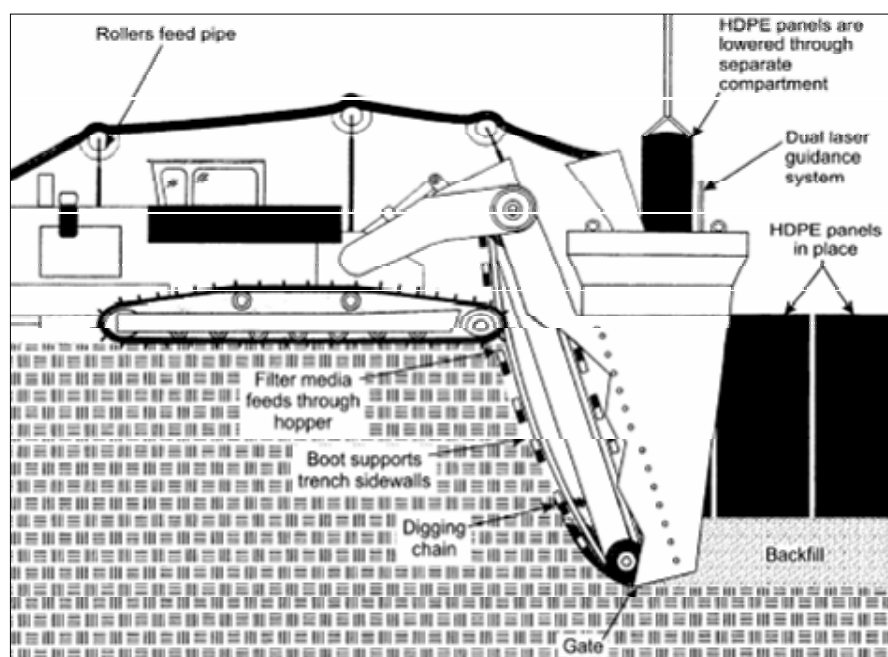
Μειονεκτήματα της μεθόδου είναι το περιορισμένο μέγεθος του αντιδρώντος κελιού, που εξαρτάται από το μέγεθος του άξονα που συνήθως είναι 2 ίντσες * 5 ίντσες. Έτσι, για την επίτευξη των απαιτούμενων χρόνων παραμονής θα πρέπει να κατασκευαστεί μια σειρά από ενεργές στήλες στο έδαφος. Ακόμα, επειδή ο άξονας εγκαθίσταται με τη χρήση σφυριού, μπορεί να παρεκκλίνει από την κάθετο εξαιτίας υποεδάφινων εμποδίων.

Τα θετικά της μεθόδου είναι το είναι σχετικά φτηνή και δεν δημιουργούνται υπολείμματα εκσκαφής.

4. Η συνεχής διάνοιξη τάφρου (Continuous trenching)

Αν και η μέθοδος αυτή δεν είναι τόσο συνηθισμένη όσο η χρήση συμβατικών εκσκαπτικών μηχανημάτων λόγω περιορισμών που αφορούν το βάθος της κατασκευής, μπορεί να εφαρμοστεί για φράγματα βάθους 35 ή 40 πόδια (10,5 -12 μέτρα). Με την τεχνική αυτή μπορεί να διανοίγεται τάφρος 12 έως 24 ίντσες (30 – 60 εκατοστά) πλάτους και ταυτόχρονα να γεμίζεται με αντιδρών υλικό ή με συνεχή φύλλα αδιαπέρατης μεμβράνης πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE). Δηλαδή με τη μέθοδο αυτή μπορεί να κατασκευαστούν και αδιαπέρατα φράγματα.

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται από ένα ειδικό μηχάνημα (Εικόνα 6-14) το οποίο έχει τη δυνατότητα να κόβει το έδαφος με ένα μηχανισμό που μοιάζει



Εικόνα 6-14 Η συνεχής διάνοιξη τάφρου (Environics Directorate U.S Air Force, 1997)

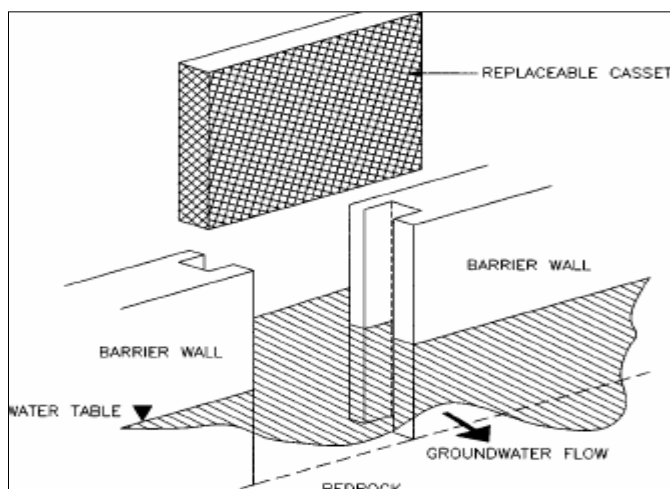
σαν πριόνι, να σταθεροποιεί τα τοιχώματα του χαντακιού και να εισάγει αντιδρών υλικό με μέγεθος έως και χαλικιού. Ακόμα είναι ικανό να εκτελεί την εκσκαφή σε τάφρο γεμάτη με νερό χωρίς να χρειάζεται η απομάκρυνση του νερού ή η στήριξη των τοιχωμάτων με φύλλα ατσαλιού.

Τα αρνητικά της μεθόδου είναι τα μικρά βάθη εκσκαφής και τα υπολείμματα της εκσκαφής που έρχονται στην επιφάνεια.

5. Τοποθέτηση αντικαταστάσιμου περιέκτη

Ένα αντιδρών κελί είναι δυνατόν να τοποθετηθεί κάτω από την επιφάνεια χωρίς την εγκατάσταση κάποιας συγκεκριμένης κατασκευής, αλλά θέτοντάς τον σ' ένα περιέκτη, για παράδειγμα ένα φρέαρ, που θα διευκολύνει την απομάκρυνση του αντιδραστήρα στην περίπτωση που χρειάζεται να αντικατασταθεί (Εικόνα 6-15). Ο

περιέκτης κατασκευάζεται τροποποιώντας το φρέαρ έτσι ώστε να επιτρέπει την σύνδεση με τη δομή των φύλλων ατσαλιού με μονωμένους συνδέσμους.



Εικόνα 6-15 Αποσπώμενος in situ αντιδραστήρας (Suthersan, S.S, 1999)

Καινοτόμες μέθοδοι εγκατάστασης

Εκτός από τις παραπάνω μεθόδους που είναι εμπορικά διαθέσιμες, υπάρχουν και μερικές άλλες μέθοδοι που είτε έχουν εφαρμοστεί πιλοτικά είτε θεωρητικά θα μπορούσαν να εφαρμοστούν. Αυτές είναι:

1. Η υδραυλική θραύση εδάφους (Hydraulic Fracturing)
2. Η βαθιά ανάμειξη εδάφους (Deep Soil Mixing)
3. Η εισαγωγή υλικών υπό πίεση (Jetting)

1. Υδραυλική θραύση του εδάφους (Hydraulic Fracturing).

Υδραυλική θραύση είναι η εκούσια θραύση ενός υποεπιφανειακού σχηματισμού, με τη χρήση νερού και αέρα κάτω από πολύ μεγάλη πίεση. Η τεχνολογία αυτή, που αρχικά εφαρμόστηκε από τη βιομηχανία πετρελαίου για την παροχέτευση πετρελαίου από σχηματισμούς μικρής διαπερατότητας, υιοθετήθηκε πρόσφατα για περιβαλλοντικές εφαρμογές σαν μια μέθοδο εγκατάστασης διαπερατών φραγμάτων. Μια σειρά διαμέτρου 12 έως 15 μέτρων από οριζόντια στοιβαγμένα ρήγματα, μπορεί να αποτελέσει μια αποτελεσματική ζώνη αντίδρασης για την επεξεργασία ρυπαντών.

Αρχικά δημιουργούνται τα ρήγματα λόγω αύξησης της πίεσης εξαιτίας της έκχυσης διαλύματος νερού και κόλλας guar, στον μονωμένο πυθμένα πηγαδιού. Στη συνέχεια, αφού η ρηγμάτωση έχει προχωρήσει, εκχύεται στα κενά ένα μείγμα αποτελούμενο από το αντιδρών μέσο (π.χ. σίδηρο), κόλλα guar και σκόνη το οποίο θα σχηματίσει τη ζώνη επεξεργασίας των ρυπαντών. Η κόλλα guar στη συνέχεια αποδομείται σε αβλαβή προϊόντα.

Τα ρήγματα που σχηματίζονται έχουν πάχος μέχρι 8 εκατοστά, και έτσι ίσως χρειαστούν πάνω από ένα ρήγμα για την επίτευξη του απαιτούμενου χρόνου παραμονής στη ζώνη επεξεργασίας. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι είναι σχετικά φτηνή, ότι μπορούν να κατασκευαστούν φράγματα σε βάθη μέχρι 80 πόδια (25 μέτρα) και ότι δεν απαιτείται εκσκαφή. Μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η δυσκολία στον έλεγχο της κατεύθυνσης της ρηγμάτωσης, και το ότι εφαρμόζεται σε περιορισμένους εδαφικούς σχηματισμούς.

2. Βαθιά ανάμειξη εδάφους (Deep Soil Mixing)

Αν και αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται συνήθως για την κατασκευή αδιαπερατών φραγμάτων, θα ήταν πιθανό να εφαρμοστεί για την εισαγωγή ενός αντιδρώντος μέσου και τη δημιουργία ενός αντιδρώντος κελιού. Δεν έχει εφαρ-

μοστεί ποτέ εμπορικά, αφού με τη μέθοδο αυτή δεν μπορεί να αντικατασταθεί πλήρως το έδαφος με το αντιδρών μέσο, αλλά μόνο σε ποσοστό 40 – 60 %.

3. Η εισαγωγή υλικών υπό πίεση (Jetting)

Και αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται συνήθως για την κατασκευή αδιαπέρατων φραγμάτων, τα οποία σχηματίζονται με την υπό πίεση εισαγωγή ρευστοκονιάματος στο έδαφος σε στήλες.

Για την κατασκευή διαπερατών φραγμάτων, αντί για ρευστοκονίαμα, θα μπορούσε να εκτοξευθεί το αντιδρών υλικό, όπως για παράδειγμα σίδηρος. Επειδή με τη διαδικασία αυτή έρχονται στην επιφάνεια εδαφικά σωματίδια, η τοποθέτηση του αντιδρώντος υλικού θα προκαλούσε αύξηση της διαπερατότητας της στήλης. Πρόβλημα ίσως δημιουργηθεί από το μέγεθος του αντιδρώντος υλικού, αφού αν δεν τροποποιηθούν τα εξαρτήματα θα πρέπει να είναι σε μέγεθος αργίλου (βιοαποικοδομήσιμη λάσπη).

6.4 ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΙ ΤΟΙΧΟΙ (Funnel Walls) (Suthersan, S.S., 1999)

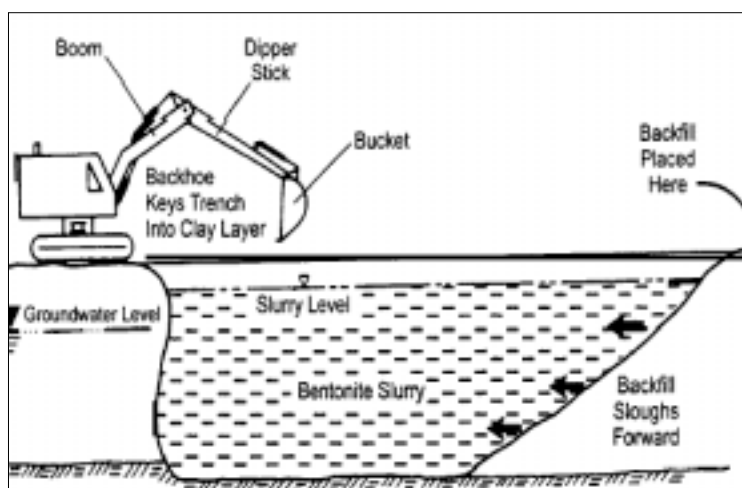
Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από αδιαπέρατα ή λιγότερο διαπερατά υπόγεια φράγματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τοίχοι αποκοπής του νερού σε ένα Σύστημα Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων. Ο σκοπός των τοίχων αποκοπής είναι να δημιουργήσουν ένα αδιαπέρατο φράγμα που θα αναγκάζει το ρυπασμένο νερό να κινηθεί διαμέσου της διόδου, όπου και θα εξυγιανθεί. Εγκαθίστανται 5ft μέσα στο αδιαπέρατο υποκείμενο στρώμα του υδροφορέα. Τα πιο συνηθισμένα είδη τοίχων αποκοπής είναι οι τοίχοι από λάσπη (slurry walls), οι τοίχοι από ενωμένα φύλλα ατσαλιού (steel sheet pile walls) και οι γεωμεμβράνες (geomembranes). Βέβαια έχουν εμφανιστεί και ορισμένες καινοτόμες μέθοδοι κατασκευής αδιαπέρατων τοίχων που αναλύονται παρακάτω.

6.4.1 Τοίχοι Από Λάσπη (Slurry Walls)

(www.inquip.com/brochure.html)

Οι τοίχοι αυτοί κατασκευάζονται με την τεχνολογία εκσκαφής, γνωστή ως “Μέθοδος διάνοιξης τάφρων με τη χρήση λάσπης μπετονίτη”. Στη μέθοδο αυτή τα κάθετα τοιχώματα στηρίζονται με το να διατηρείται η τάφρος γεμάτη με λάσπη μπετονίτη κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Η υδροστατική πίεση της λάσπης είναι η πρωταρχική δύναμη σταθεροποίησης σε κορεσμένα εδάφη. Έτσι με τη μέθοδο αυτή έγινε δυνατή εκσκαφή στενών κάθετων τάφρων σε εδάφη που δε θα μπορούσαν να σταθούν χωρίς στήριξη ή αφαίρεση του νερού, και ιδιαίτερα σε εδάφη κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα (Εικόνα 6-16). Στη συνέ-

χεια οι τάφροι γεμίζονται με αδιαπέρατα υλικά, ή υλικά χαμηλής αγωγιμότητας τα οποία παίρνουν τη θέση της λάσπης και σχηματίζεται τελικά ο τοίχος αποκοπής.

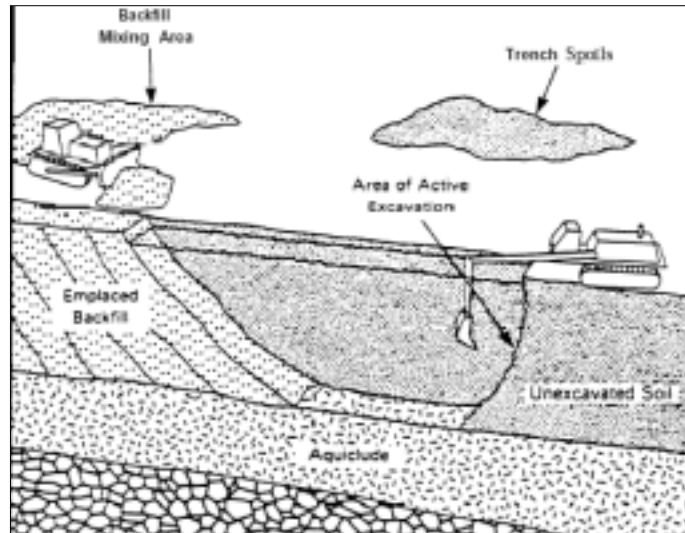


Εικόνα 6-16 Τοίχοι από λάσπη(Suthersan, S.S., 1999)

Με την τεχνολογία αυτή επιτυγχάνεται η εγκατάσταση υπόγειων τοίχων αποκοπής μικρής αγωγιμότητας, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από τα υλικά που περιέχουν. Έτσι έχουμε τους παρακάτω τύπους

□ Τοίχοι από Έδαφος-Μπετονίτη (S-B)

Η επιλογή ενός τοίχου από Έδαφος-Μπετονίτη σε σύγκριση με τις άλλες κατασκευές βασίζεται κυρίως στον οικονομικό παράγοντα.



Εικόνα 6-17 Τοίχοι από Έδαφος-Μπετονίτη
(Environics Directorate U.S Air Force,1997)

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται και για την τσιμεντοποίηση του πυρήνα από λάσπη στα φράγματα, την εγκατάσταση πηγαδιών ή δεξαμενών. Είναι επίσης δυνατόν να συνδυαστεί και με άλλες μεθόδους για να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα. Τα φράγματα από S-B είναι περισσότερο οικονομικά όταν το βάθος της εκσκαφής είναι μέσα στις δυνατότητες των μηχανημάτων εκσκαφής (συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που έχουν τροποποιηθεί για να φτάνουν σε μεγάλα βάθη των 80 feet), και όταν το υλικό της εκσκαφής μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για την πλήρωση του φράγματος. Έχει προκύψει ότι αυτά είναι αποτελεσματικά ως αποστραγγιστικά φράγματα. Οι διαπερατότητες που είναι δυνατόν να έχουν είναι από 10^{-6} μέχρι και κάτω από 10^{-7} cm/sec.

□ **Τοίχοι από Έδαφος -Τσιμέντο-Μπετονίτη (S-C-B)**

Οι τοίχοι από Έδαφος -Τσιμέντο-Μπετονίτη αποτελούν την τελευταία εξέλιξη στις τομέα αυτό. Προσπαθούν να διατηρήσουν την χαμηλή διαπερατότητα των φραγμάτων S-B σε ένα υλικό με μετριασμένη στερεότητα. Αυτή η τεχνική μπορεί να πλεονεκτεί όταν το υλικό της εκσκαφής μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για την πλήρωση του φράγματος, ελαχιστοποιώντας έτσι τον απορριπτόμενο όγκο υλικών.

Οι τοίχοι S-C-B χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τους τοίχους S-C-B, τους τσιμεντένιους τοίχους, και τους τοίχους που κατασκευάζονται με ανάμι-

ξη στερεών στο πεδίο, συγχωνεύοντας τσιμέντο και μπετονίτη. Οι τοίχοι S-C-B είναι γενικώς ρηχοί (λιγότερο από 50 feet) και κατασκευάζονται σχεδόν πανομοιότυποι με τους τοίχους S-B μόνο που προστίθεται και τσιμέντο εκτός από το μπετονίτη στο έδαφος. Συνήθως τα εδάφη που χρησιμοποιούνται για να πληρωθούν οι τοίχοι είναι αυτά της τοπικής περιοχής και μια τυπική διαπερατότητα που αποκτάει η κατασκευή είναι της τάξεως των 10^{-6} cm/sec. Οι τοίχοι S-C-B συνήθως έχουν αντοχή συμπίεστικότητας (UCS) της τάξεως των 5 έως 250 psi.

Οι τσιμεντένιοι τοίχοι προτιμούνται όταν απαιτούνται πιο βαθιά φράγματα. Όταν περιέχουν μικρό ποσοστό μπετονίτη εμφανίζουν συμπίεστικότητα από 500-1500 psi και μπορεί να χρησιμοποιηθούν άμμος ή ιπτάμενη στάχτη αντί του εδάφους, ως βασικό συστατικό της πλήρωσης. Προτιμούνται όχι μόνο όταν απαιτούνται πιο βαθιά φράγματα, αλλά και όταν επιθυμείται μια σχετική σταθεροποίηση των ενωμένων στερεών μετά την κατασκευή των φραγμάτων. Τα συστατικά των τσιμεντένιων τοίχων αναμειγνύονται σε ειδικούς χώρους ώστε να επιτυγχάνεται η σωστή αναλογία.

Άλλα υλικά που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στη θέση του τσιμέντου και του μπετονίτη για να επιτευχθούν ελάχιστα διαφορετικές ιδιότητες ή για να μειωθεί το κόστος είναι: πηλός, ιπτάμενη τέφρα, τσιμέντο με σκουριά μετάλλου (slag cement), γύψος και άλλα παρόμοια υλικά.

□ **Τοίχοι από Τσιμέντο-Μπετονίτη (C-B)**

Στους τοίχους από Τσιμέντο-Μπετονίτη χρησιμοποιείται μια λάσπη μπετονίτη που περιλαμβάνει τσιμέντο με σκοπό να σταθεροποιηθούν τα τοιχώματα του τοίχου κατά την διάρκεια της εκσκαφής. Μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής το τσιμέντο προκαλεί την σκλήρυνση της λάσπης και έτσι δεν είναι απαραίτητο να πληρωθεί ο τοίχος. Ο τοίχος αποκοπής από C-B δεν περιέχει άλλα αδρανή υλικά εκτός από ελάχιστα στερεά εδάφους από την διαδικασία της εκσκαφής. Ο Μπετονίτης είναι το μέσο που διατηρεί το τσιμέντο σε διαθεσιμότητα μέχρι την τοποθέτηση του.

Η ισχύς και η πλαστικότητα του σκληρού φράγματος C-B ποικίλει ανάλογα με το λόγο νερού-τσιμέντου και το είδος του τσιμέντου. Μεγάλη ισχύς σημαίνει χαμηλή πλαστικότητα. Τα μείγματα μπορεί να γίνουν έτσι ώστε να επιτευχθεί αντοχή συμπίεστικότητας από 5 μέχρι πάνω από 20 psi σε 28 μέρες.

Πρόσθετα υλικά χρησιμοποιούνται για να επιτευχθούν ελάχιστα διαφορετικές ιδιότητες ή για να μειωθεί το κόστος. Για παράδειγμα χρησιμοποιείται στάχτη όταν είναι επιθυμητή η αύξηση της πυκνότητας της λάσπης ή η μείωση του περιεχομένου σε τσιμέντο. Οι διαπερατότητες που είναι δυνατόν να έχουν είναι από 10^{-5} μέχρι 10^{-6} cm/sec αλλά μπορεί να επιτευχθούν και χαμηλότερες διαπερατότητες.

Οι λόγοι που συνιστούν την επιλογή τοίχων από **Τσιμέντο-Μπετονίτη** αντί των τοίχων από **Έδαφος- Μπετονίτη** είναι οι εξής:

- ✓ Σχεδιαστικές απαιτήσεις αντοχής του πληρωτικού υλικού.
- ✓ Ενδεχόμενη αστάθεια του τοίχου λόγω της ύπαρξης μαλακών και χαλαρών ζωνών εδάφους ή γειτονικές υπερφορτίσεις.
- ✓ Οι συνθήκες της περιοχής που εμποδίζουν την προετοιμασία του μείγματος S-B μέσα στο χαντάκι
- ✓ Τα υλικά πλήρωσης στην S-B μπορεί να μην είναι διαθέσιμα ή να κοστίζουν αρκετά.

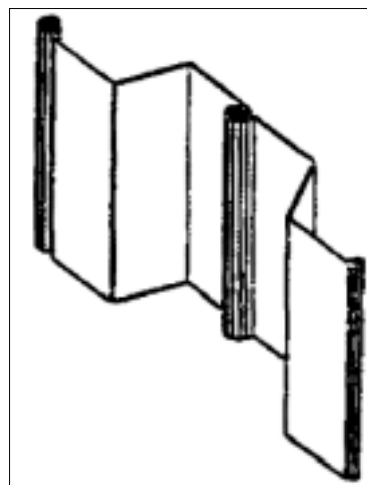
□ **Λασπώδεις τοίχοι από τσιμέντο.**

Οι λασπώδεις τοίχοι από τσιμέντο σχεδιάζονται για να αντέχουν την φόρτιση. Αυτοί οι τοίχοι πληρώνονται με τσιμέντο και ενισχύονται με χάλυβα. Συναντάμε δυο είδη στην κατασκευή φραγμάτων: τα διαφράγματα (κατασκευάζονται στο πεδίο) και τα φράγματα που είναι προκατασκευασμένα. Τα διαφράγματα είναι οι πιο διαδεδομένη μορφή Τσιμεντένιων slurry walls. Τα προκατασκευασμένα Τσιμέντο slurry walls είναι φτιαγμένα χρησιμοποιώντας προκατασκευασμένα τσιμεντένια καλούπια, είτε ενισχυμένα είτε προεντεταμένα, που τοποθετούνται στα χαντάκια.

6.4.2 Τοίχοι Από Ενωμένα Φύλλα Ατσαλιού (Sheet Pile Walls) (Suthersan, S.S., 1999)

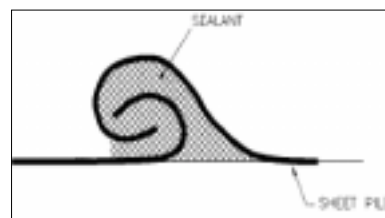
Ένα άλλο είδος υπόγειων φραγμάτων είναι οι αδιαπέρατοι ή οι χαμηλής διαπερατότητας τοίχοι από ενωμένα ατσάλινα φύλλα, εγκαταστημένα κάθετα στη ροή του υπόγειου νερού.

Παρόλα αυτά, από το κενό ανάμεσα σε γειτονικά φύλλα ενδέχεται να παρουσιαστεί διαρροή ρυπασμένου υπόγειου νερού το οποίο δε θα περάσει από τη δίοδο για επεξεργασία.



Εικόνα 6-18 Sheet Pile Walls
(Envionics Directorate U.S Air Force,1997)

Πρόσφατα, για την αποφυγή αυτού του φαινομένου, έχει επικρατήσει η μέθοδος της μόνωσης των συνδέσμων γειτονικών φύλλων του ατσαλιού, ιδιαίτερα στα συστήματα των *Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων*. Η καινοτομία στην τεχνολογία αυτή, γνωστή ως Waterloo BarrierTM, είναι ο σχηματισμός κοιλοτήτων στις ενώσεις των φύλλων οι οποίες μονώνονται.



Εικόνα 6-19 Μονωμένος σύνδεσμος
(Suthersan, S.S., 1999)

Εκτεταμένες δοκιμές πεδίου έδειξαν πως με τη μέθοδο αυτή μπορούν να επιτευχθούν συνολικές υδραυλικές αγωγιμότητες με τιμές μικρότερες των 10^{-8} cm/s.

Τα φράγματα αυτά μπορούν να εγκατασταθούν χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους τοποθέτησης πασσάλων. Ανάλογα με το είδος του εδάφους χρησιμοποιούνται πασσαλοπήκτες δόνησης ή επαφής. Οι πασσαλοπήκτες δόνησης είναι κατάλληλοι για τις περισσότερες εδαφικές συνθήκες, αλλά σε συνεκτικά εδάφη καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με τους πασσαλοπήκτες επαφής.



Εικόνα 6-20 Εγκατάσταση Waterloo BarrierTM με δόνηση
(www.oceta.on.ca/profiles/wbi/barrier.html)

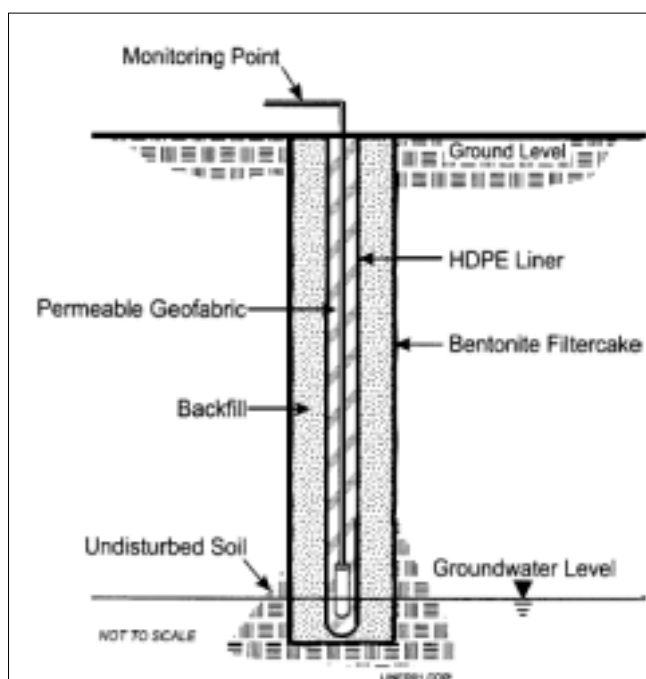
Μετά την εγκατάσταση των φύλλων, οι κοιλότητες ψεκάζονται με νερό για την απομάκρυνση του εδάφους που έχει εγκλωβιστεί μέσα στα κενά. Στη συνέχεια, ανάλογα με τις συνθήκες της περιοχής, τα κενά μονώνονται με τσιμεντοειδή πολυμερή με βάση τον πηλό, ή άλλα μονωτικά.

Οι πιθανές διαρροές διαμέσου του φράγματος περιορίζονται στους μονωμένους συνδέσμους, γι' αυτό και οι σύνδεσμοι πρέπει να επιθεωρούνται πριν από τη μόνωση, έτσι ώστε να επιβεβαιωθεί πως όλο το μήκος της κοιλότητας είναι καθαρό και μπορεί να μονωθεί. Κάθε σύνδεσμος μονώνεται από τον πάτο προς την κορυφή με την εφαρμογή του μονωτικού σε όλο του το μήκος.

6.4.3 Σύνθετα Λασπώδη Φράγματα

(www.usace.army.mil/inet/usace-docs/design-guides/dg1110-345-117/c-7.pdf)

Σε αυτά τα φράγματα πολλαπλών στρωμάτων συναντάμε τρία είδη τοίχων, καθένας από τους οποίους εμφανίζει αυξημένη χημική αντίσταση και πολύ χαμηλή διαπερατότητα. Αποτελούνται από ένα εξωτερικό φίλτρο συμπαγούς Μπετονίτη πάχους 1/8 in, ένα μεσαίο στρώμα πάχους 1-2 ft από Έδαφος-Μπετονίτη, Τσιμέντο-Μπετονίτη, ή Πλαστικό-Τσιμέντο και μια εσωτερική γεωμεμβράνη 100 mil, (Εικόνα 6-21). Το HDPE εμφανίζει διαπερατότητα $1 \cdot 10^{-12}$ cm/s.

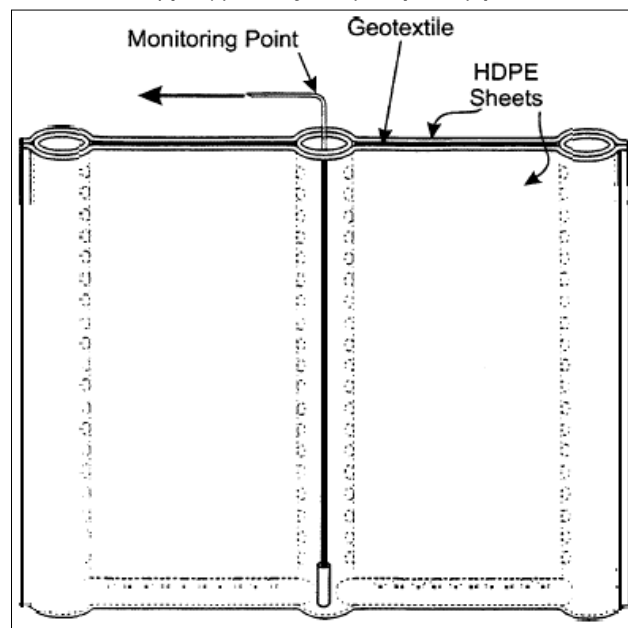


Εικόνα 6-21 Σύνθετα λασπώδη φράγματα
(Environics Directorate U.S Air Force, 1997)

Η εγκατάσταση ενός σύνθετου φράγματος ξεκινά με τη Μέθοδο διά-νοιξης τάφρων με τη χρήση λάσπης μπετονίτη. Με την τεχνική αυτή διατηρεί-ται η σταθερότητα της τάφρου και είναι δυνατόν να γίνουν εκσκαφές μεγαλύ-τερες από 100 ft. Εξαιτίας, όμως, της δυσκολίας τοποθέτησης της HDPE γεωμεμβράνης σε αυτά τα βάθη και του υψηλού κόστους αυτής της τοποθέτησης, η χρήση των HDPE περιορίζεται σε βάθος 50 ft .

Ο φάκελος γεωμεμβράνης εγκαθίστανται κάθετα τμηματικά στη λα-σπώδης τάφρο είτε στηριζόμενος πάνω σε μια αποσυνδεδεμένη, μετακινήσιμη κορνίζα, και ασκώντας δύναμη προς τα κάτω με βάρος προσαρμοσμένο στο κάτω μέρος της μεμβράνης, ή οδηγώντας την προς τα κάτω με πασσαλόπηκτη. Όταν η γεωμεμβράνη έχει τοποθετηθεί, η τάφρος πληρώνεται με υλικό σε κάθε πλευρά της. Στο εσωτερικό της γεωμεμβράνης μπορεί να τοποθετηθεί ένα σύ-στημα αποστράγγισης στο οποίο είναι δυνατόν να εγκατασταθούν σημεία δειγ-ματοληψίας με σκοπό την παρακολούθηση της απόδοσης του συστήματος.

Στα πλεονεκτήματα ενός σύνθετου φράγματος συμπεριλαμβάνονται η πολύ χαμηλή διαπερατότητα, η υψηλή αντίσταση στην αποικοδόμηση, η δυνατότητα εγκατάστασης ενός συστήματος παρακολούθησης μέσα στη μεμβράνη και η ικανότητα απομόνωσης και επιδιόρθωσης τομείς του τοίχου χωρίς την απομάκρυνση ολόκληρου του φακέλου της μεμβράνης.



Εικόνα 6-22 Σύστημα παρακολούθησης στα
Σύνθετα λασπώδη φράγματα
(Environics Directorate U.S Air Force, 1997)

Η εκσκαφή της τάφρου περιορίζεται από το είδος του γεωλογικού μέσου και ένας κλασικός εκσκαφέας μπορεί να είναι ικανοποιητικός. Μηχανές εκσκαφής, εκσκάφτηκα με κουβά διπλοσάγονο και μηχανές που σκάβουν τάφρους είναι αποτελεσματικές στην εκσκαφή των περισσότερων ασυνεχών εδαφών, αλλά τα εκσκάφτηκα με κουβά διπλοσάγονο είναι δυνατόν να μετακινήσουν και ογκόλιθους όπου χρειάζεται.

6.4.4. Καινοτόμες Τεχνικές Αδιαπέρατων Τοίχων

Εκτός από τα τρία προηγούμενα είδη αδιαπέρατων τοίχων, που συνήθως χρησιμοποιούνται, τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί καινοτόμες τεχνικές στην εγκατάσταση των αδιαπέρατων φραγμάτων σε συστήματα Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων.

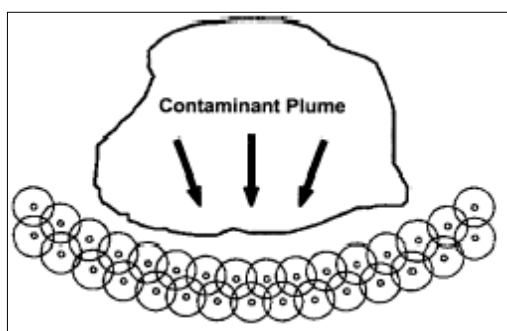
Επειδή στις μεθόδους αυτές δεν γίνεται εκσκαφή, μειώνονται σημαντικά οι κίνδυνοι για την υγεία των εργατών κατά την εγκατάσταση των φραγμάτων. Παρόλα αυτά, ο ειδικός εξοπλισμός που απαιτείται είναι πιο ακριβός από τα

συμβατικά μέσα εκσκαφής και στη λειτουργία αλλά και στη συντήρηση. Οι νέες αυτές τεχνικές είναι :

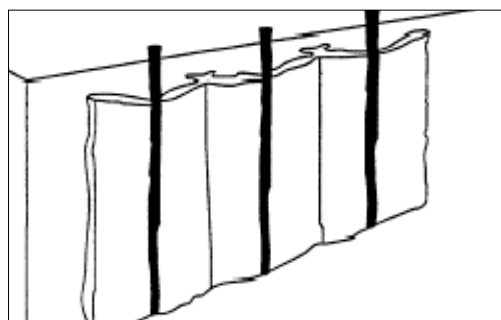
1. Η έκχυση ρευστοκονιάματος με πίεση (Jetting)
2. Η βαθιά ανάμειξη εδάφους (Deep soil mixing)

4.1 Αδιαπέρατοι τοίχοι από έκχυση ρευστοκονιάματος (Jetting)

Στη μέθοδο αυτή, εκχύνονται υπό υψηλή πίεση μείγματα τσιμέντου από τα ανοίγματα της κεφαλής ειδικών τρυπανιών καθώς βρίσκονται μέσα στο έδαφος. Το ρευστοκονίαμα, λόγω της υψηλής πίεσης, παίρνει τη θέση του εδάφους και έτσι μπορούν να σχηματιστούν αδιαπέρατα φράγματα σε βάθη έως και 130 πόδια (40 μέτρα). Με βάση το αν περιστρέφεται το τρυπάνι ή όχι καθώς βγαίνει από το έδαφος, το φράγμα που δημιουργείται είναι μια στήλη ρευστοκονιάματος ή ένας λεπτός τοίχος διάφραγμα (Εικόνες 6-23 και 6-24).



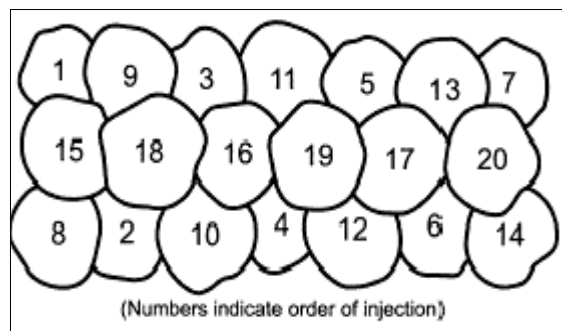
Εικόνα 6-23 Στήλες ρευστοκονιάματος
(Environics Directorate U.S Air Force,1997)



Εικόνα 6-24 Τοίχος διάφραγμα
(Environics Directorate U.S Air Force,1997)

Στην περίπτωση που θα δημιουργηθεί αδιαπέρατος τοίχος από στήλες ρευστοκονιάματος, χρησιμοποιείται η παρακάτω μέθοδος. Συνήθως, το φράγμα σχηματίζεται από δύο ή τρεις σειρές επικαλυπτόμενων και αλληλοσυνδεόμενων στηλών.

Αν θα δημιουργηθούν τρεις σειρές, εκχύνονται πρώτα οι δύο εξωτερικές σειρές, με τις στήλες να κατασκευάζονται εναλλάξ. Η σειρά έκχυσης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα



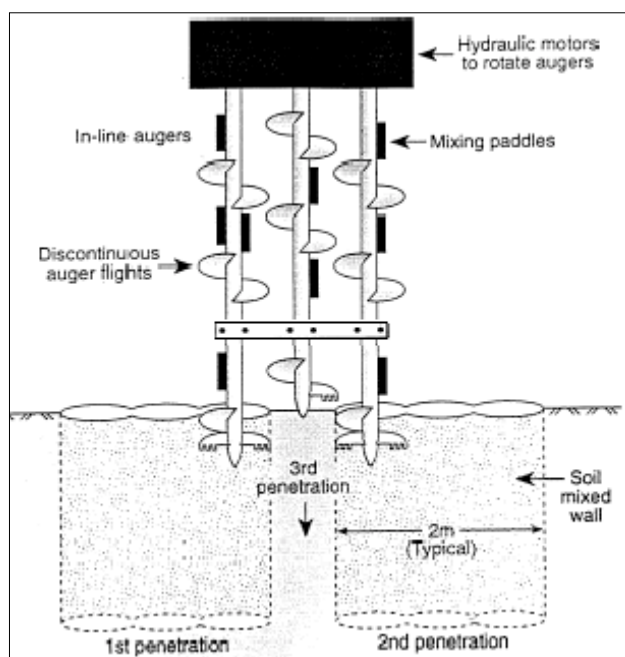
Εικόνα 6-25 Σειρά έκχυσης στηλών ρευστοκονιάματος
(Environics Directorate U.S Air Force, 1997)

Ανάλογα με το πόσες από τις τρεις οπές του τρυπανιού χρησιμοποιούνται , υπάρχουν τρεις παραλλαγές της μεθόδου. Όταν χρησιμοποιείται μόνο μία οπή , εκχύεται μόνο μείγμα τσιμέντου-μπετονίτη στο έδαφος. Όταν χρησιμοποιούνται δύο οπές εκχύεται μείγμα τσιμέντου-μπετονίτη και συμπιεσμένος αέρας και όταν χρησιμοποιούνται τρεις οπές εκχύεται μείγμα τσιμέντου-μπετονίτη, συμπιεσμένος αέρας και νερό. Ο συμπιεσμένος αέρας και το νερό βοηθούν στην απομάκρυνση των εδαφικών σωματιδίων. Η τυπική σύσταση των στηλών και των τοίχων διαφραγμάτων είναι 50% έδαφος και 50 % ρευστοκονίαμα.

4.2 Αδιαπέρατοι τοίχοι από βαθιά ανάμειξη εδάφους (Deep soil mixing)

Αδιαπέρατα φράγματα σε συστήματα Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων μπορούν να εγκατασταθούν με τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού , με τον οποίο εκχύεται μια λάσπη μπετονίτη-νερού και/ή μια λάσπη τσιμέντου απευθείας στο έδαφος. Μια τέτοια μέθοδος απαιτεί και βαθιά ανάμειξη εδάφους, στην οποία ειδικά τρυπάνια εδάφους εξοπλισμένα με πτερύγια ανάμειξης, ανακατεύουν το έδαφος καθώς περιστρέφονται. Ταυτόχρονα, μια λάσπη μπετονίτη εισάγεται από τον κούφιο κορμό των τρυπανιών κατή την άνοδο τους προς την επιφάνεια (Εικόνα 6-26).

Ο αδιαπέρατος τοίχος σχηματίζεται με τις διαδοχικές επικαλυπτόμενες διεισδύσεις των τρυπανιών, οι οποίες δημιουργούν μια σειρά από στήλες αποτελούμενες από έδαφος σε ποσοστό 40-60% και από ρευστοκονίαμα σε ποσοστό 60-40%.



Εικόνα 6-26 Βαθιά ανάμειξη εδάφους
(Enviroconics Directorate U.S Air Force, 1997)

Με τη μέθοδο αυτή κατασκευάζονται φράγματα σε βάθη έως και 120 πόδια (40 μέτρα) και επιτυγχάνονται διαπερατότητες της τάξεως των 10^{-7} cm/s. Εφαρμόζεται συνήθως σε μαλακά εδάφη και είναι φθηνότερη από τη μέθοδο έκχυσης ρευστοκονιάματος.

Τέλος στον Πίνακα 6-3 δίνονται οι διαπερατότητες που έχουν οι διάφοροι τύποι 'αδιαπέρατων' τοίχων.

ΥΛΙΚΑ	Διαπερατότητα (lab) cm/s $\times 10^{-8}$	Διαπερατότητα (field) cm/s $\times 10^{-8}$
Bentonite slurry	5	50
Cement- Bentonite	3	100
Compacted soil- Bentonite	0.1	10
Soil-Cement	0.5	50
Cement-Grout	0.1	1000
Concrete	0.1	-
Silicate grout	47	10000

From Boscardin, M.D. and Ostendorf, D. W., Cutoff walls to contain petroleum contaminated soils, in Petroleum Contaminated Soils, Calabrese, E. J. and Kostecki, P. T., Eds., Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 1989. With permission

Πίνακας 6-3 Διαπερατότητα τοίχων σε εργαστήριο και στο πεδίο
(Suthersan, S.S., 1999)

6.5 ΠΑΤΕΝΤΑΡΙΣΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Από το 1992 μέχρι και σήμερα, έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μέθοδοι κατασκευής υπογείων διαπερατών φραγμάτων στον Καναδά, στις Η.Π.Α και στην Ευρώπη. Ορισμένες από αυτές τις μεθόδους κατασκευής έχουν εφαρμοστεί ή δοκιμαστεί στο πεδίο. Άλλες έχουν προταθεί για εφαρμογή αλλά δεν έχουν ακόμα υιοθετηθεί. Οι κυριότερες μέθοδοι είναι:

6.5.1 Τάφρος Με Τύρφη Ως Πληρωτικό Υλικό

Στο Πανεπιστήμιο της Νότιας Καρολίνας αναγνωρίστηκε μια πατέντα στις 15 Οκτωβρίου του 1991, για μια μέθοδο *in situ* απομάκρυνσης υδρογονανθράκων από το υπόγειο νερό χρησιμοποιώντας ένα διαπερατό φράγμα από τύρφη ή ένα στρώμα ακινητοποιημένου θρεπτικού υλικού και ένα στρώμα τύρφης σε σειρά. Θεωρείται πως μια ανοιχτή τάφρος έχει εκσκαφθεί και στη συνέχεια πληρωθεί με αντιδρών μέσο. Η μέθοδος κατασκευής είναι απλή και σχετικά φτηνή.

Τα ειδικά κόστη για ανοιχτές τάφρους είναι κυρίως τα κόστη για εκσκαφή, απόρριψη του χώματος, χαμήλωμα του υδροφόρου ορίζοντα και αν είναι απαραίτητο για τη σταθεροποίηση του ανοιχτού χαντακιού.

Τα πραγματικά κόστη, χωρίς σταθεροποίηση κυμαίνονται από 10-100 US\$/m². Τα κόστη για τη σταθεροποίηση κυμαίνονται από 50-100 US\$/m².

6.5.2 Τάφρος Χωρίς Στερεό Πληρωτικό Μέσο

Το Φεβρουάριο του 1992 μια γερμανική ευρεσιτεχνία αναγνωρίστηκε στους Dr. Haldenwang and Dr. Eichhorn, για την κατασκευή μιας τάφρου χωρίς στερεό μέσο. Τα τοιχώματα της τάφρου είναι σταθεροποιημένα, διαπερατά, και το υπόγειο νερό ρέει διαμέσου τους. Επιπρόσθετα, προτάθηκε η τοποθέτηση σωληνώσεων για αερισμό ή για την κυκλοφορία του νερού μέσα στην ανοιχτή τάφρο, έλεγχος εκπομπών και σκέπασμα της τάφρου.

Δεν χρησιμοποιείται στερεό μέσο ως αντιδρών μέσο, αλλά με βάση τη χρήση της τάφρου σαν ένα υπόγειο φράγμα, αυτή η μέθοδος συγκαταλέγεται στην ομάδα των Διαπερατών Αντιδρώντων Φραγμάτων (PRBs). Για τη σταθεροποίηση των τοιχωμάτων έχουν προταθεί ενωμένα φύλλα ατσαλιού.

Τα ειδικά κόστη εκτιμήθηκαν από 200-400 US\$/m² χωρίς να περιλαμβάνουν την προετοιμασία ή άλλες εγκαταστάσεις αερισμού.

6.5.3 Τάφρος Με Στερεό Πληρωτικό Μέσο

Σε πολλές περιπτώσεις, έχουν σχεδιαστεί ή κατασκευαστεί ανοιχτές τάφροι γεμισμένες με αντιδρών μέσο. Για τη σταθεροποίηση του ανοιχτού χαντακιού της εκσκαφής έχουν χρησιμοποιηθεί κάθετα φύλλα ατσαλιού, τα οποία αφαιρούνται μετά από την πλήρωση της τάφρου με το αντιδρών μέσο. Το μέγιστο πλάτος του φράγματος εξαρτάται από την απόσταση που έχουν πακτωθεί τα ατσάλινα φύλλα.

Ένα μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι το ότι δε υπάρχει ένα στρώμα φιλτραρίσματος ανάμεσα στο πληρωτικό υλικό και το έδαφος για την αποφυγή της εισροής λεπτόκοκκων εδαφικών σωματιδίων. Επίσης δεν είναι δυνατή η ανάκτηση του πληρωτικού μέσου χωρίς την καταστροφή της κατασκευής. Τα ειδικά κατασκευαστικά κόστη (χωρίς το αντιδρών μέσο), κυμαίνονται από 100-200 US\$/m².

6.5.4 Κατασκευή Τοίχου Επεξεργασίας Από Την Wci-Umwelttechnik Gmbh

Η WCI -Umwelttechnik GmbH έχει αναπτύξει μια ειδική μέθοδο για την κατασκευή τάφρου επεξεργασίας που επιτρέπει την ανάκτηση του πληρωτικού υλικού χωρίς την καταστροφή της κατασκευής. Το πατενταρισμένο σύστημα περιλαμβάνει στρώματα φιλτραρίσματος για την αποφυγή της εισροής λεπτόκοκκων εδαφικών σωματιδίων στο πληρωτικό υλικό και μέτρα για την αποφυγή δημιουργίας στερεών επικαθίσεων από την οξείδωση του σιδήρου και του μαγνησίου.

Τα κύρια σχεδιαστικά συστατικά είναι:

- Ένα στρώμα φιλτραρίσματος, αποτελούμενο από χαλίκια ή πακέτα άμμου, τοποθετημένο ανάμεσα στα τοιχώματα της τάφρου και στα στοιχεία του εσωτερικού τοίχου.
- Εσωτερικός τοίχος, φτιαγμένος από ειδικά σχεδιασμένα τούβλα ή κελύφη τσιμέντου, για τον οριοθέτηση ενός ανοίγματος για το πληρωτικό υλικό, συμπεριλαμβανομένων ανοιγμάτων για διέλευση του υπόγειου νερού και οριζόντια στοιχεία για τη σταθεροποίηση της πίεσης του εδάφους.
- Ένα κάλυμμα από πηλό για την αποφυγή της εισροής βρόχινου νερού και την επαφή του πληρωτικού μέσου με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο.
- Μια πλάκα ως συσκευή ανοίγματος, για την ανάκτηση και την αντικατάσταση του πληρωτικού μέσου. Αυτή η πλάκα μπορεί να είναι αδιάβροχη και να κλείνει αεροστεγώς.

Τα κόστη κατασκευής για ένα φράγμα 8 μέτρων βάθους κυμαίνονται από 850-1400 DM/m² (500-900 US\$/m²) χωρίς το πληρωτικό μέσο. Για τη χρήση ενός στρώματος ενεργού άνθρακα πάχους 30 εκατοστών το επιπρόσθετο κόστος είναι 300 DM/m² ή 180 US\$/m².

6.5.5 Πατενταρισμένη Κατασκευή Από Τον Dr. Steffen Ingenieurgesellschaft

Άλλη μια μέθοδος κατασκευής στην τεχνολογία των λασπωδών τοίχων (slurry walls) δημιουργήθηκε τον Ιούνιο του 1992 από ένα γερμανό σύμβουλο τον Dr. Steffen Ingenieurgesellschaft. Η ιδέα ήταν να εισαχθούν στο έδαφος ατσάλινα φύλλα (steel sheet piles) ή διπλοί ατσάλινοι δοκοί σχήματος T και στη συνέχεια να εκχυθεί ενεργός άνθρακας τραβώντας έξω τα δοκάρια. Με τη διαδικασία αυτή θα σχηματιστεί ένας συνεχής τοίχος αντιδρώντος υλικού πάχους περίπου 0.10- 0.15 m. Ανάλογα με τη γεωλογία της περιοχής, μπορούν να επιτευχθούν βάθη έως 20 m ή και περισσότερο. Όταν η ικανότητα προσρόφη-

σης του τοίχου έχει μειωθεί πολύ, κατασκευάζεται ένας δεύτερος τοίχος στα ανάντη.

Το αρνητικό της μεθόδου είναι πως δεν υπάρχει στρώμα φιλτραρίσματος και το αντιδρών μέσο δεν μπορεί να ανακτηθεί. Τέτοια κατασκευή τοίχου μπορεί εύκολα να μπλοκαριστεί από την εισροή λεπτόκοκκων εδαφικών σωματιδίων ή από την κατακρήμνιση μετάλλων. Το κόστος εκτιμάται στα 200 US\$/m² χωρίς το πληρωτικό υλικό.

6.5.6 Μέθοδος Των Πηγαδιών Μεγάλης Διαμέτρου

Αυτή η μέθοδος κατασκευής εφαρμόζεται στις Η.Π.Α και στη Γερμανία. Συνήθως, επιλέγονται διάμετροι πηγαδιών από 0.8 – 1.6 m. Μεμονωμένα πηγάδια τοποθετημένα σε σειρές, είναι γνωστά ως “σιδερένιοι φράχτες” επειδή για πληρωτικό υλικό επιλέγεται συνήθως σίδηρος. Η μέθοδος εφαρμόζεται για συνεχείς αντιδρώντες τοίχους αν τα πηγάδια επικαλύπτονται, ή για τη κατασκευή διόδων επεξεργασίας του υπόγειου νερού. Μπορούν να επιτευχθούν βάθη από 20 -25m, χωρίς κανένα πρόβλημα. Με την επικάλυψη των πηγαδιών γίνεται αποδεκτή η απώλεια πληρωτικού υλικού σε ποσοστό 15-20%.

Ανάλογα με τη γεωλογία, πρέπει να χρησιμοποιηθούν ατσάλινοι σωλήνες για τη σταθεροποίηση των πηγαδιών κατά την εκσκαφή.

Το κόστος της μεθόδου κυμαίνεται από 300-500 US\$/m², χωρίς το πληρωτικό υλικό.

6.5.7 Μέθοδος Της Sax and Klee, Γερμανία

Η Γερμανική κατασκευαστική εταιρία Sax and Klee, GmbH, Mannheim, έχει αναπτύξει μια τροποποιημένη κατασκευή πηγαδιών για ένα σύστημα *Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων*. Η καινοτόμος προσέγγιση περιλαμβάνει τη χρήση πηγαδιών γεμισμένα με αδιαπέρατο πηλό, για τη σύνδεση της διόδου με τα αδιαπέρατα φύλλα του ατσαλιού. Καινοτομία όμως αποτελεί και η εγκατάσταση ενός εσωτερικού πηγαδιού με τέσσερα πτερύγια για τη δη-

μιουργία μιας ζώνης φιλτραρίσματος ανάμεσα στο αντιδρών μέσο και τα περιβάλλοντα εδάφη.

Το κόστος για μια δίοδο 40 μέτρων πλάτους και 19 μέτρα βάθος είναι περίπου 1400 US\$/m², χωρίς το πληρωτικό υλικό.

Για την εξυγίανση μιας περιοχής από υδρογονάνθρακες πετρελαίου και αρωματικές ενώσεις (BTEx), προτάθηκε ενεργοποιημένος από πετρέλαιο άνθρακας ως πληρωτικό υλικό. Η περιοχή περιείχε δεξαμενές του αμερικανικού στρατού.

6.5.8 Συστήματα Συγκλινόντων Φραγμάτων Και Διόδων. Μια Πατέντα Από το University of Waterloo.

Η μέθοδος των “Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδου” θεμελιώθηκε παγκοσμίως τον Απρίλιο του 1992 από το Πανεπιστήμιο του Waterloo στον Καναδά.

Το ρυπασμένο υπόγειο νερό επεξεργάζεται in situ ,με τη διέλευση του από τη δίοδο. Το αντιδρών υλικό μέσα στη δίοδο αποδομεί τους ρυπαντές, ή τους αφαιρεί από το νερό. Ένας μετακινούμενος θάλαμος οδηγείται μέσα στο έδαφος, εκσκάπτεται , και στη συνέχεια ένας υποδοχέας για το πληρωτικό μέσο τοποθετείται στο εσωτερικό του.

Η μεθοδολογία αυτή περιλαμβάνει μια ποικιλία κατασκευαστικών στοιχείων ,όπως ατσάλινα κιβώτια ως υποδοχείς του πληρωτικού υλικού, αδιαπέρατους τοίχους (slurry walls or sheet piles), αποσπώμενα καλάθια μέσα στους υποδοχείς, αποσπώμενους θαλάμους, και άλλα.

Τα κόστη κυμαίνονται από 200-1000 US\$/m², χωρίς το πληρωτικό υλικό.

6.5.9 Μέθοδος Διάνοιξης Τάφρου Με Τη Χρήση Λάσπης Βιο-Πολυμερών

Η Geo-Con, μια θυγατρική εταιρία της Woodward-Clyde, έδωσε την ακόλουθη αναφορά στις 23 του Δεκέμβρη του 1997, την απόδοση ενός προ-

γράμματος Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδου στο Oak Ridge, εκ μέρους του υπουργείου ενέργειας των Η.Π.Α :

“Η Geo-Con πρόσφατα ολοκλήρωσε αυτό που πιστεύουμε ότι είναι ο πρώτος διαπερατός τοίχος που εγκαταστάθηκε με τη μέθοδο διάνοιξης τάφρου με τη χρήση λάσπης Βίο-Πολυμερών. Η διόδος επεξεργασίας αποτελείται από ένα αντιδρών κελί γεμισμένο με σίδηρο μήκους 30 ft ,και ενώνεται με δυο πτερύγια από χαλίκι μήκους 100 ft το καθένα. Το σύστημα έχει πλάτος 2 ft και βάθος 26 ft.”

Ο σκοπός του διαπερατού τοίχου είναι η συλλογή το ρυπασμένου από πτητικούς οργανικούς υδρογονάνθρακες πλουμίου . Η τάφος δέχεται το υπόγειο νερό και το οδηγεί μέσω των χαλικιών στη ζώνη του σιδήρου. Καθώς το υπόγειο νερό κινείται διαμέσου της διόδου οι πτητικοί οργανικοί υδρογονάνθρακες αφαιρούνται.

Το έργο αυτό είχε αρχικά ανατεθεί σε μια άλλη εταιρία. Η κατασκευή του θα γινόταν με εκσκαφή εν ξηρό και στη συνέχεια με πλήρωση με το σίδηρο και τα χαλίκια. Λίγο πριν όμως από την ολοκλήρωση του πρώτου τμήματος του χαντακιού ,βάθους 20 ft , η τάφος κατέρρευσε. Η Geo-Con πρότεινε την ολοκλήρωση του έργου χρησιμοποιώντας μια λάσπη Βίο-Πολυμερών για τη σταθεροποίηση της τάφρου κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης του σιδήρου και των χαλικιών. Οι εργασίες ολοκληρώθηκαν επιτυχώς μέσα σε τρεις μέρες , με μικρό κόστος συγκριτικά με άλλες μεθόδους εγκατάστασης.

Η τεχνική, χωρίς τα πληρωτικά μέσα, κοστίζει από 300-500 US\$/m² .

6.5.10 Άλλες Μέθοδοι Κατασκευής

Υπάρχουν όμως και άλλες μέθοδοι κατασκευής υπογείων διαπερατών φραγμάτων, οι οποίες είναι υπό ανάπτυξη ή υπό συζήτηση. Μερικές από αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Η WCI-Umwelttechnik GmbH μελετά την κατασκευή ενός βαθιού τοίχου χρησιμοποιώντας τροποποιημένες τεχνικές λασπωδών τοίχων σε συνδυασμό με τη χρήση κιβωτίων για την υποδοχή του πληρωτικού μέσου.
- Η Envirotreat Ltd., στην Αγγλία , μελετά την ανάπτυξη συστημάτων ενεργού περιορισμού ρύπων, χρησιμοποιώντας ειδικά πηλώδη υλικά. Η πρόσθεση αντιδρώντων μέσων στα φράγματα από πηλό ερευνάται επίσης. Μια από της μεθόδους κατασκευής που πιθανώς θα εφαρμοστεί είναι τα επικαλυπτόμενα πηγάδια μεγάλης διαμέτρου.
- Πολλές Γερμανικές εταιρίες έχουν προτείνει την εγκατάσταση διόδων στη μορφή τσιμεντένιων κατασκευών για οριζόντια και κάθετη ροή. (WCI-Umwelttechnik GmbH, Essen, Edenkoben, Pescla and Rochmes). Είναι συμβατικές υπόγειες τσιμεντένιες κατασκευές, θάλαμοι ή κιβώτια που περιέχουν αντιδρών μέσο που μπορεί να αντικατασταθεί. Το αρνητικό είναι πως είναι ακριβές και περιορισμένης χρήσης σαν μεμονωμένες κατασκευές διόδων.
- Το “Enviro Wall” είναι σήμα κατατεθέν της εταιρίας “Barrier member Containment Co. Ltd” και του “Agronne National Laboratory”. Με τη βοήθεια της εγκατάστασης ενός κουτιού-οδηγού ,θα εγκατασταθεί μια γεωμεμβράνη τύπου HDPE, και ένα σύστημα συλλογής και αναδιανομής του υπόγειου νερού θα οδηγεί το υπόγειο νερό σε μια υπομονάδα για επεξεργασία. Η ανοιχτή τάφρος θα ξαναγεμιστεί με έδαφος από την περιοχή και θα καλυφθεί με μπετονίτη μετά την εγκατάσταση των μεμβρανών και του οριζόντιου συστήματος συλλογής.

6.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΥ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΡΥΠΑΝΤΗ ΣΤΟ ΑΝΤΙΑΡΩΝ ΚΕΛΙ

6.6.1 Μεθοδολογία Βασισμένη Στον Αριθμό Των Χρόνων Ημιζωής (Star and Cherry, May-June 1994)

Ένας σημαντικός παράγοντας που θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν κατά το σχεδιασμό ενός Συστήματος Συγκλινόντων Φραγμάτων & Διόδων είναι η σχέση μεταξύ του χρόνου συγκράτησης του ρυπασμένου υπόγειου ύδατος και του ρυθμού των αντιδράσεων αποδόμησης των ρύπων στη δίοδο. Ο μέσος χρόνος συγκράτησης στη δίοδο μπορεί να υπολογιστεί διαιρώντας τον όγκο του πορώδους μέσου στην δίοδο με τη παροχή μέσα σ' αυτή.

Μεγαλύτεροι λόγοι συγκεντρώσεων και αργότεροι ρυθμοί (π.χ. μακρύτερη αντίδραση ημιζωής) απαιτούν μακρύτερους χρόνους συγκράτησης.

Για διαδικασίες αποδόμησης που διεξάγονται με αντιδράσεις πρώτης τάξης, ο αναγκαίος χρόνος συγκράτησης για την μείωση της συγκέντρωσης σε μια τιμή που θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$N_{1/2} = [\ln(C_{\text{εκροής}} / C_{\text{εισροής}})] / \ln(1/2)$$

Όπου:

$C_{\text{εκροής}}$: η συγκέντρωση στην εκροή ή στην κατάντη πλευρά του αντιδραστήρα

$C_{\text{εισροής}}$: η συγκέντρωση στην εκροή ή στην ανάντη πλευρά του αντιδραστήρα

$N_{1/2}$: ο αριθμός των ημιζωών που απαιτούνται

Μεγαλύτερη αποκατάσταση μπορεί να επιτευχθεί είτε από γρηγορότερους ρυθμούς αντίδρασης είτε από μεγαλύτερους χρόνους συγκράτησης. Σε μερικές περιπτώσεις είναι πιθανόν να αυξηθεί ο ρυθμός αντίδρασης αν αυξηθεί η επιφάνεια του αντιδρώντος μέσου ή αν χρησιμοποιηθεί υψηλότερη αναλογία

αντιδρώντος μέσου σε ένα ενεργό πορώδες μέσο. Εναλλακτικά, μεγαλύτερη χρόνοι συγκράτησης είναι δυνατόν να αποκτηθούν μειώνοντας την παροχή στην δίοδο, η οποία προκαλεί μια αντίστοιχη μείωση της ζώνης εγκλεισμού ή αυξάνοντας τον όγκο του πορώδους στην δίοδο. Ένας τρόπος να αυξηθεί ο όγκος του πορώδους στη δίοδο, που έχει μικρή επίδραση στην παροχή, είναι να μεγαλώσει η δίοδος στην κατεύθυνση της ροής, όπως η διαμόρφωση σύνθετων αντιδραστηρίων. Το μήκος της δίοδου έχει μικρή επίδραση στην παροχή της, και ο χρόνος συγκράτησης αυξάνει σχεδόν γραμμικά με το μήκος της δίοδου. Ο χρόνος συγκράτησης που απαιτείται για την μείωση των συγκεντρώσεων σ' ένα συγκεκριμένο ποσό, μπορεί να αποκτηθεί κάνοντας τη δίοδο όσο πιο μεγάλη χρειάζεται.

6.6.2 Μεθοδολογία Βασισμένη Στην Κινητική Της Αντίδρασης Του Ρυπαντή Μέσα Στο Κελί (Devlin, J.F.)

Στις πιο απλές περιπτώσεις, ο χρόνος συγκράτησης (τ) μπορεί να υπολογιστεί από την μέση γραμμική ταχύτητα του υπογείου ύδατος στο φράγμα (v) και από το πάχος του φράγματος (x), $\tau = x/v$. Αυτός ο χρόνος πρέπει να είναι επαρκής έτσι ώστε η αντιδράσεις στον φράγμα να μειώσουν τις συγκεντρώσεις των ρύπων σε αποδεκτά επίπεδα (C_{lim}). Αν οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι ψευδό-πρώτης τάξης, η σταθερά k μπορεί να υπολογιστεί από διάφορες μελέτες και ο απαιτούμενος χρόνος συγκράτησης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\tau = -\frac{1}{k} \ln \left(\frac{C_{lim}}{C_o} \right)$$

ή το πάχος του φράγματος x υπολογίζεται αμέσως από:

$$x = -\frac{v}{k} \ln \left(\frac{C_{lim}}{C_o} \right)$$

όπου C_0 η συγκέντρωση του ρύπου που εισέρχεται στο φράγμα (υποθέτοντας ότι η διασπορά στο φράγμα είναι μηδαμινή). Από τα παραπάνω προκύπτει ότι, ο σχεδιασμός των φραγμάτων μπορεί να είναι εσφαλμένος σε δυο περιπτώσεις που οφείλονται στο χρόνο συγκράτησης: όταν η ροή μεταβάλλεται στο φράγμα οδηγώντας σε χαμηλούς χρόνους συγκράτησης σε μερικές τοποθεσίες ,και όταν οι αντιδράσεις στο φράγμα δεν πραγματοποιούνται όσο γρήγορα είναι αναμενόμενο από τις μελέτες που έχουν γίνει, οδηγώντας και πάλι σε ανεπαρκείς χρόνους συγκράτησης.

6.7 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ – MONITORING

Τα υπόγεια φράγματα (PRBs) κατασκευάζονται κάτω από αυστηρούς κανονισμούς που θέτονται από την USEPA ή από εξουσιοδοτημένες εταιρίες. Στα πλαίσια αυτών των κανονισμών είναι και η ύπαρξη ενός προγράμματος διασφάλισης ποιότητας (QAPP) που θα αναπτύσσεται προηγουμένως σε οποιοδήποτε δείγμα υπόγειου ύδατος. Το QAPP θα προσδιορίσει την ανάγκη παρακολούθησης του συστήματος έτσι ώστε να προσαρμόζεται η λειτουργία του με τους κανονισμούς και συγχρόνως να αξιολογείται η απόδοσή του. Όταν εγκαθίστανται τα πηγάδια, επιλέγεται η συχνότητα παρακολούθησης και σχεδιάζονται οι υπόλοιποι παράγοντες της συστήματος των πηγαδιών, πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπ' όψιν ο αντικειμενικός σκοπός του προγράμματος δειγματοληψίας και οι συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή (Testa and Winegarder, 2000). Ο τρόπος παρακολούθησης του συστήματος δεν διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με το είδος του PRB (Funnel & Gate, Continuous Trench).

Γενικά, αρκετά πηγάδια παρακολούθησης είναι απαραίτητο να εγκατασταθούν με σκοπό να προσδιορίζονται τα εξής (USEPA, 1997a):

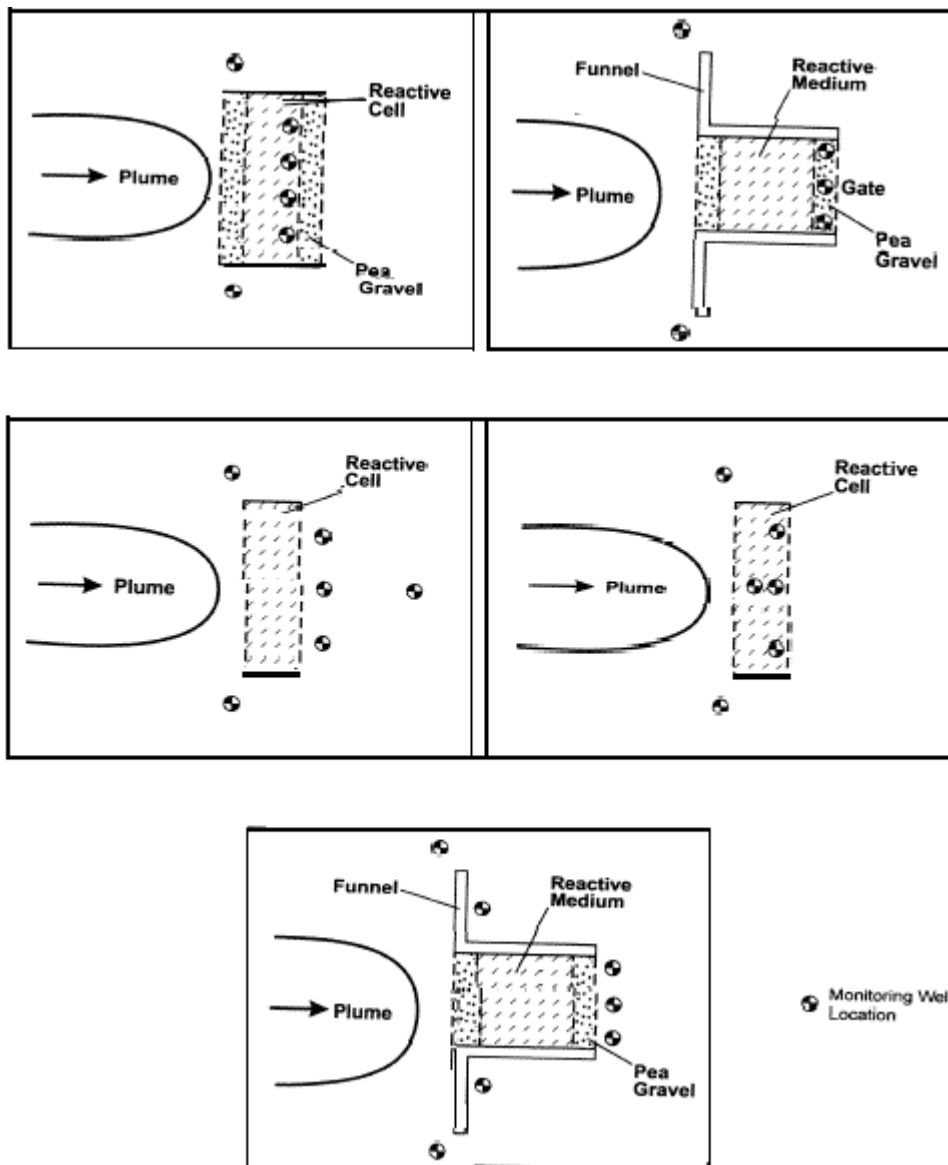
- Αν οι στόχοι έχουν επιτευχθεί.
- Αν παρατηρείται αλλαγή στις συγκεντρώσεις των ρύπων και αν ναι, πως χαρακτηρίζεται.
- Αν οι ρύποι ρέουν γύρω από τον τοίχο.

Όταν η εγκατάσταση πηγαδιών παρακολούθησης έχει ως σκοπό την *εξασφάλιση της μακροβιότητας του έργου* πραγματοποιούνται οι παρακάτω έλεγχοι (Birke and Roehl, 2001):

- Υδραυλικός έλεγχος
- Έλεγχος της χημείας του υπόγειου ύδατος
Ελέγχονται οι υδροχημικοί παράμετροι: pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα
Κατιόντα: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe_t ,
Ανιόντα: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{2-} , NO_3^-
- Εξέταση του αντιδρώντος υλικού
Πυρήνας: διοχέτευση του CO_2 (ανθρακικά), XRD

Τα πηγάδια παρακολούθησης πρέπει να εγκαθίστανται ως εξής (Powell, 2000, USEPA, 1997a):

- Αμέσως κατόπιν της εκροής από την ζώνη των αντιδραστηρίων.
- Σε κάθε άκρο του τοίχου.
- Κάτω από τον τοίχο
- Στα ανάντη του τοίχου.



Εικόνα 6-27 Διατάξεις των πηγαδιών παρακολούθησης
(Enviroconics Directorate U.S Air Force, 1997)

Τυπικά, τα κριτήρια λειτουργίας της παρακολούθησης ορίζονται από το κράτος στο οποίο έγκειται η περιοχή. Οι παράγοντες που προσδιορίζουν μια σωστή λειτουργία της παρακολούθησης περιλαμβάνουν τους ακόλουθους:

- Οι ρυπαντές που είναι πιο σημαντικοί.
- Ενδεχόμενα δευτερογενή προϊόντα ρύπανσης (αποικοδόμηση).
- Παράγοντες ποιότητας ύδατος όπως είναι το pH, η αλκαλικότητα, η ειδική αγωγιμότητα και η θερμοκρασία.

Εκτός από τους ρύπους, τα προϊόντα τους και τους παράγοντες της ποιότητας του νερού που αναφέρθηκαν παραπάνω, πρέπει να παρουσιάζεται και η απόδοση της παρακολούθησης. Αυτή χρησιμοποιείται για να επιβεβαιωθεί ότι το PRB λειτουργεί όπως σχεδιάστηκε και να αξιολογηθεί το κατά πόσο θα λειτουργεί σωστά με το πέρασμα του χρόνου. Αλλαγές στις παραμέτρους που παρακολουθούνται θα προειδοποιήσουν τους ερευνητές για πιθανά προβλήματα στο φράγμα. Οι παράμετροι αυτοί είναι (Powell, 2000, USEPA, 1997a):

- Υδρολογικοί παράμετροι, συμπεριλαμβανομένης της μεταβλητότητάς με το χρόνο.
- Μετρήσεις του υδραυλικού ύψους.
- Μελέτες ιχνηθετών
- Μέτρηση της ροής στο πεδίο.
- Μέτρηση της συγκεντρώσεως ιζημάτων στην επιφάνεια του σιδήρου και του ρυθμού δόμησης.
- Φωτοηλεκτρική Φασματοσκοπία των ακτινών-X.
- Οξειδοαναγωγικό δυναμικό, Eh
- Διαλυμένο οξυγόνο, DO
- Σίδηρος

Η γνώση αυτών των παραμέτρων βοηθά στο επιβεβαιωθεί η σωστή κατασκευή, αλλά και να ανιχνευθούν τα παρακάτω(USEPA, 1997a):

- Εξασθένιση της αντιδραστικότητας.
- Μείωση της διαπερατότητας.
- Μείωση του χρόνου συγκράτησης στη ζώνη των αντιδραστηρίων.
- Βραχυκύκλωμα της ζώνης των αντιδραστηρίων.
- Διαρροή στους τοίχους του φράγματος.

Αύξηση στο υδραυλικό ύψος κατά μήκος του φράγματος μπορεί να σημαίνει ότι υπάρχει φράξιμο των πόρων της ζώνης των αντιδραστηρίων. Αφαιρώντας πυρήνα και αξιολογώντας τη δόμηση από τα ιζήματα στη επιφάνεια του σιδήρου θα μπορούσε να επιβεβαιωθεί αυτή η υποψία, αν και θα ήταν καλύτερα να αφαιρεθούν πολλαπλά τμήματα πυρήνα για να είναι η εκτίμηση πιο αντιπροσωπευτική. Όταν η λειτουργία του συστήματος είναι σωστή, το Eh στο τοίχο από σίδηρο πρέπει να είναι χαμηλή, το οξυγόνο να μην είναι ανιχνεύσιμο και να υπάρχει ο σίδηρος (Powell, 2000). Τα παραπάνω αναφέρονται στην περίπτωση που το υλικό πλήρωσης του φράγματος είναι ο σίδηρος. Ανάλογες μετρήσεις γίνονται όμως και με άλλα υλικά πλήρωσης.

7. ΡΥΠΑΝΣΗ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΑΠΟ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ (BTEX)

Στην παρούσα μελέτη θα ασχοληθούμε με την εξυγίανση υπογείων υδάτων με την Τεχνολογία των Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων και θα εφαρμόσουμε τα συμπεράσματα στο πεδίο σε περίπτωση ρύπανσης υδροφορέα με υδρογονάνθρακες πετρελαίου (BTEX). Άρα κρίνεται σκόπιμο να διερευνήσουμε τη φύση και τις ιδιότητες αυτού του ρυπαντή.

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

(Nadim F. et. al, 1996)

Μία από τις πιο συνηθισμένες αιτίες ρύπανσης του εδάφους και του υπόγειου νερού είναι η διαρροή των υπογείων δεξαμενών αποθήκευσης (LUSTs) προϊόντων πετρελαίου, που χρησιμοποιούνται σε βενζινάδικα, εμπορικές, βιομηχανικές και οικιστικές εγκαταστάσεις. Οι δεξαμενές που δεν προστατεύονται από τη διάβρωση και δεν είναι σχεδιασμένες με διπλό τοίχωμα ενισχυμένο με ‘fiberglass’ ώστε να αντέχουν σε ενδεχόμενη καθίζηση του εδάφους, είναι πιθανό να αστοχήσουν και να προκαλέσουν μαζική ροή πετρελαίου στο έδαφος. Από το έδαφος με την επίδραση των δυναμικών κινήσεων του υδρολογικού κύκλου ο ρυπαντής μεταφέρεται στο υπόγειο νερό ρυπαίνοντας το και αυτό.

Όταν το υγρό πετρέλαιο ή τα παράγωγα του απελευθερώνονται στο έδαφος, διαμερίζονται σε τρεις ξεχωριστές φάσεις, τη διαλυμένη, την υγρή και την αέρια. Ένα μικρό τμήμα των υδρογονανθράκων του πετρελαίου διαλύεται στην υγρασία του εδάφους ή στο υπόγειο νερό. Ένα μέρος του διαλυμένου πετρελαίου παραμένει στους πόρους του εδάφους στην καθαρή υγρή του μορφή και το υπόλοιπο εξατμίζεται στον αέρα που είναι παγιδευμένος στους εδαφικούς πόρους. Τα καθαρά υγρά που δεν διαλύονται άμεσα στο νερό ονομάζονται μη – υδατικά υγρά (non-aqueous phase liquids, NAPLs). Γενικά τα μη-υδατικά υγρά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, σε αυτά που είναι ελαφρύτερα

από το νερό, (LNAPLs) και σε αυτά με πυκνότητα μεγαλύτερη του νερού (DNAPLs).

Τα μόρια των υδρογονανθράκων πετρελαίου είναι συνήθως ελαφρύτερα του νερού και αμέσως μετά την έκχυσή τους στο υπέδαφος σχηματίζουν μια λίμνη από NAPLs πάνω στην επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα. Ένα τμήμα των NAPLs που βρίσκεται σε επαφή με το υπόγειο νερό διαλύεται αργά και σχηματίζει ένα πλούμιο υδρογονανθράκων στο κινούμενο υπόγειο νερό. Το εμπρός μέρος του πλουμίου αποτελείται κυρίως από τα ελαφρύτερα και πιο διαλυτά συστατικά των υδρογονανθράκων.

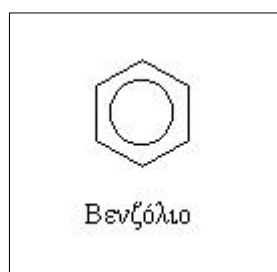
Στην ακόρεστη ζώνη, τμήμα των προϊόντων πετρελαίου παραμένει ως παραμένον-υπολειμματικό NAPL. Το παραμένον NAPL συγκρατείται στους εδαφικούς πόρους είτε από τριχοειδή φαινόμενα είτε σαν μικρές λίμνες υγρών πάνω από αργιλώδεις και πηλώδεις φακούς. Αν δεν αφαιρεθεί, οι παραμένοντες υδρογονάνθρακες πετρελαίου δρουν σαν μια μόνιμη πηγή ρύπανσης του εδάφους. Αν η πυκνότητα του ρυπασμένου πλουμίου είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του υπογείου νερού, το πλούμιο θα κινηθεί βαθιά στο υδροφόρο και μπορεί να μην είναι ανιχνεύσιμο από ρηχά συστήματα παρακολούθησης.

Καύσιμα που αποτελούνται από υδρογονάνθρακες όπως η βενζίνη, τα καύσιμα θέρμανσης, η κηροζίνη, τα καύσιμα των αεροσκαφών και των άλλων αεριωθούμενων είναι ελαφρύτερα από το νερό μη – υδατικά υγρά, (LNAPLs). Όλα τα παραπάνω παράγωγα πετρελαίου περιέχουν σε μεγάλο ή μικρότερο ποσοστό BTEX.

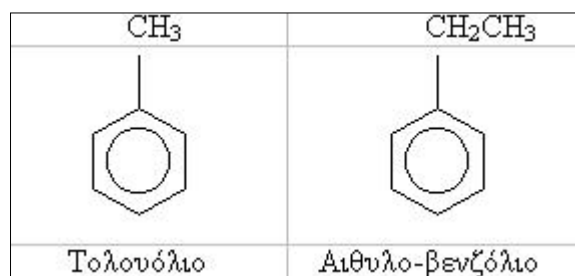
7.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ BTEX (www.envirotools.org/factsheets/btex.shtml)

Το BTEX είναι ένα αρκτικόλεξο για τα Βενζόλιο, Τολουόλιο, Αιθυλοβενζόλιο, και Ξυλόλιο. Οι ενώσεις αυτές είναι μονοκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, LNAPL, οι οποίοι είναι υδατοδιαλυτοί, πτητικοί και παρουσιάζουν μεγάλη κινητικότητα. Βρίσκονται στα προϊόντα πετρελαίου, και σε πολλές βιομηχανικές δραστηριότητες, όπως στην παραγωγή πλαστικών,

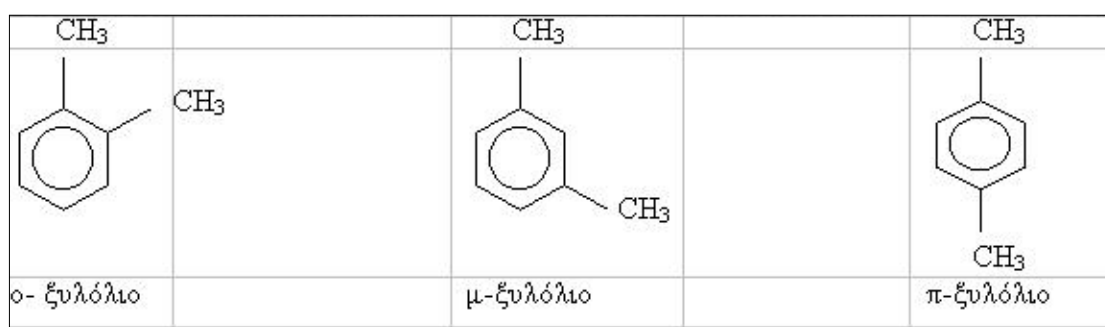
εντομοκτόνων, εκρηκτικών και στη φαρμακοβιομηχανία. Μέχρι τη δεκαετία του '80 ήταν ακόμα διαθέσιμα και για οικιακή χρήση, σαν υλικά για στεγνό καθάρισμα. (www.oca.nsw.gov.au/ecology/detail.cmf)



(a)



(b)



(c)

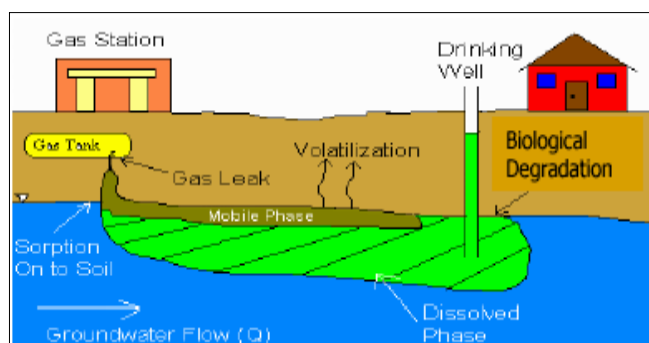
Εικόνα 7-1 Χημικοί τύποι των συστατικών του BTEX (Καλογεράκης, 2002)

- (a) Βενζόλιο
- (b) Τολουόλιο και Αιθυλοβενζόλιο
- (c) Ορθό- , μετά- , παρά- Ξυλόλια

Το Αιθυλοβενζόλιο είναι ένα πρόσθετο της βενζίνης και των καυσίμων των αεροσκαφών. Βρίσκεται ,όμως, και σε χρώματα, μελάνια, πλαστικά, και παρασιτοκτόνα. Το Βενζόλιο χρησιμοποιείται στην παραγωγή συνθετικών υλικών και προϊόντων καταναλωτού, όπως συνθετικό λάστιχο, πλαστικά, νάιλον, χρώματα και εντομοκτόνα. Το Τολουόλιο χρησιμοποιείται σαν διαλύτης για χρώματα, λάδια, κόλλες, και ρητίνες. Τα Ξυλόλια χρησιμοποιούνται σαν διαλύτες στην τυπογραφία, και στη βιομηχανία δέρματος και λάστιχου. Υπάρχουν τρία είδη Ξυλόλιων, τα ορθο- , τα μετα- , και τα παρα- . Το ορθο-Ξυλόλιο είναι ο μόνος τύπος που συναντάται στη φύση. Οι άλλοι δυο τύποι είναι ανθρωπογενείς. Ο όρος BTEX δείχνει πως οι παραπάνω ενώσεις βρίσκονται μαζί σε πολλές ρυπασμένες περιοχές.

7.3 ΤΥΧΗ ΤΟΥ BTEX ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Μόλις απελευθερωθεί στο περιβάλλον, εκτός από την κίνηση του λόγω συµµεταφοράς, διασποράς και διάχυσης, το **BTEX** µπορεί να εξατµιστεί (πτητικοποίηση), να διαλυθεί, να προσροφηθεί από εδαφικά σωματίδια, να υποστεί βιοµετατροπή, να αποδοµηθεί βιολογικά από αυτόχθονα µικρόβια και να πάρει µέρος σε χηµικές αντιδράσεις όπως φωτοδιάσπαση, υδρόλυση, οξείδωση και αναγωγή (Εικόνα 7-2).



Εικόνα 7-2 Τύχη και μεταφορά του BTEX
(www.envirottools.org/factsheets/btex.shtml)

Πτητικοποίηση συμβαίνει όταν τα χηµικά εξατµίζονται, δηλαδή µεταφέρονται από την υγρή φάση στην αέρια. Πτητικοποίηση των συστατικών BTEX της βενζίνης συχνά συμβαίνει όταν βάζουμε βενζίνη στο αυτοκίνητο µας, και είναι υπεύθυνη για την χαρακτηριστική οσµή. Το φαινόµενο αυτό µπορεί να παρατηρηθεί και µέσα στο έδαφος λόγω της παρουσίας θυλάκων αέρα. Το BTEX µπορεί επίσης να διαλυθεί στο νερό, µε συνέπεια την µεταφορά του στο υπόγειο νερό.

Επειδή το BTEX προσροφάται από εδαφικά σωματίδια, κινείται πιο αργά από το υπόγειο νερό, γεγονός που δυσχεραίνει την αποµάκρυνση του. Το φαινόµενο αυτό περιγράφεται από το συντελεστή επιβράδυνσης R (retardation factor). Ο συντελεστής αυτός περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο

$$R = 1 + \rho_b \frac{K_{SD}}{\phi} \quad \text{όπου}$$

ρ_b είναι η ξηρή πυκνότητα του εδάφους

$K_{SD} = s / C_{A,eq}$ είναι ο συντελεστής κατανομής (soil distribution coefficient) , s είναι η μάζα του ρύπου που έχει προσροφηθεί ανά μονάδα μάζας εδάφους (x_A / m), και $C_{A,eq}$ είναι η συγκέντρωση ισορροπίας του A (g/m^3). Αν δεν υπάρχουν δεδομένα, το K_{SD} μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$K_{SD} = 6,3 \cdot 10^{-7} f_{OC} K_{OW} \quad \text{όπου}$$

f_{OC} είναι το ποσοστό οργανικού άνθρακα στο έδαφος και

$K_{OW} (= C_{octanol} / C_{water})$ είναι ο συντελεστής κατανομής μεταξύ νερού και οκτανόλης

Από τα παραπάνω φαίνεται πως αύξηση του ποσοστού οργανικού άνθρακα στο έδαφος f_{OC} και / ή του συντελεστή κατανομής μεταξύ νερού και οκτανόλης K_{OW} , συνοδεύεται με αύξηση της προσρόφησης του ρύπου από τα εδαφικά σωματίδια (Καλογεράκης, 2002).

Αν υπάρχει οξυγόνο σε μεγάλες ποσότητες το BTEX μπορεί να αποδομηθεί βιολογικά. Η αερόβια βιοαποδόμηση γίνεται από αυτόχθονα μικρόβια που υπάρχουν στο νερό ή στο έδαφος και έχουν την ικανότητα να μεταβολίζουν το BTEX, χρησιμοποιώντας το ως πηγή τροφής και ενέργειας (Norris et al., 1994). Από μελέτες έχει προκύψει πως οι ακόλουθοι μικροοργανισμοί έχουν την ικανότητα να βιοαποικοδομούν το BTEX:

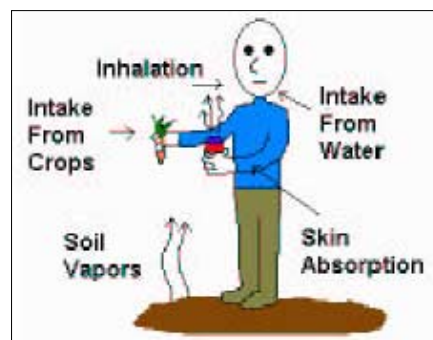
1. *Pseudomonas putida*: Η ικανότητα του *P. Putida* να αποδομεί μια πληθώρα υδρογονανθράκων όπως το BTEX και φαινόλες είναι καλά τεκμηριωμένη (Heald and Jekins, 1996)
2. *Pseudomonas fluorescens*: Καλλιέργειες από *P. Fluorescens* ικανές να χρησιμοποιούν αρωματικούς υδρογονάνθρακες σαν τη μόνη πηγή για άνθρακα έχουν ήδη απομονωθεί (Marconi et al., 1996).
3. *Strenotrophomonas maltophilia* : Το είδος *S. maltophilia* έχει απομονωθεί και χαρακτηρίζεται ως αποδομητής του Τολουόλιου και των Ξυλόλιων (Su and Kafkewitz, 1996).

Εργαστηριακά πειράματα, σε υλικά υδροφορέων ρυπασμένων με πετρελαιοειδή, και γεωχημικά δεδομένα έχουν δείξει πως κάτω από κατάλληλες συνθήκες, το BTEX μπορεί να αποδομηθεί και με την απουσία μοριακού οξυγόνου. Στη θέση του χρησιμοποιείται τρισθενής σίδηρος Fe(III), άλατα ή εστέρες θεικού οξέος, ή άλατα, οξέα, εστέρες του νιτρικού οξέος ως δέκτες ηλεκτρονίων. Αποδόμηση του BTEX έχει παρατηρηθεί και κάτω από μεθανιογενείς συνθήκες.

Παρ' όλα αυτά ειδικά για το Βενζόλιο, τον ρυπαντή από τους BTEX με τη μεγαλύτερη σημασία, είναι συχνά πολύ δύσκολο να επιτευχθεί αναερόβια αποδόμηση στο εργαστήριο. Αν και οι μέχρι τώρα μελέτες έχουν δείξει πως η φυσική αναερόβια αποδόμηση του BTEX έχει τη δυνατότητα να απομακρύνει μεγάλο ποσοστό του BTEX από υδροφορείς ρυπασμένους με πετρελαιοειδή, και οι μηχανισμοί για την προσομοίωση της αποδόμηση στο εργαστήριο έχουν αναπτυχθεί αρκετά, περαιτέρω μελέτη των οργανισμών που παίρνουν μέρος σε αυτό το μεταβολισμό και των παραγόντων που ελέγχουν το φαινόμενο, ως ότου να είναι εφικτός ο σχεδιασμός στρατηγικών για την αναερόβια αποδόμηση σε ρυπασμένους υδροφορείς.

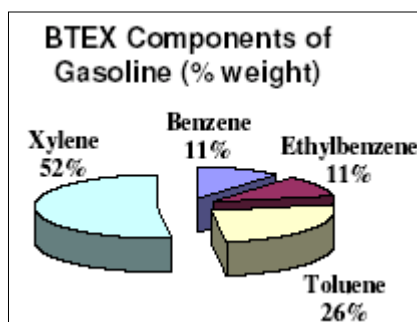
7.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ BTEX ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ

Έκθεση στο BTEX συμβαίνει από κατάποση ρυπασμένου από BTEX νερού, από εισπνοή, ή από απορρόφηση από το δέρμα. Εισπνοή BTEX μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια του γεμίσματος του ρεζερβουάρ των αυτοκινήτων με βενζίνη ή κατά τη διάρκεια του μπάνιου με ρυπασμένο νερό. Απορρόφηση αυτών των χημικών μπορεί να συμβεί αν χυθεί βενζίνη στο δέρμα ή κατά τη διάρκεια του μπάνιου με ρυπασμένο νερό.



Εικόνα 7-3 Εισαγωγή του BTEX στον άνθρωπο
(www.envirottools.org/factsheets/btex.shtml)

Έντονη έκθεση σε υψηλά επίπεδα βενζίνης και στα BTEX συστατικά της έχει συσχετιστεί με ερεθισμούς στο δέρμα και στα αισθητήρια όργανα, με κατάπτωση του κεντρικού νευρικού συστήματος, και με επιπτώσεις στο αναπνευστικό σύστημα. Αυτά τα επίπεδα δεν είναι επιτεύξιμα από την κατάποση ρυπασμένου νερού, αλλά πιθανότερο από έκθεση κατά τη διάρκεια της εργασίας σε χώρους με υψηλά επίπεδα BTEX.



Εικόνα 7-4 Συστατικά BTEX της Βενζίνης
(www.envirotools.org/factsheets/btex.shtml)

Παρατεταμένη έκθεση σε τέτοιες ενώσεις έχει δυσμενείς συνέπειες στο συκώτι, στα νεφρά και στο κυκλοφοριακό σύστημα.. Σύμφωνα με την U.S Environmental Protection Agency (U.S EPA), υπάρχουν αρκετά στοιχεία από μελέτες σε ανθρώπους και ζώα, που καταδεικνύουν το Βενζόλιο ως καρκινογόνο για τον άνθρωπο. Εργάτες εκτεθειμένοι σε υψηλά επίπεδα Βενζόλιου σε εργασιακούς χώρους, έχουν σε μεγάλο ποσοστό, παρουσιάσει λευχαιμία

7. 5 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΟ BTEX

Η U.S EPA έχει καθιερώσει επιτρεπτά όρια για τους χημικούς ρυπαντές στο πόσιμο νερό που παρέχεται από το δίκτυο ύδρευσης. Αυτά τα όρια καλούνται *Μέγιστα Επίπεδα Ρυπαντή* (Maximum Contaminant Levels, MCLs). Για την εύρεση αυτών των ορίων η U.S EPA χρησιμοποίησε ένα αριθμό συντηρητικών παραδοχών για τη διασφάλιση της υγείας του κοινού. Για την περίπτωση γνωστών ή πιθανών καρκινογόνων ουσιών , το MCL προκύπτει βάση της παραδοχής πως ο μέσος ενήλικας ζυγίζει 154 lb (70 kg) , και πίνει περίπου 2 quarts (2 L) νερό τη μέρα για όλη τη διάρκεια της ζωής του (70 χρόνια). Το

MCL ορίζεται έτσι ώστε έκθεση για μια ζωή στη συγκέντρωση του MCL ,θα έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση καρκίνου σε 1 – 100 άτομα ανά εκατομμύριο εκτιθεμένων, ανάλογα με το χημικό (Πίνακας 7-1).

ΧΗΜΙΚΟ	MCL (mg/l = ppm)
Βενζόλιο	0.005
Τολουόλιο	1
Αιθυλοβενζόλιο	0.7
Ξυλόλιο	10

Πίνακας 7-1 MCL όρια για το BTEX
(www.envirotools.org/factsheets/btex.shtml)

7.6 ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΤΟ BTEX

Η U.S EPA την ελαχιστοποίηση της έκθεσης στο BTEX. Για την αποφυγή ή ελάττωση της έκθεσης στο BTEX, οι άνθρωποι πρέπει να χρησιμοποιούν νερό με συγκεντρώσεις αυτών των συστατικών κάτω από τα όρια **MCL** και / ή να χρησιμοποιεί συστήματα επεξεργασίας ή φιλτραρίσματος .Αν είναι απαραίτητο, βραχυπρόθεσμη μείωση της έκθεσης στο BTEX μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση εμφιαλωμένου νερού για πόσιμο ή για μαγείρεμα, και με την αποφυγή μπανιρίσματος με το ρυπασμένο νερό. Με τις διεργασίες καθαρισμού νερού στα σπίτια, όπως η φίλτρανση με άνθρακα, επιτυγχάνεται ικανοποιητική απομάκρυνση του BTEX ως την επίτευξη των ορίων **MCL** και την ελαχιστοποίηση δηλαδή των κινδύνων της υγείας

7.7 ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΒΤΕΧ

(Marc W. Bowles 1997)

Όταν οι ρύποι αποτελούνται από υδρογονάνθρακες, η κινητικότητα τους στο υπόγειο νερό, εξαρτάται από το υδρογεωλογικό περιβάλλον και από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υδρογονανθράκων. Μονοκυκλικές αρωματικές ενώσεις όπως το Βενζόλιο, το Τολουόλιο, το Αιθυλοβενζόλιο, και τα ορθό-, μετά-, παρά- Ξυλόλια, (ΒΤΕΧ) είναι ανάμεσα στις πιο διαλυτές ενώσεις στο νερό, που συναντιούνται σε προϊόντα πετρελαίου.

Σε περιοχές ελεύθερης συσσώρευσης προϊόντων, μερικοί από τους υδρογονάνθρακες θα διαλυθούν στην υδατική φάση σύμφωνα με την σχετικό συντελεστή καταμερισμού που έχουν. Οι υδατικές διαλυτότητες των συγκεκριμένων ενώσεων ποικίλουν ανάλογα με τη θερμοκρασία, με την ιοντική ισχύ, την παρουσία άλλων υδρογονανθράκων και τη ποσότητα οργανικού άνθρακα στον υπόγειο βράχο. Οι διαλυτότητες του ΒΤΕΧ καθώς και άλλες φυσικές και χημικές ιδιότητες του, παρέχονται στον Πίνακα 7-2.

Ενώσεις	Μορια- κός Τύπος	ΜΒ	Ειδική Ποκνό- τητα (20/4° C)	Πίεση Ατμών (mm Hg at 20-25° C)	Διαλυτό- τητα στο νερό (mg/L at 20-25° C)	log K _{ow}	log K _{oc}	Σταθε- ρά του Henry (αδιά- στατη)
Βενζόλιο	C ₆ H ₆	78,11	0,877	76	1.780	2,1	1,9	0,224
Τολουόλιο	C ₇ H ₈	92,14	0,867	22	515	2,6	2,1	0,274
Αιθυλοβεν- ζόλιο	C ₈ H ₁₀	106,17	0,867	7	152	3,1	2,2	0,270
Ξυλόλια	C ₈ H ₁₀	106,17	≈ 0,880	≈ 8	≈ 180	≈ 3	≈ 2	0,245

Πίνακας 7-2. Φυσικές και Χημικές ιδιότητες των ενώσεων του ΒΤΕΧ
(Montgomery and Welcom 1989)

Σαν αποτέλεσμα των διαδικασιών της διασποράς, διάχυσης, καθυστέρησης και της συµµεταφοράς, οι ρύποι θα κινηθούν µε διαφορετικούς ρυθµούς. Τα φυσικά και χηµικά δεδοµένα δείχνουν ότι το Βενζόλιο θα υποστεί λιγότερη καθυστέρηση απ' ότi οι υπόλοιπες ενώσεις του ΒΤΕΧ σε ισοδύναµες υδρογεωλογικές συνθήκες. Το Βενζόλιο δηλαδή, µεταφέρεται σε µεγαλύτερες αποστάσεις.

7.8 ΒΙΟΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΒΤΕΧ

(www.water.hut.fi/wr/kurssit/yhd-12126/oppimateriaali/degral-e.htm)

Βιολογικές διεργασίες που συµβαίνουν αυθόρμητα στη φύση είναι δυνατόν να αυξήσουν το ρυθµό αποµάκρυνσης της οργανικής µάζας από ρυπασµένους υπόγειους υδροφορείς. Η βιοαποικοδόµηση των συστατικών του ΒΤΕΧ είναι µια αντίδραση όπου ο ρύπος (π.χ. το Βενζόλιο C_6H_6) µετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα CO_2 και νερό. Οι ενδιαµεσες βιολογικές αντιδράσεις αποικοδόµησης είναι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής ,περιλαµβάνοντας µεταφορά ηλεκτρονίων από τον οργανικό ρύπο σε ένα δέκτη ηλεκτρονίων. Το οξυγόνο είναι ο δέκτης ηλεκτρονίων στον αερόβιο µεταβολισµό ενώ το άζωτο, ο σίδηρος, το θείο και το διοξείδιο του άνθρακα λειτουργούν σαν δέκτες ηλεκτρονίων σε εναλλακτικά αναερόβια µονοπάτια.

Πρόσφατα θεµελιώδη µοντέλα φυσικής εξυγίανσης βασίστηκαν στην υπόθεση ότι τα αναερόβια µονοπάτια αποικοδόµησης συνέβαιναν µε πολύ µικρές ταχύτητες στις περισσότερες περιπτώσεις, για να θεωρηθεί ότι επιδρούν σηµαντικά στην συνολικό ρυθµό της φυσικής εξυγίανσης. Σύµφωνα µε αυτό, τα περισσότερα προγράµµατα πεδίου συγκεντρώνουν το ενδιαφέρον στη αλληλεπίδραση οξυγόνου και ρυπαντών ενώ δεν λαµβάνουν υπ' όψιν τους δείκτες αναερόβιας δραστηριότητας όπως είναι η µείωση αναερόβιων δεκτών ηλεκτρονίων ή τη συσσώρευση αναερόβιων µεταβολικών παραπροϊόντων. Πρόσφατη έρευνα υποστηρίζει ότι οι υδρογονάνθρακες υποβαθµίζονται τόσο αερόβια όσο και αναερόβια σε υπόγεια περιβάλλοντα (Rafai et al, 1998).

Οι εικόνες παρακάτω παρουσιάζουν τις οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις του Βενζόλιου, του Τολουόλιου, του ΑιθυλοΒενζόλιου και του Ξυλόλιου (BTEx). Παρουσία οργανικού υποστρώματος και διαλυμένου οξυγόνου, οι μικροοργανισμοί που δρουν στον αερόβιο μεταβολισμό θα επικρατήσουν έναντι των αναερόβιων τύπων. Ωστόσο, το διαλυμένο οξυγόνο καταναλώνεται ταχύτατα στο εσωτερικό των ρυπασμένων πλουμιών, μετατρέποντας αυτές τις περιοχές σε ανοξικές ζώνες. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, τα αναερόβια βακτήρια αρχίζουν να χρησιμοποιούν άλλους δέκτες ηλεκτρονίων για να μεταβολίσουν τους διαλυμένους υδρογονάνθρακες.

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη χρήση των διαφόρων δεκτών ηλεκτρονίων περιλαμβάνουν:

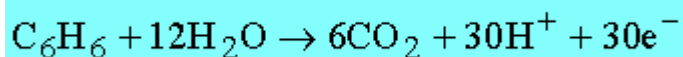
1. τη σχετική βιοχημική ενέργεια που παρέχεται από την αντίδραση
2. τη διαθεσιμότητα χαρακτηριστικών ή ειδικών δεκτών ηλεκτρονίων σε μια συγκεκριμένη περιοχή
3. η κινητική της μικροβιακής αντίδρασης σχετικά με τους διάφορους δέκτες ηλεκτρονίων

Ακολουθούν οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής των συστατικών του BTEx

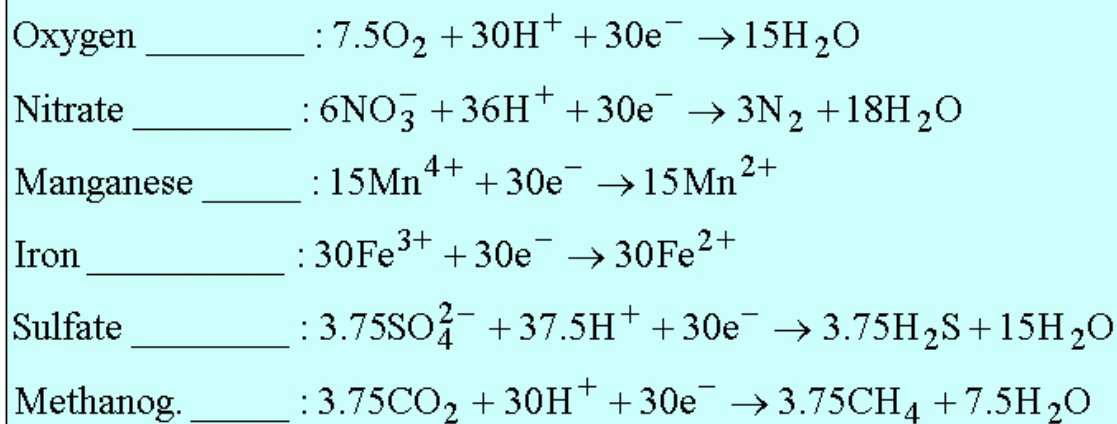
BENZOLIO

Οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής για το Βενζόλιο φαίνονται παρακάτω (Rafai et al. 1998):

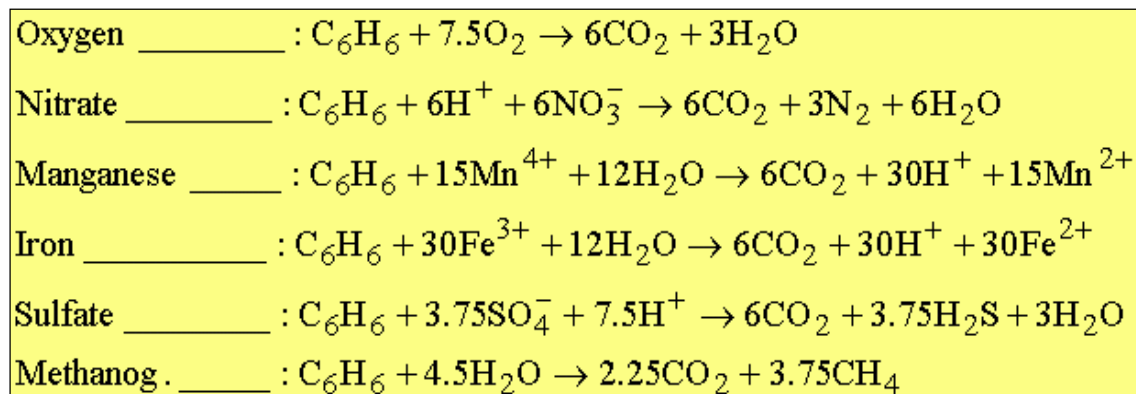
Αντίδραση οξείδωσης:



Αντίδραση αναγωγής:



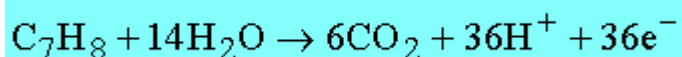
Συνολική αντίδραση:



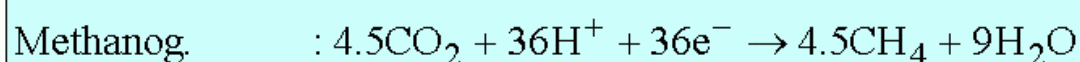
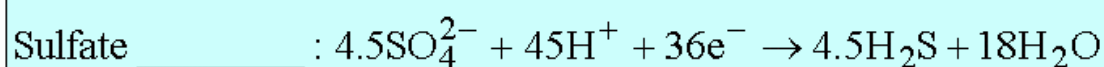
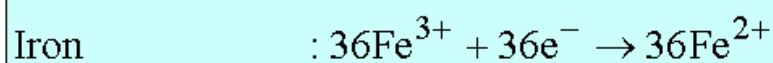
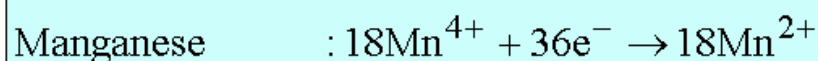
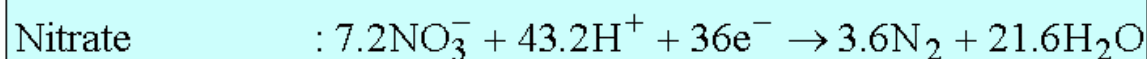
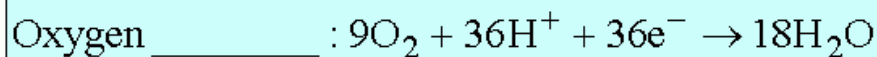
ΤΟΛΟΥΟΛΙΟ

Οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής για το Τολουόλιο φαίνονται παρακάτω (Rafai et al. 1998):

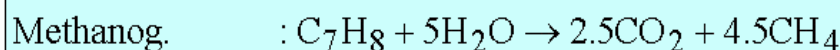
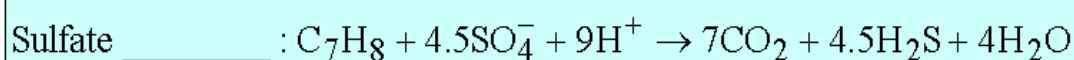
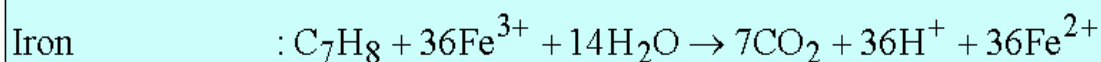
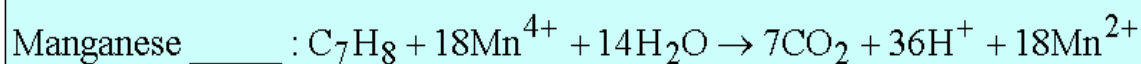
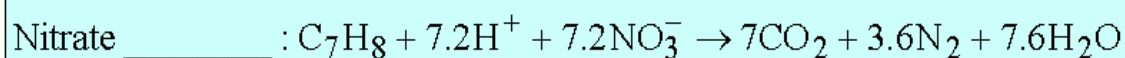
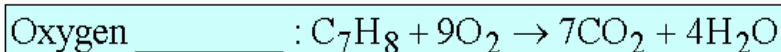
Αντίδραση οξείδωσης:



Αντίδραση αναγωγής:



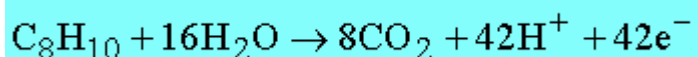
Συνολική αντίδραση:



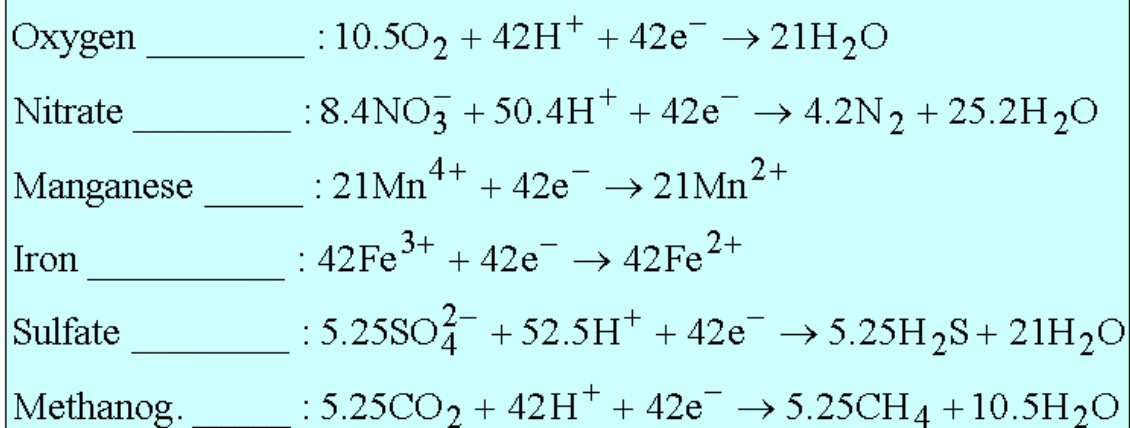
ΑΙΘΥΛΟΒΕΝΖΟΛΙΟ ΚΑΙ ΞΥΛΟΛΙΟ

Οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής για το ΑιθυλοΒενζόλιο και το Ξυλόλιο φαίνονται παρακάτω (Rafai et al. 1998):

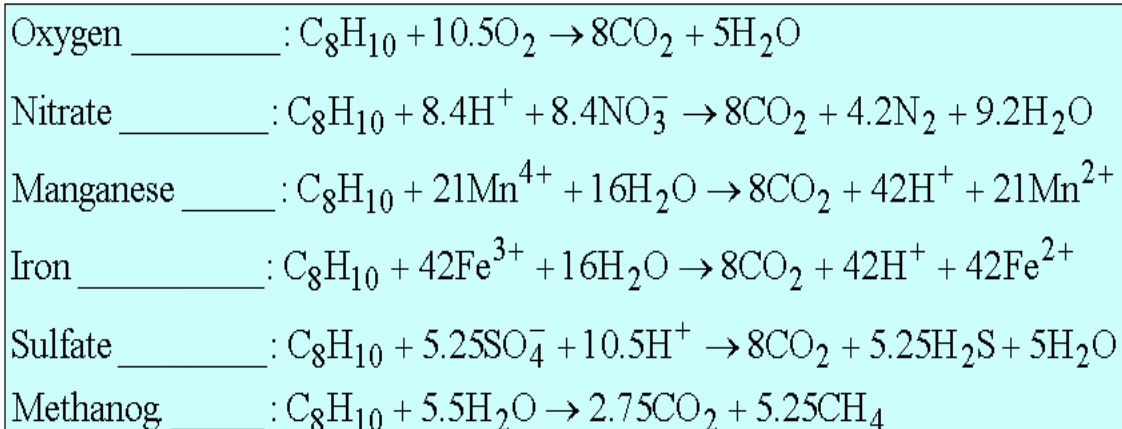
Αντίδραση οξείδωσης:



Αντίδραση αναγωγής:



Συνολική αντίδραση:



Η μεταφορά ηλεκτρονίων κατά τη διάρκεια μιας οξειδοαναγωγικής αντίδρασης απελευθερώνει ενέργεια η οποία χρησιμοποιείται στην διατήρηση και το μέγεθος του κυττάρου. Η βιοχημική ενέργεια που σχετίζεται με τα εναλλακτικά μονοπάτια αποικοδόμησης είναι δυνατόν να αντιπροσωπευτεί από το δυναμικό οξειδοαναγωγής των εναλλακτικών δεκτών ηλεκτρονίων. Όσο πιο θετικό είναι το δυναμικό οξειδοαναγωγής, τόσο πιο ευνοημένη ενεργειακά είναι η αντίδραση που χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο δέκτη ηλεκτρονίων. Κάτω από ίδιες συνθήκες, οι οργανισμοί με περισσότερο αποτελεσματικούς μεθόδους μεταβολισμού μεγαλώνουν ταχύτερα και γι' αυτό κυριαρχούν πάνω στις λιγότερο αποτελεσματικές μορφές.

Electron	Type of	Metabolic	Redox	Reaction
Acceptor	Reaction	By-Product	Potential	Preference
Oxygen	Aerobic	CO ₂	820	Most Preferred
Nitrate	Anaerobic	N ₂ , CO ₂	740	
Ferric Iron(solid)	Anaerobic	Ferrous Iron	-50	
Sulfate	Anaerobic	H ₂ S	-220	
Carbon Dioxide	Anaerobic	Methane	-240	Least Preferred

Πίνακας 7-3 Χαρακτηριστικά βιοαποικοδόμησης του BTEX (www.water.hut.fi)

Βασιζόμενοι μόνο στις θερμοδυναμικές θεωρήσεις, η πιο ευνοημένη ενεργειακά αντίδραση θα συνεχίζεται στο πλούμιο μέχρι να εξαλειφθούν όλοι οι δέκτες ηλεκτρονίων που απαιτούνται. Σε αυτό το σημείο, η επόμενη πιο ευνοημένη ενεργειακά αντίδραση θα αρχίσει και θα συνεχιστεί μέχρι να μειωθεί ο δέκτης ηλεκτρονίων, καθοδηγούμενοι από ένα σχέδιο όπου οι προτιμώμενοι δέκτες ηλεκτρονίων καταναλώνονται ένας ένας, σε σειρά.

Στηριζόμενοι σε αυτές τις αρχές, κάποιος θα περίμενε να παρατηρήσει στα στοιχεία ενός πηγαδιού παρακολούθησης, 'μη-ανιχνεύσιμα' αποτελέσματα για τους περισσότερους ενεργειακούς δέκτες ηλεκτρονίων, όπως είναι το οξυγόνο και το άζωτο, σε περιοχές όπου έχουν παρατηρηθεί ενδείξεις ελάχιστων ενεργειακών αντιδράσεων (π.χ. στοιχεία ενός πηγαδιού παρακολούθησης που δείχνουν τη παρουσία σιδήρου). Στην πράξη, ωστόσο, είναι ασυνήθιστο να

συλλεχθούν δείγματα από πηγάδια παρακολούθησης της φυσικής εξυγίανσης που να μειώνονται τελείως ένας ή περισσότεροι δέκτες ηλεκτρονίων.

Δύο διεργασίες είναι πιθανά υπεύθυνες για αυτές τις παρατηρήσεις (Rafai et al., 1998):

1. Εναλλακτικοί βιοχημικοί μηχανισμοί που εμφανίζουν παρόμοια ενεργειακά δυναμικά (όπως η αερόβια οξείδωση και η αναγωγή του αζώτου) μπορεί να συμβαίνουν παράλληλα όταν μειωθεί η συγκέντρωση των προτιμώμενων δεκτών ηλεκτρονίων, παρά όταν εξαλειφθούν τελείως. Ομοίως παρατηρώντας τα σχεδόν ισοδύναμα δυναμικά οξειδοαναγωγής για το θείο και το διοξείδιο του άνθρακα (-220 V και -240V, αντίστοιχα) κανείς μπορεί να περιμένει ότι η αναγωγή του θείου και οι αντιδράσεις μεθανιογέννεσης συμβαίνουν ταυτοχρόνως.
2. Τα κλασσικά πηγάδια παρακολούθησης, που έχουν εσωτερική διάμετρο από 1.5 έως 3 m, αναμειγνύουν νερά από διάφορες κάθετες ζώνες. Αν συμβαίνουν διαφορετικές αντιδράσεις βιοαποικοδόμησης σε διαφορετικά βάθη, τότε κάποιος θα περίμενε να βρει γεωχημικές ενδείξεις εναλλακτικών μηχανισμών αποικοδόμησης που θα πραγματοποιούνται στο ίδιο πηγάδι. Αν το πλούμιο των διαλυμένων υδρογονανθράκων είναι λεπτότερο από την εσωτερική διάμετρο του πηγαδιού παρακολούθησης, τότε η γεωχημική ένδειξη της μείωσης των δεκτών ηλεκτρονίων ή της συγκέντρωσης των μεταβολιτών θα αλλοιωθεί με την ανάμειξη με καθαρό νερό από ζώνες όπου δεν συμβαίνει αποικοδόμηση.

7.9 ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ ΒΙΟΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗΣ (www.water.hut.fi)

Η αερόβια βιοαποικοδόμηση μπορεί να χαρακτηριστεί σαν μια ‘στιγμιαία’ αντίδραση που περιορίζεται από τη ποσότητα των δεκτών ηλεκτρονίων (οξυγόνο) που είναι διαθέσιμη. Η μικροβιακή αντίδραση υποτίθεται ότι πραγματοποιείται με ένα πολύ ταχύτερο ρυθμό από ότι το χρόνο που απαιτείται από

τον υδροφορέα για να αναπληρώσει την ποσότητα του οξυγόνου στο πλούμιο. Παρ' όλο που ο χρόνος που απαιτείται από τη βιομάζα για να υποβαθμίσει αερόβια τους διαλυμένους υδρογονάνθρακες είναι της τάξεως των ημερών, ο συνολικός ρυθμός της ανανέωσης του υπόγειου νερού στα περισσότερα πλούμια είναι χρόνια ή δεκαετίες.

Για παράδειγμα, στα στοιχεία του μικρόκοσμου που παρουσιάζονται από τους Davis et al., (1994) φαίνεται ότι τα μικρόβια που έχουν περίσσεια δεκτών ηλεκτρονίων μπορούν να αποδομήσουν συγκεντρώσεις διαλυμένου Βενζόλιου (~1mg/L) πολύ γρήγορα. Όταν έχουμε πλεόνασμα οξυγόνου, τα αερόβια βακτήρια μπορούν να αποδομήσουν διαλυμένο Βενζόλιο σε περίπου 8 μέρες, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί 'στιγμιαίο' συγκρινόμενο με τα χρόνια που απαιτούνται για το υπόγειο νερό που ρέει να αναπληρώσει το οξυγόνο της περιοχής του πλουμίου.

Πρόσφατα αποτελέσματα από την 'Air Force Natural Attenuation Initiative' δείχνουν ότι οι αναερόβιες αντιδράσεις, οι οποίες θεωρούνταν αρχικά εξαιρετικά αργές για να έχουν σημασία στο υπόγειο νερό, είναι δυνατόν να προσομοιωθούν σαν στιγμιαίες αντιδράσεις (Newell et al., 1995). Για παράδειγμα, οι Davis et al., (1994) μελέτησαν επίσης το μικρόκοσμο που ανάγει θείο και παράγει μεθάνιο, το οποίο έδειξε ότι το Βενζόλιο θα μπορούσε να αποδομηθεί μέσα σε χρονικό όριο δυο εβδομάδων περίπου (μετά το στάδιο προσαρμογής των μικροοργανισμών στις καινούργιες περιβαλλοντικές συνθήκες). Όταν συγκριθεί το όριο αυτό με το χρόνο που απαιτείται για να αναπληρωθούν οι δέκτες ηλεκτρονίων, οι αναερόβιες αντιδράσεις μπορεί να θεωρηθούν σαν στιγμιαίες σε πολλές περιοχές. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει παρατηρώντας τα στοιχεία των αναερόβιων δεκτών ηλεκτρονίων και των παραπροϊόντων κατά μήκος του πλουμίου σε περιοχές μελέτης της φυσικής εξυγίανσης.

8. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΟΣ ΚΕΛΙΟΥ ΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΛΟΥΜΙΟΥ ΜΕ ΒΤΕΧ

8.1 ΒΙΟΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΒΤΕΧ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ORC[®] (www.r3-bardos.demon.co.uk/regenesis2/pagetwo.html)

Το ORC[®], (Oxygen Release Compound), δηλαδή το μείγμα που απελευθερώνει οξυγόνο, είναι ένας πατενταρισμένος σχηματισμός υπεροξειδίου του μαγνησίου (με μέση διάμετρο σωματιδίων 44 μm) που έχει την ιδιότητα να απελευθερώνει μοριακό οξυγόνο με αργό και σταθερό ρυθμό, όταν έρχεται σε επαφή με εδαφική υγρασία ή το υπόγειο νερό.

Η αντίδραση που περιγράφει το φαινόμενο είναι η παρακάτω :



Πολλοί μικροοργανισμοί που συναντώνται στη φύση, έχουν την ικανότητα να αποδομούν αερόβια, ρυπαντές του υπόγειου νερού στο εμπλουτισμένο από οξυγόνο περιβάλλον που δημιουργεί το ORC[®], σε ακίνδυνα παραπροϊόντα όπως διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Επίσης, η εφαρμογή του ORC[®] μπορεί να αποτελέσει μια εξαιρετική τεχνική για την επιτάχυνση της φυσικής μείωσης των ρυπαντών στο υπόγειο νερό μέχρι και 100 φορές.

Το ORC[®] είναι ενδεδειγμένη λύση για την εξυγίανση υδροφορέων ρυπασμένων από ΒΤΕΧ και ΤΡΗ αφού η εφαρμογή του αυξάνει τους ρυθμούς βιοαποδόμησης αλλά το επεξεργασμένο νερό δεν φτάνει πάντα τα MCL επίπεδα (Koenigsberg). Μπορεί να εισαχθεί στο έδαφος με ενέσεις ή να χρησιμοποιηθεί σαν πληρωτικό υλικό σε φράγματα..

Η χρήση της τεχνολογίας του ORC[®] για την αποκατάσταση ρυπασμένου υπογείου νερού, είναι γενικά πιο οικονομική από άλλες εναλλακτικές τεχνολογίες. Κοστίζει $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$ του κόστους της μεθόδου ψεκασμού οξυγόνου με ανάκτηση ατμού ή το $\frac{1}{4}$ του κόστους της μεθόδου άντλησης και επεξεργασίας.

Το ORC[®] είναι ένας σχηματισμός υπεροξειδίου του μαγνησίου που συνδυάζεται με την παρεμβολή φωσφορικών. Τα φωσφορικά δίνουν στο

ORC[®] την ιδιότητα της συνεχιζόμενης για μεγάλο χρονικό διάστημα έκλυσης μοριακού οξυγόνου, γεγονός σημαντικό για ένα παθητικό και οικονομικό σύστημα παροχής οξυγόνου. Ο όρος “ παρεμβολή” χρησιμοποιείται εδώ για να περιγράψει την διείσδυση των φωσφορικών στην κρυσταλλική δομή του υπεροξειδίου του μαγνησίου, που του επιτρέπει να εκλύει οξυγόνο συνεχώς για ένα χρονικό διάστημα του ενός περίπου χρόνου. Η παρεμβολή των φωσφορικών προλαβαίνει ακόμα το πρόβλημα που σχετίζεται με το μαγνήσιο και υπεροξείδιο του ασβεστίου. Χωρίς τα φωσφορικά, αυτά τα χημικά σχηματίζουν μια τσιμεντοειδή επικάλυψη, που παρεμποδίζει την περαιτέρω ενυδάτωση και απελευθέρωση οξυγόνου, με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται οξυγόνο για το πολύ δύο εβδομάδες.

Το ORC[®] πρωτοεισήχθη στην αγορά της περιβαλλοντικής εξυγίανσης το Φλεβάρη του 1995 μετά από τρία χρόνια δοκιμών και ανάπτυξης. Μέχρι σήμερα έχει εφαρμοσθεί σε πάνω από 5.000 μελέτες αποκατάστασης εδάφους και υπογείου νερού στις Η.Π.Α και σε άλλες περιοχές όπως ο Καναδάς, η Ιαπωνία, η Κορέα, η Δανία, η Ιταλία, η Αγγλία, η Γερμανία, η Ολλανδία και η Πολωνία.

Η πρώτη μεγάλη εφαρμογή φραγμάτων με ORC[®] έγινε στο Νέο Μεξικό, σε μια περιοχή όπου υπήρχε διαρροή από υπόγεια δεξαμενή πετρελαίου. Δύο διαπερατά φράγματα ,αποτελούμενα από πηγάδια γεμισμένα με ORC[®] τοποθετήθηκαν στη ρυπασμένη περιοχή για να αναχαιτίσουν το ρυπασμένο πλούμιο. Ο έλεγχος της απόδοσης των φραγμάτων γινόταν με πηγάδια παρατήρησης ανάντη και κατόντη των φραγμάτων. Μετά από 200 ημέρες, χρειάστηκε η προσθήκη της μισής ποσότητας ORC[®] από την αρχική που υπήρχε στα φράγματα. Το σύστημα κόστισε 100.000 \$ για ένα χρόνο και επιτεύχθηκε 58% μείωση του BTEX (Βενζόλιο, Τολουόλιο, Αιθυλοβενζόλιο, Ξυλόλια)

Ερευνητές από το Πανεπιστήμιο του Waterloo δοκίμασαν άλλο ένα φράγμα με ORC[®] στο Οντάριο του Καναδά. Το σύστημα αυτό μείωσε τη ρύπανση από το BTEX κατά 50 % και είχε διάρκεια 7 μήνες χωρίς την πρόσθεση ORC[®]. Σε μια μικρότερη περιοχή μελέτης στην Καλιφόρνια, πηγάδια με ORC[®]

εξοικονόμησαν 100.000 \$ σε σχέση με τη χρήση της εναλλακτικής τεχνολογίας του ψεκασμού οξυγόνου (air sparging) .

Ο Koenigsberg τονίζει πως αν και το ORC[®] χρησιμοποιήθηκε αρχικά σε πηγάδια, η προτιμώμενη προσέγγιση σήμερα είναι η άμεση πλήρωση πηγαδιών GeoprobeTM με πηλώδες διάλυμα ORC[®] .Ένας έλεγχος της προσέγγισης αυτής έγινε στο Dexter του Michigan, και επιτεύχθηκε 58% μείωση του BTEX ,67% μείωση του Βενζόλιου, και εξοικονομήθηκαν 120,000 \$ σε σχέση με άλλες μεθόδους εξυγίανσης.

Ταυτόχρονη, ή διαδοχική εφαρμογή HRC(μείγμα που απελευθερώνει υδρογόνο) / ORC έχει σημαντικά αποτελέσματα στην επεξεργασία χλωριωμένων αλειφατικών υδρογονανθράκων.

8.2 ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ ΤΟΥ BTEX ΑΠΟ ΕΝΕΡΓΟ ΑΝΘΡΑΚΑ

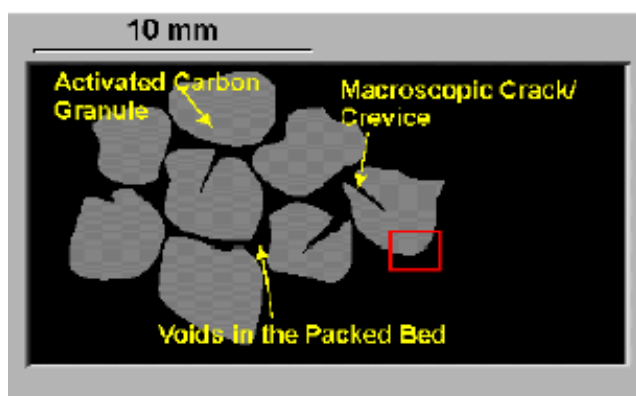
8.2.1 Γενικά Στοιχεία

Οι ικανότητες προσρόφησης των οργανικών συστατικών από την υδατική φάση (υπόγειο υδροφορέα) αυξάνουν με την χρήση ενεργού άνθρακα αντί φυσικών οργανικών προσροφητικών υλικών (χουμικά υλικά). Η χρήση του ενεργού άνθρακα ως αντιδρών μέσο στα Συστήματα Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων προτιμάται όταν το ρυπασμένο πλούμιο περιλαμβάνει εκτός από BTEX και PAH. Πρέπει επίσης να τονίσουμε ότι ο ενεργός άνθρακας προτείνεται ως μέσο εξυγίανσης του BTEX από την EPA.



Εικόνα 8-1 Σωρός από ενεργό άνθρακα
(Birke and Roehl, 2001)

Ο ενεργός άνθρακας παρουσιάζει ικανότητα προσρόφησης των οργανικών ρύπων, ειδική επιφάνεια περίπου ίση με $1000 \text{ m}^2/\text{g}$, και κοκκώδης μορφή. Σε αυτά τα χαρακτηριστικά οφείλεται η σημαντική δράση του ως αντιδρών υλικό. Η κινητική της αντίδρασης που προκαλεί, χαρακτηρίζεται από ελεγχόμενη διάχυση. Ως κρίσιμος παράγοντας σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ο χρόνος επαφής.



Εικόνα 8-2 Ο ενεργός άνθρακας στο μικροσκόπιο (Birke and Roehl)

8.2.2 Ρόφηση Και Επιβράδυνση

Η προσρόφηση των υδροφοβικών οργανικών ρύπων από την υδατική φάση αυξάνει όσο μειώνεται η διαλυτότητα των συστατικών (ή όσο αυξάνει ο συντελεστής διαχωρισμού οκτανόλης/ νερού, K_{ow}) και όσο αυξάνεται το ποσοστό του οργανικού άνθρακα στα στερεά του υδροφορέα, f_{OC} . Φυσικά υλικά που περιέχουν μεγάλες ποσότητες σε οργανικό άνθρακα, όπως είναι το κάρβουνο και ο ασφαλτώδης σχιστόλιθος προκαλούν σημαντική επιβράδυνση των οργανικών ρύπων στο υπόγειο ύδωρ. Αυτά τα υλικά με τις υψηλές ικανότητες ρόφησης είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στην παθητική απομάκρυνση των ισχυρά υδροφοβικών συστατικών που υπάρχουν στο υπόγειο ύδωρ. Περισσότερο αποτελεσματική είναι η ρόφηση σε ενεργό άνθρακα, μια μέθοδος καλά εδραιωμένη στην *ex situ* εξυγίανση του πόσιμου νερού, του μολυσμένου υπό-

γείου ύδατος και των αποβλήτων. Για να είναι η χρήση του ενεργού άνθρακα σε διαπερατούς τοίχους ή στα συστήματα Συγκλινόντων φραγμάτων και διόδων επιτυχής πρέπει να βελτιστοποιηθούν η διαπερατότητα και οι ροφητικές ιδιότητες του προσροφητικού υλικού του τοίχου. Τόσο η διαπερατότητα όσο και τα ποσοστά ρόφησης εξαρτώνται από το μέγεθος των κόκκων του προσροφητή, συγκεκριμένα η διαπερατότητα αυξάνει όταν αυξάνει το μέγεθος των κόκκων, και τα ποσοστά ρόφησης μειώνονται όταν αυξάνει το μέγεθος των κόκκων στο τετράγωνο.

Γενικά, μία οικονομικά ωφέλιμη εξυγίανση ενός υπόγειου υδροφορέα που εφαρμόζεται στο πεδίο, και βασίζεται στην προσρόφηση των συστατικών πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις.

1. Μεγάλους κύκλους αναγέννησης (3-10 χρόνια). Γι' αυτό απαιτούνται υψηλές ροφητικές ή προσροφητικές ικανότητες συνδυαζόμενες με βιολογική ή αβιοτική αποικοδόμηση των λιγότερο ροφούμενων συστατικών.
2. Σχετικά υψηλή διαπερατότητα σε σύγκριση με αυτή του υδροφορέα με σκοπό να αποφευχθούν απότομες υδραυλικές κλίσεις.
3. Γρήγορη ροφητική κινητική με σκοπό να επιτευχθούν μεγάλοι παράγοντες ρόφησης ακόμα και αν οι ταχύτητες ροής του υπογείου ύδατος είναι υψηλές.
4. Αποφυγή της μείωσης της διαπερατότητας ή της βιοχημικής επίστρωσης του προσροφητικού υλικού λόγω της ανταγωνιστικής προσρόφησης των διαλυμένων οργανικών σωματιδίων ή της ανάπτυξης ενός βιολογικού στρώματος που θα φράξει τους προσροφητικούς πόρους (ωστόσο η βιοαποικοδόμηση των ρύπων είναι επιθυμητή σε ένα ροφητικό τοίχο που περιέχει και αντιδραστήρια).

Ο γενικός τύπος που υπολογίζει τον παράγοντα καθυστέρησης R , είναι ο εξής:

$$R = 1 + \frac{\rho}{n} \cdot \frac{\partial F(c)}{\partial c} = \frac{v_a}{v_s}$$

όπου:

$F(c)$: η ισόθερμη προσρόφηση (γραμμική, Freundlich, Langmuir)

v_a : η ταχύτητα ροής του υπόγειου ύδατος

v_s : η ταχύτητα μεταφοράς ρύπων

Ενδεικτικά δίνονται κάποιες τιμές του R για:

PAH $R > 3000$ (Schad & Gathwohl, 1998)

TCE $R \approx 5000 - 20000$

Χλωροβενζόλιο (Chlorobenzene) $R \approx 10000 - 20000$ (Kober et al, 2001)

Η επιβράδυνση των ρύπων σε έναν ροφητικό διαπερατό τοίχο, μπορεί να υπολογιστεί επίσης συναρτήσει του συντελεστή ρόφησης, K_d :

$$R_d = 1 + K_d \cdot \frac{\rho}{n}$$

όπου:

ρ : είναι η αντιπροσωπευτική πυκνότητα

n : είναι το πορώδες του φίλτρου*

R_d : είναι ο παράγον καθυστέρησης

K_d : είναι ο λόγος των συγκεντρώσεων των ρύπων που έχουν ροφηθεί προς αυτές της υδατικής φάσης.

* σε συμπιεσμένα στρώματα οι τιμές των ρ και το n κυμαίνονται σε στενό εύρος

Αν η ρόφηση δεν είναι γραμμική (κάτι που είναι συχνό στην περίπτωση των ισχυρά υδροφοβικών ρύπων και ισχυρών προσροφητικών όπως ο κοκκώδης ενεργός άνθρακας, GAC), το K_d μπορεί να υπολογιστεί με μια πρώτη προσέγγιση από την ευρέως χρησιμοποιούμενη ισόθερμο του Freundlich:

$$Kd = \frac{C_s}{C_w} = K_F C_w^{1/n-1}$$

όπου:

C_s : η συγκέντρωση ισορροπίας της διαλυμένης ουσίας στην στερεά φάση

C_w : η συγκέντρωση ισορροπίας της διαλυμένης ουσίας στην υγρή φάση

K_F : ο συντελεστής ρόφησης του Freundlich

$1/n$: ο εκθέτης αυτός είναι συνήθως μικρότερος από 1(έχοντας σαν αποτέλεσμα να μειώνεται η τιμή του K_d όταν αυξάνει η συγκέντρωση του ρύπου).

8.2.3 Εκτίμηση Του Μέγιστου Χρόνου Ζωής Ενός Φράγματος Με Ενεργό Άνθρακα

Ο χρόνος ζωής ενός φράγματος με ενεργό άνθρακα υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$t_s = \frac{d}{v_a} R$$

όπου:

d : το πάχος της διόδου

v_a : η ταχύτητα ροής του υπόγειου ύδατος

R : ο παράγοντας καθυστέρησης

Για παράδειγμα, μια οριζόντια ροή που περνάει μέσα από ενεργό άνθρακα διαμέτρου 1.8 m, με ταχύτητα ροής ίση με 0.5 m/d και παράγοντα καθυστέρησης $R = 3000$: ο μέγιστος χρόνος ροής θα είναι ίσος με 30 χρόνια!!!

8.2.4 Παράγοντες Που Επηρεάζουν Το Χρόνο Ζωής Του Φράγματος

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο ζωής φράγματος με ενεργό άνθρακα ως πληρωτικό μέσο είναι :

Η σύσταση του υπόγειου νερού

- ο Ανταγωνιστική επίδραση: τα συστατικά του φυσικού υπογείου νερού και οι ρύποι συναγωνίζονται για τις θέσεις προσρόφησης
- ο Καθίζηση των δευτερευόντων ανόργανων συστατικών: Ένα στρώμα εμποδίζει την πρόσβαση στις επιφάνειες και μεταβάλλουν την κινητική της αντίδρασης.

και

Ο σχηματισμός της βιομάζας

- ο Αρνητική επίδραση: παγίδευση των ελεύθερων πόρων
- ο Θετική επίδραση: γίνεται δυνατή η βιολογική αποδόμηση των προσροφημένων ρύπων.

8.2.5 Πλεονεκτήματα Και Περιορισμοί Στη Χρήση Του Ενεργού Άνθρακα (Rogut, 2000)

Η χρήση του ενεργού άνθρακα στα υπόγεια φράγματα εμφανίζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα και περιορισμούς :

Πλεονεκτήματα

- » Αποτελεσματικός για οργανικά χαμηλής διαλυτότητας
- » Χρήσιμος για ένα ευρύ φάσμα ρύπων και συγκεντρώσεων

- » Δεν επηρεάζεται αρνητικά από την παρουσία τοξικών

Περιορισμοί

- » Υψηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης
- » Μη αποτελεσματικός σε αιωρούμενα στερεά (φράξιμο πόρων)
- » Απαιτείται προεπεξεργασία των ελαίων και λιπαντικών όταν οι συγκεντρώσεις τους είναι μεγαλύτερες από 10 mg/L.
- » Οι συνθετικές ρητίνες δεν είναι αποτελεσματικές σε ισχυρό οξειδωτικό μέσο

8.3 ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ ΤΟΥ ΒΤΕΧ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ (ΑΠΟ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ) ΜΕΘΟΔΟΣ HUMASORB-CS™

(Sanjay H.G. et al., 1997).

Ο Sanjay εισήγαγε το HUMASORB-CS™ σαν ένα πρότυπο προσροφητή για την απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων ρύπων. Αντικειμενικοί σκοποί της αξιοποίησης αυτού του προϊόντος ήταν να χρησιμοποιηθούν οι καινοφανείς ιδιότητες του χουμικού οξέος, που παράγεται από την αποσύνθεση των φυτών για τη σύλληψη των ιόντων των μετάλλων και στην προσρόφηση των οργανικών, να χαρακτηριστεί η ικανότητα ιονανταλλαγής του χουμικού οξέος, να μεταδοθεί μηχανική ισχύς στο HUMASORB-CS™ έτσι ώστε να το χειριζόμαστε με μεγαλύτερη ευκολία, και να αναπτυχθούν διαδικασίες σε εφαρμογές πεδίου που θα χρησιμοποιούν το υλικό αυτό στην εξυγίανση περιβάλλοντος και ύδατος.

Οι ιδιότητες του χουμικού οξέος περιλαμβάνουν:

- Υψηλή χημική συγγένεια με τα μέταλλα για την δημιουργία δεσμών μεταξύ τους, που οφείλεται βασικά στις δύο ομάδες που περιλαμβάνουν οξυγόνο
- Υψηλή ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων

- Δυνατότητα προσρόφησης οργανικών
- Διαλυτότητα στο νερό, επιτρέποντας του να καθιζάνει εύκολα με κοινά θρομβωτικά
- Αργή απελευθέρωση των θρεπτικών (άζωτο, φώσφορος, και θείο)
- Υψηλή ικανότητα συγκράτησης του νερού (9% κατά βάρος)
- Δυνατότητα σχηματισμού δεσμών με ιχνοστοιχεία (σίδηρος, χαλκού, ψευδαργύρου), εμποδίζοντάς τα από το να στραγγίξουν από το έδαφος
- Δυνατότητα να σχηματίζει δακτυλίους μεταλλικών ιόντων
- Δυνατότητα να δημιουργεί εύκολα θρομβώσεις με ηλεκτρολύτες
- Καυσιμότητα

Το χουμικό οξύ προέρχεται από φυσικά σκούρα-καφέ ή μαύρα οργανικά μακρομόρια με μοριακό βάρος από 0,5 έως 150 Kda. Το οργανικό υλικό διαιρείται σε τρία κλάσματα ανάλογα με την διαλυτότητά τους στο νερό. Τα χουμικά οξέα ανήκουν στο κλάσμα εκείνο που διαλύεται σε υψηλά pH. Σχηματίζονται από την αποσύνθεση φυτών και ζώων κάτω από συνθήκες υγρασίας και παράγονται επίσης με μια διαδικασία που ονομάζεται αποσάθρωση. Το χουμικό οξύ μπορεί να εξαχθεί με ποικίλα είδη από διάφορες πηγές, όπως άνθρακες, εδάφη, κοπριά, φυτά, νερό και ιζήματα. Ανεξάρτητα από την πηγή, η στοιχειώδης σύσταση του χουμικού οξέος αποτελείται μόνο από άνθρακα, υδρογόνο, οξυγόνο, άζωτο, θείο, και φώσφορο.

Εργαστηριακές δοκιμές έχουν δείξει ότι το HUMASORB-CSTM μπορεί να απομακρύνει ρύπους που περιλαμβάνουν μέταλλα, ανιόντα οξυγόνου, ραδιενεργούς πυρήνες, χλωριωμένα και μη-χλωριωμένα οργανικά, και πτητικά οργανικά. Το κόστος του HUMASORB-CSTM κυμαίνεται στα \$2.000 ανά τόνο. Το HUMASORB-CSTM μπορεί να αναγεννηθεί σε ένα ποσοστό 80 με 85 % τουλάχιστον για δύο ή τρεις κύκλους, είναι πυκνότερο από το νερό και μπορεί

να παραχθεί σε διαφορετικά μεγέθη κόκκων. Με το HUMASORB-CSTM αποφεύγεται η απελευθέρωση του σιδήρου και ο ανασχηματισμός του ρύπου.

9. ΚΟΣΤΟΣ ΤΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

(EnviroNics Directorate U.S Air Force, 1997. www.usace.army.mil)

9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

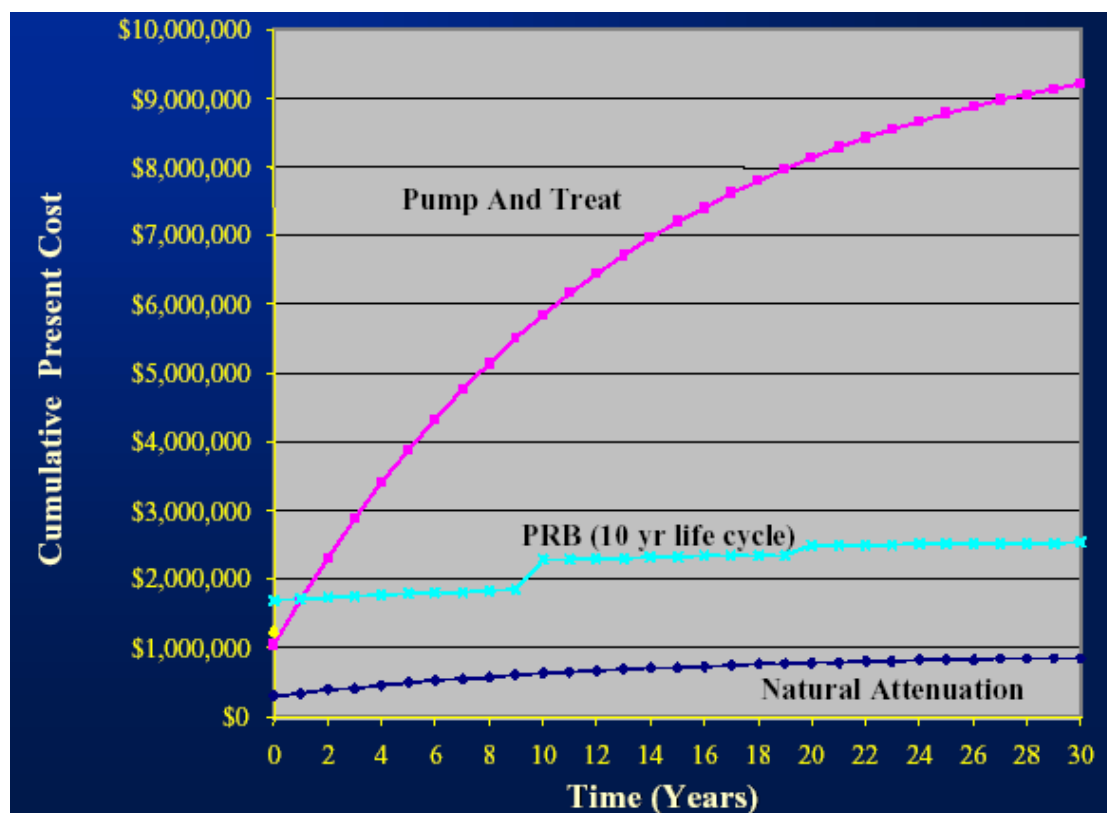
Οι in situ τεχνολογίες εξυγίανσης είναι δυνατόν να παρέχουν εξοικονόμηση κόστους, σε σύγκριση με τις ex situ τεχνικές, γιατί δεν υπάρχει ανάγκη εξόρυξης και διάθεσης ρυπασμένου εδάφους ή άντλησης και εξυγίανσης ρυπασμένου υπόγειου νερού. Οι παραδοσιακές τεχνικές, όπως το σύστημα 'pump and treat', απαιτούν μια εξωτερική πηγή ενέργειας με σχετικό κόστος αρκετά υψηλό. Εκτός από το κόστος, τα υποεπιφανειακά υπολείμματα συχνά αγγίζουν ανεπιθύμητα όρια (USEPA, 1995). Σύμφωνα με τα μειονεκτήματα των σύγχρονων διαθέσιμων τεχνολογιών, η χρήση των PRBs για την αποτελεσματικότητά τους, το χαμηλό κόστος και την παθητική εξυγίανση των ρυπαντών στο υπόγειο νερό αναμένεται να αυξηθεί.

Παρ' όλο που οι πληροφορίες για το κόστος των PRBs, που είναι διαθέσιμες είναι ελάχιστες, αυτή η τεχνολογία φαίνεται να είναι περισσότερο οικονομική από τις παραδοσιακές τεχνολογίες. Γι' αυτό το λόγο, τα διαπερατά φράγματα προσελκύουν το ενδιαφέρον (Jami Striegel et al, 2001). Σε ρυπασμένες περιοχές, όπου το πλούμιο θα μπορούσε να δημιουργείται ασταμάτητα για πολλά χρόνια ή δεκαετίες, μια παθητική τεχνολογία που απαιτεί ελάχιστη ετήσια ενέργεια έχει προφανή πλεονεκτήματα κόστους σε σύγκριση με ένα συμβατικό σύστημα pump and treat. Το πλεονέκτημα αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στην Εικόνα 9-1 και στον Πίνακα 9-1.

EXHIBIT 6. CAPITAL COST COMPARISON OF P&T AND PRB SYSTEMS					
Technology	Capital Cost Range ¹			Average Capital Cost ¹ (\$)	Number of Sites
	25 th Percentile (\$)	Median (\$)	75 th Percentile (\$)		
P&T	1,700,000	2,000,000	5,900,000	4,900,000	32
PRBs	440,000	680,000	1,000,000	730,000	16

¹ All reported costs were adjusted for site locations and years when costs were incurred

Πίνακας 9-1 Σύγκριση Μέσου Κόστους Κεφαλαίου των τεχνολογιών ‘P&T’ και ‘PRBs’ (US.EPA, February 2001)



Εικόνα 9-1 Σύγκριση κόστους τεχνολογίας ‘Pump and Treat’, ‘PRBs’ και ‘Natural Attenuation) (Vidumsky, 2000)

Αν συγκριθούν τα Ενεργή τάφρος με το σύστημα των Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων προκύπτει ότι το δεύτερο σύστημα είναι περισσότερο οικονομικό από το πρώτο για μεγάλα και βαθιά ρυπασμένα πλούμια. Αυτό οφείλεται στη ποσότητα του αντιδρώντος υλικού που απαιτείται στο για ένα συνεχές χαντάκι. Οι λασπώδης τοίχοι, οι τοίχοι από ενωμένα φύλλα ατσαλιού, και τα άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία των φραγμάτων είναι συχνά ευκολότερο και πιο οικονομικό να εγκατασταθούν από τους τοίχους του αντιδρώντος μέσου. Ο λόγος του μεγέθους των φραγμάτων προς αυτό

των διόδων πρέπει να εξισορροπιστεί ανάμεσα στους σκοπούς εξυγίανσης και στο ελάχιστο κόστος (Palmer, 1996).

9.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Συνήθως στις εφαρμογές τεχνολογιών εξυγίανσης που περιλαμβάνουν διαπερατό φράγμα υιοθετείται η περίοδος των 30 χρόνων για να εκτιμηθεί το κόστος της μελέτης. Η καθαρή παρούσα αξία (ΚΠΑ) της μελέτης προσδιορίζεται ως εξής (EnviroNics Directorate U.S Air Force, 1997):

$$\text{ΚΠΑ}_{\text{μελέτης}} = \text{Κόστος Κεφαλαίου} + \text{ΚΠΑ}_{\text{κόστος Λ\&\Sigma}}$$

$\text{ΚΠΑ}_{\text{κόστος Λ\&\Sigma}}$ = το άθροισμα των ετήσιων κοστών λειτουργίας και συντήρησης προσαρμοσμένα στον πληθωρισμό και την αξία του κεφαλαίου μετά από 30 χρόνια.

9.2.1 Κόστος Κεφαλαίου

Το κόστος του κεφαλαίου που χρειάζεται για να εγκατασταθεί ένα διαπερατό φράγμα περιλαμβάνει τους παρακάτω όρους:

- Κόστος του αντιδρώντος μέσου (εξαρτάται από το είδος του μέσου που επιλέγεται*)
- Κόστος εγκατάστασης
- Κόστος δικαιωμάτων τεχνολογικής άδειας
- Κόστος διάθεσης και αποκατάστασης της εδαφικής επιφάνειας

* ο κοκκώδης σίδηρος είναι το φθηνότερο από τα μέταλλα που διατίθενται

Το ολικό κόστος του αντιδρώντος μέσου δεν διαμορφώνεται μόνο από το είδος αλλά και από την ποσότητα του μέσου που απαιτείται. Συγκεκριμένα η ποσότητα αυτή εξαρτάται από:

- ✓ **Το είδος και τις συγκεντρώσεις των ρύπων στο πλούμιο.** Οι ρύποι που έχουν μεγαλύτερους χρόνους ημιζωής χρειάζεται να ρέουν περισσότερο μέσα στον κελί του αντιδραστήρα, και αρά το κόστος αυξάνει.
- ✓ **Τα ρυθμιστικά κριτήρια εξυγίανσης.** Όσο πιο αυστηρά είναι τα κριτήρια εξυγίανσης σ' ένα φράγμα, μεγαλύτερες απαιτήσεις σε χρόνους συγκράτησης, μεγαλύτερο πάχος του κελιού του αντιδραστήρα, τόσο αυξάνεται το κόστος.
- ✓ **Η ταχύτητα του υπογείου ύδατος.** Όσο πιο υψηλή είναι η ταχύτητα του υπογείου ύδατος, τόσο πιο μεγάλο είναι το πάχος του κελιού του αντιδραστήρα που χρειάζεται για να εξασφαλιστεί ο συγκεκριμένος χρόνος συγκράτησης, και άρα υψηλότερο κόστος.
- ✓ **Η κατανομή της ροής του υπογείου ύδατος και των ρύπων.** Σε περιοχές όπου η κατανομή της ροής του υπογείου ύδατος και των ρύπων είναι ετερογενές, ένα κελί αντιδραστήρα με ομοιόμορφο πάχος και ύψους οδηγεί σε ανεπαρκή χρήση του αντιδρώντος μέσου. Η εγκατάσταση των κελιών αντιδραστήρα σε ζώνες υψηλής διαπερατότητας ή χρήση συστημάτων Συγκλινόντων φραγμάτων και διόδων είναι μερικοί τρόποι με τους οποίους το αντιδρών μέσο μπορεί να είναι περισσότερο ομογενές.

Η μονάδα κόστους της εγκατάστασης εξαρτάται από το είδος της τεχνικής που επιλέγεται, όπου με τη σειρά της εξαρτάται από το βάθος της εγκατάστασης. Το ολικό κόστος εγκατάστασης βασίζεται σε τρεις κύριους παράγοντες:

- ✓ **Το βάθος του πλουμίου και του υδροφορέα.** Για συγκεκριμένη τεχνική το κόστος αυξάνει με το βάθος της εγκατάστασης.

- ✓ **Το πλάτος του πλουμίου.** Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος του πλουμίου, τόσο πλατύτερο είναι το πλάτος του διαπερατού φράγματος που απαιτείται για να το εγκλείσει.
- ✓ **Γεωτεχνικές μελέτες.** Η παρουσία βράχων δυσκολεύει την εγκατάσταση του εξοπλισμού στο έδαφος.

9.2.2 Κόστος Λειτουργίας Και Συντήρησης

Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης περιλαμβάνει τους παρακάτω όρους:

- **Κόστος παρακολούθησης.** Το κόστος αυτό ποικίλει από περιοχή σε περιοχή ανάλογα με τις ρυθμιστικές απαιτήσεις, τον αριθμό των πηγαιδιών παρακολούθησης, και την συχνότητα της δειγματοληψίας.
- **Κόστος συμπληρωματικής παρακολούθησης.** Αν επιθυμείται η συμπληρωματική παρακολούθηση για να επιτευχθούν άλλοι επιστημονικοί αντικειμενικοί στόχοι, αυτό το κόστος θα εξαρτάται από τον αντικειμενικό αυτό στόχο σε κάθε περιοχή.
- **Κόστος περιοδικής συντήρησης.** Η συντήρηση είναι απαραίτητη όταν ιζήματα που κατακάθονται σ' ένα σημείο αλλάζουν την αντιδραστικότητα και την υδραυλική αγωγιμότητα του κελιού του αντιδραστήρα. Σε αυτή την περίπτωση το κελί του αντιδραστήρα μπορεί να χρειαστεί να ξεπλυθεί με κάποιο αντιδραστήριο ή να αντικατασταθεί το αντιδρών μέσο. Στοιχεία από υπάρχοντα διαπερατά φράγματα δείχνουν ότι αυτού του είδους η συντήρηση γίνεται πολύ σπάνια στις περισσότερες εφαρμογές.

9.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα επιμέρους και τα ολικά κόστη διαφόρων τεχνικών εξυγίανσης (σε DM). Οι τιμές αυτές δίνουν την δυνατότητα να γίνει σύγκριση μεταξύ αυτών σε επίπεδο κόστους.

Τεχνικές	Κόστη Επένδυσης	Τρέχοντα Κόστη	Απρόβλεπτα Κόστη	Ολικό Κόστος
Θερμική Εξυγίανση	34,900,000	200,000	3,500,000	38,600,000
Περιορισμός	11,600,000	4,000,060	3,100,000	18,700,000
Pump and Treat	5,600,000	8,300,000	1,400,000	15,300,000
Ακινητοποίηση στο πεδίο	15,600,000	600,000	3,200,000	9,400,000
Φράγματα & Δίοδοι	7,500,000	4,100,000	1,700,000	13,300,000

Πίνακας 9-2 Περίληψη του υπολογιζόμενου κόστους σε DM διαφόρων τεχνικών εξυγίανσης με διάρκεια 50 χρόνων (Trischer και Partner, 1996)

9.4 ΚΟΣΤΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ PRBs

Ο Πίνακας 9-3 παρουσιάζει την διακύμανση του κόστους διαφόρων μορφών διαπερατών φραγμάτων και το μέγιστο βάθος εγκατάστασή τους. Μεταξύ αυτών φαίνεται και η μέθοδος Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων.

Μορφές PRBs	Μέγιστο Βάθος (m)	Κόστος [US\$/m ²]
1. Τάφρος με τύρφη ως πληρωτικό υλικό	5	10-100
2. Τάφρος χωρίς στερεό πληρωτικό μέσο	10	200-400
3. Τάφρος με στερεό πληρωτικό μέσο	10	100-200
4. Τοίχος επεξεργασίας από την WCI	12	500-900
5. Πατέντα του Dr. Steffen	20	200
6. Πηγάδια μεγάλης διαμέτρου	20-25	200-500
7. Μέθοδος της Sax and Klee	20	1000-1500
8. Funnel and Gate (Waterloo)	20	200-1000
9. Λάσπη Βίο-πολυμερών	30	300-500

Πίνακας 9-3 Κόστη των μεθόδων κατασκευής των διαπερατών φραγμάτων (χωρίς το πληρωτικό υλικό)

Στον Πίνακα 9-4 δίνονται οι τεχνικές εγκατάστασης αδιαπέρατων και διαπερατών τοίχων, το μέγιστο βάθος που είναι δυνατόν να έχουν και το κόστος προσφοράς-ζήτησης. Γίνονται επίσης και ορισμένα σχόλια για την κάθε τεχνική.

Emplacement Techniques	Maximum Depth (Ft)	Vendor-Quoted Cost	Comments
IMPERMEABLE BARRIER TECHNIQUES			
Soil-Bentonite Slurry Wall			
• By Standard Backhoe Excavation	30	\$2-8 /ft ²	Requires a large working area to allow for mixing of backfill. Generates some trench spoil. Relatively inexpensive when a backhoe is used.
• By Modified Backhoe Excavation	80	\$2-8 /ft ²	
• By Clamshell Excavation	150	\$6-15 /ft ²	
Cement-Bentonite Slurry Wall			
• By Standard Backhoe Excavation	30	\$4-20 /ft ²	Generates large quantities of trench spoil. More expensive than other slurry walls.
• By Modified Backhoe Excavation	80	\$4-20 /ft ²	
• By Clamshell Excavation	200	\$16-50 /ft ²	
Composite Slurry Wall	100+	NA	Multiple-barrier wall.
HDPE Geomembrane Barrier	40-50	\$35 /ft ²	Permeability less than 1×10^{-7}
Steel Sheet Piles	60	\$17-65 /ft ²	No spoils produced.
Sealable-Joint Piles	60	\$15-25 /ft ²	Groutable joints
PERMEABLE OR IMPERMEABLE BARRIER TECHNIQUES			
Caisson-Based Emplacement	45+	NA	Does not require personnel entry into excavation; relatively inexpensive.
Mandrel-Based Emplacement	190	\$7 /ft ²	Relatively inexpensive and fast production rate. Multiple void spaces constitute a reactive cell.
Continuous Trenching	35-40	\$5-12/ft ²	High production rate. High mobilization cost.
Jetting	200	\$40-200 /ft ²	Ability to install barrier around existing buried utilities.
Deep Soil Mixing	150	\$80-200 /yd ³	May not be cost effective for permeable barriers. Columns are 3 to 5 feet in diameter.
Hydraulic Fracturing	80-120	\$2300 per fracture	Can be emplaced at deep sites. Fractures are only up to 3 inches thick.
Jetting Saw Beam	50	\$3-4 /ft ²	Used for impermeable barriers.
Vibratory Beam	100	\$7 /ft ²	Driven beam is only 6 inches wide.

HDPE is high-density polyethylene.

Πίνακας 9-4 Συνολικός Πίνακας με τις τεχνικές εγκατάστασης PRBs
(EnviroNics Directorate U.S Air Force,1997)

10. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ PRBs ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

10.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ (Burmeier, 1998)

Η ιδέα της εξυγίανσης ρυπασμένου υπογείου νερού τοποθετώντας υπόγεια διαπερατά φράγματα εμφανίστηκε ως εικόνα για πρώτη φορά το 1982, σ' ένα εγχειρίδιο της U.S EPA με θέματα εξυγίανσης. Αλλά η δεκαετία του 80 δεν ήταν η κατάλληλη εποχή για την παραπέρα εξέλιξη μιας τέτοιας καινοτομικής μεθόδου εξυγίανσης στο πεδίο.

Το 1989, η δυναμική των υπόγειων διαπερατών φραγμάτων (PRBs) φάνηκε πιο καθαρά και αναπτύχθηκε περισσότερο από το Πανεπιστήμιο του Waterloo, στο Καναδά. Από τότε χρειάστηκαν πάρα πολλές εργαστηριακές και πιλοτικές έρευνες για να καταλήξουμε στη πρώτη πλήρης επίδειξη στο πεδίο, στο Borden, στο Οντάριο του Καναδά.

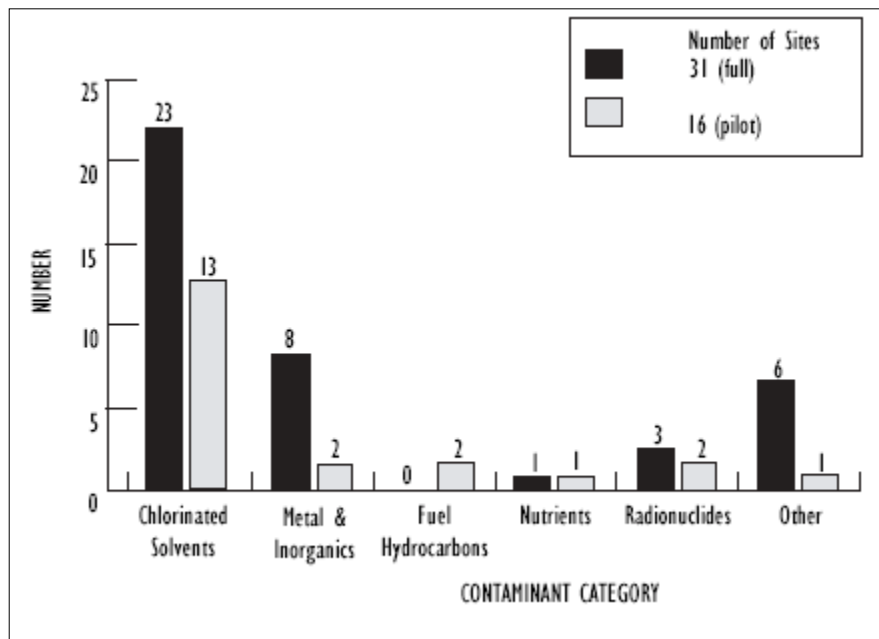
Μέχρι το 1998, πάνω από 500 μελέτες από όλο τον κόσμο καθρεπτίζουν το ενδιαφέρον που υπάρχει για αυτή την τεχνολογία. Ο μικρός αριθμός των 20 εμπορικών εφαρμογών που είχαν γίνει μέχρι τότε έδειχνε ότι υπήρχε μεγάλη απόσταση από την πιλοτική μελέτη, στην εφαρμογή στο πεδίο.

Σήμερα, πολλοί ειδικοί στη Νότια Αμερική και την Ευρώπη δουλεύουν πάνω σε διάφορα ερευνητικά θέματα που αφορούν την τεχνολογία των PRBs, όπως είναι :

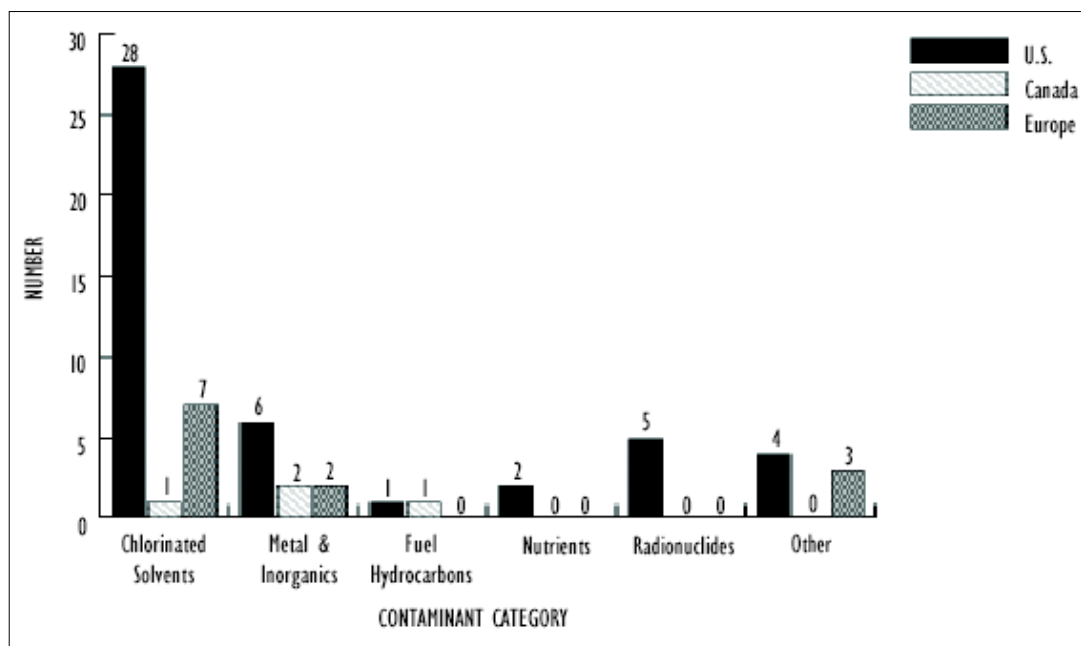
- οι διεργασίες στο μέσο και τον υδροφορέα (υδραυλική, γεωχημεία, κ.α.)
- τα κατάλληλα υλικά για το αντιδρών κελί
- ο σχεδιασμός και η κατασκευή
- η αποδοτικότητα μεγάλης διάρκειας
- η εξυγίανση πλουμίων που περιλαμβάνουν μείγματα ρυπαντών

- τα κριτήρια της κατασκευής, η παρακολούθηση κ.α.

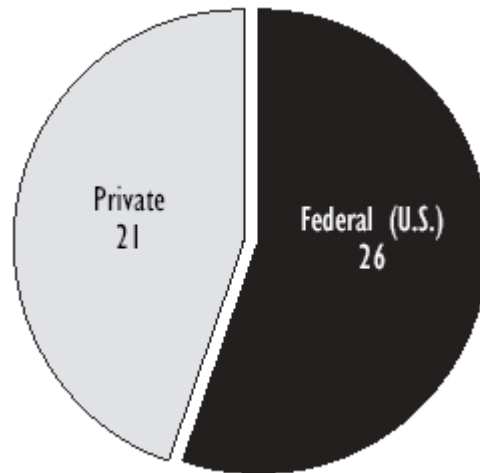
Στα διαγράμματα των παρακάτω εικόνων γίνονται διάφορες κατηγοριοποιήσεις των PRBs σύμφωνα με τις εφαρμογές που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα.



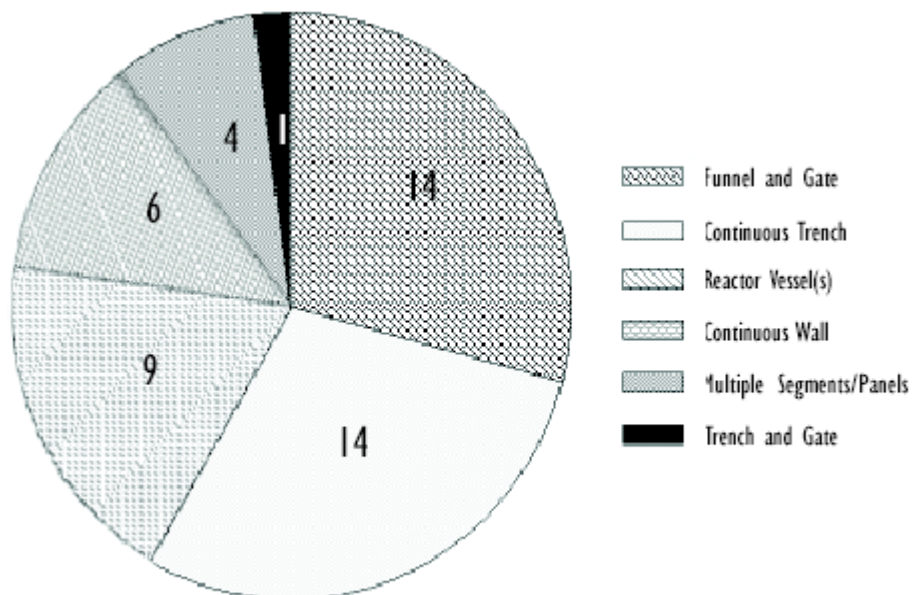
Εικόνα 10-1 Κατηγοριοποίηση των PRBs με βάση την κλίμακα εφαρμογής του και το ρυπαντή (U.S. EPA, January 2002)



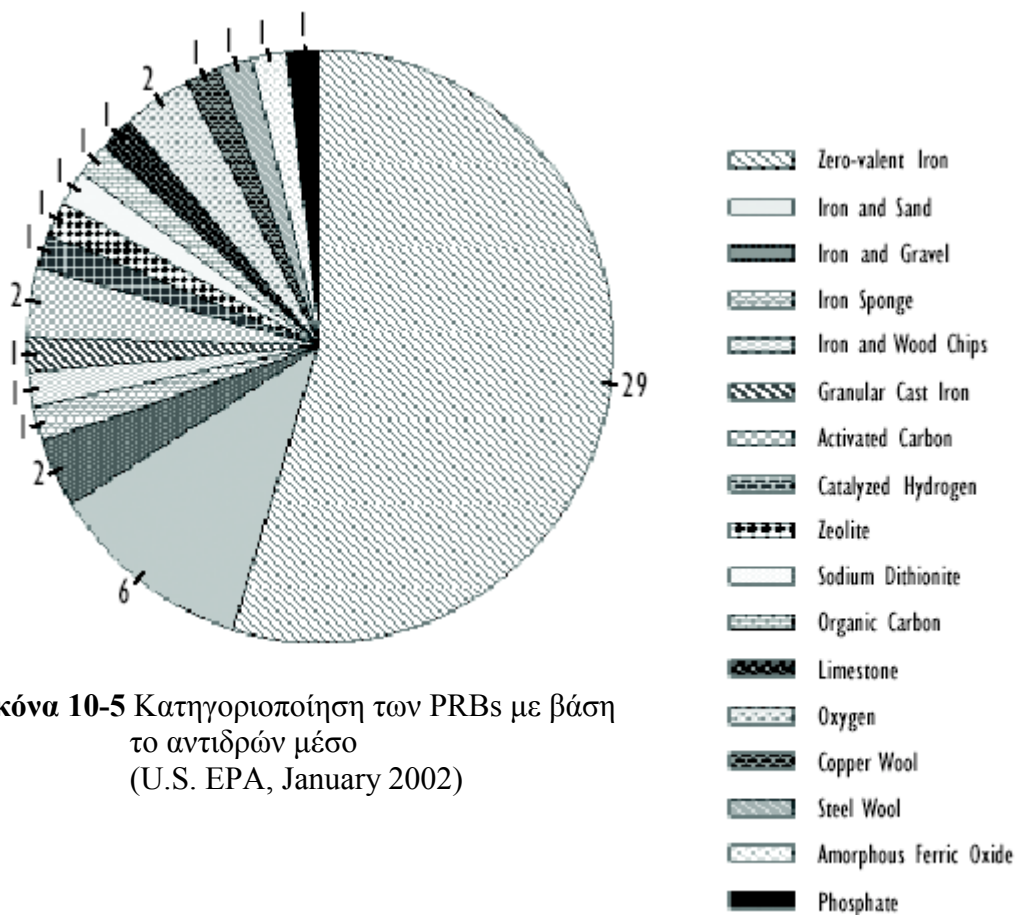
Εικόνα 10-2 Κατηγοριοποίηση των PRBs με βάση την τοποθεσία εγκατάστασης και το ρυπαντή
(U.S. EPA, January 2002)



Εικόνα 10-3 Κατηγοριοποίηση των PRBs με βάση τον φορέα υλοποίησής τους
(U.S. EPA, January 2002)



Εικόνα 10-4 Κατηγοριοποίηση των PRBs με βάση τη διάταξή τους
(U.S. EPA, January 2002)



Εικόνα 10-5 Κατηγοριοποίηση των PRBs με βάση το αντιδρών μέσο
(U.S. EPA, January 2002)

10.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

10.2.1 Alameda Point, Alameda, CA

(www.rtdf.org/public/permbarr/prbsumms/profile.cfm?mid)

Ημερομηνία εγκατάστασης : Δεκέμβριος 1996

Ρυπαντές : BTEX, VC, TCE, cDCE

Αντιδρών μέσο : Fe^0 , O

Κόστος εγκατάστασης : 400.000 \$

Κατασκευή : Συγκλίνοντα φράγματα και δίοδος με ζώνες σε

αλληλουχία

Το δεύτερο μέρος μιας πιλοτικής επίδειξης ενός *in situ* υπόγειου διαπερατού φράγματος σε σειρά (SPRB) για την εξυγίανση της περιοχής από χλωριωμένους διαλύτες και υδρογονάνθρακες πετρελαίου διεξήχθη στο Alameda Point (πρώην U.S. Ναυτικός Αεροσταθμός) στην Alameda στον Καναδά.

Ιστορικό περιοχής

Η αρχική φάση της επίδειξης, που είχε γίνει στην Καναδική στρατιωτική βάση του Borden στο Οντάριο του Καναδά, αξιολόγησε τρεις τεχνολογίες για την ικανότητά τους να επεξεργάζονται τετραχλωροαιθυλένιο (PCE), τετραχλωράνθρακα και τολουένιο. Οι τεχνολογίες ήταν :

- 1) Αβιοτική αναγωγική αφαλογόνωση χρησιμοποιώντας σίδηρο με μηδενικό σθένος, ακολουθούμενη από μείγμα που ελευθερώνει οξυγόνο (ORCTM) για την προώθηση της αερόβιας βιοαποδόμησης,
- 2) Φυσική μείωση,
- 3) Ένας διαπερατός τοίχος με προσθήκη θρεπτικών, χρησιμοποιώντας εστέρα του βενζοϊκού οξέος για την προώθηση αναερόβιας αποδόμησης, ακολουθούμενος από μια αερόβια (οξυγόνο) δίοδο βιοψεκασμού.

Στην επίδειξη στην Alameda χρησιμοποιήθηκε ένα Σύστημα Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδου στο οποίο η δίοδος αποτελούνταν από μια ζώνη με σίδηρο μηδενικού σθένους (Fe^0) ακολουθούμενη από μια ζώνη βιοψεκασμού οξυγόνου για την επεξεργασία τριχλωροαιθυλενίου (TCE), *cis*-1,2-διχλωροαιθυλενίου (cDCE), βινυλοχλωριδίου (VC) και Βενζόλιου, Τολουολίου, Αιθυλοβενζολίου, και Ξυλόλιου (BTEX).

Έχει αναγνωριστεί εδώ και καιρό πως οι υδρογονάνθρακες πετρελαίου αποδομούνται αποτελεσματικά κάτω από αερόβιες συνθήκες (Norris et al., 1994), όπως και άλλοι λιγότερο χλωριωμένοι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες όπως το βινυλοχλωρίδιο (VC) και το τετραχλωροαιθυλένιο DCE ισομερές

(Bradley and Chapelle, 1998). Η μέθοδος της εισαγωγής οξυγόνου μέσα στο ρυπασμένο υπόγειο νερό για την επεξεργασία υδρογονανθράκων πετρελαίου, είναι καλά εδραιωμένη (Norris et al., 1994). Γενικά, το οξυγόνο που εισάγεται διαλύεται στο υπόγειο νερό, προωθώντας τη βιοαποδόμηση των υδρογονανθράκων πετρελαίου και άλλων λιγότερο χλωριωμένων αλειφατικών υδρογονανθράκων από αυτόχθονα αερόβια βακτήρια κολλημένα στο πορώδες μέσο.

Η συνολική αρχική (ανάντη) συγκέντρωση των χλωριωμένων VOCs ξεπερνούσε τα 100 mg/l και το Τολουόλιο βρέθηκε σε επίπεδα των 10 mg/l. Ιστορικές αεροφωτογραφίες της περιοχής δείχνουν ανοιχτές τάφρους ανεξέλεγκτης απόρριψης ανάντη του SPRB.

Ο ρηχός υδροφορέας έχει πάχος 22-24 ft και αποτελείται από τεχνητο αμμώδες υλικό που τοποθετήθηκε υδραυλικά πάνω στους αργίλους και πηλούς του κόλπου. Το βάθος του υπογείου νερού κυμαίνεται από 4-7 ft κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Η υδραυλική αγωγιμότητα αμμώδους υλικού είναι 0,057ft/day. Το στρώμα πηλού-αργίλου έχει πάχος 15-20 ft και δρα σαν αδιαπέρατο στρώμα.

Εφαρμογή της τεχνολογίας

Κατά την κατασκευή του συστήματος συγκλίνοντος φραγμάτων και διόδου, έγινε εκσκαφή στην τεχνητή άμμο μέχρι την κορυφή του αδιαπέρατου στρώματος. Για την αποφυγή καθίζησης τοποθετήθηκε ένα στρώμα τσιμέντου στον πάτο της εκσκαφής, πάνω στο οποίο κατασκευάστηκε η πύλη. Η πύλη έχει 10 ft πλάτος και 15 ft μήκος. Καθώς το νερό περνάει διαμέσου της διόδου συναντά τις παρακάτω ζώνες: 18 in από αδρή άμμο αναμεμιγμένη με 5 % σίδηρο με μηδενικό σθένος, 5-ft σίδηρο με μηδενικό σθένος, μια μεταβατική ζώνη 3-ft χαλίκι σε μέγεθος ρεβιθιού, μία ζώνη βιοψεκασμού 3-ft και τέλος μια ζώνη 2-ft με χαλίκι σε μέγεθος ρεβιθιού. Στις δύο άκρες της διόδου τοποθετήθηκαν δυο συγκλίνοντα φράγματα 10-ft το καθένα, κάθετα στην ροή του υπογείου νερού.

Μεταξύ το Φλεβάρη του 1997 και το Μάιο του 1998, χρησιμοποιήθηκαν δυο πηγάδια άντλησης για τη λειτουργεί του συστήματος κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες. Για μια περίοδο 70 ημερών το σύστημα λειτούργησε με πυκνότητα ροής $45 \text{ ft}^3/\text{day}$ για τον καθορισμό της μέγιστης ταχύτητας που μπορούσε να διεργαστεί. Σε αυτή την ταχύτητα, παρουσιάστηκε διαρροή ρύπων από το σύστημα η οποία παρατηρήθηκε σε πολλά πηγάδια κατάντη του συστήματος. Στη συνέχεια το σύστημα λειτούργησε με πυκνότητα ροής $12 \text{ ft}^3/\text{day}$, δηλαδή συνθήκες πιο αντιπροσωπευτικές που θα δημιουργούνταν λόγω του φράγματος. Τελικά, το σύστημα αφέθηκε να λειτουργήσει υπό συνθήκες φυσικής κλίσης.

Αποτελέσματα - Παρατηρήσεις

Η συνολική απόδοση του συστήματος αξιολογήθηκε συγκρίνοντας της συγκεντρώσεις της εκροής με αυτές των κριτηρίων εκροής και υπολογίζοντας την επί τοις εκατό απώλεια μάζας στις διάφορες ζώνες. Το συγκεκριμένο σύστημα επεξεργασίας απομάκρυνε $>99.6\%$ των συνολικών οργανικών ουσιών (χλωριωμένα αιθέρια, BTEX), όταν οι συγκεντρώσεις της εισροής ήταν υψηλές, όπως το Σεπτέμβρη του 1997, και η απόδοση του έφτασε $>99.9\%$ με τη μείωση των συγκεντρώσεων της εισροής, το Γενάρη του 1998. Τα χλωριωμένα αιθέρια απομακρύνθηκαν σε ποσοστό $>91\%$ στη ζώνη του σιδήρου.

Το 66% των VC, cDCE έφτασε τελικά στη ζώνη βιοψεκασμού σε περίοδο έξι μηνών. Το 65% της μάζας του cDCE βιοαποδομήθηκε ενώ μόνο το 35% πτητικοποιήθηκε. Αντίθετα ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης του VC ήταν η πτητικοποίηση σε ποσοστό 70% , ενώ μόνο το 30% βιοαποδομήθηκε. Το βινυλοχλωρίδιο (VC) και το cis-1,2-διχλωροαιθυλενίου (cDCE), ήταν οι μόνοι οργανικοί ρυπαντές που πέρασαν τα όρια για την εκροή, αλλά αυτό συνέβη μόνο όταν οι συγκεντρώσεις της εισροής ήταν μεγαλύτερες από αυτές που είχαν υπολογιστεί στη φάση σχεδιασμού του συστήματος επεξεργασίας.

Παρ' όλα αυτά η συνολική απόδοση του συστήματος παρέμεινε υψηλή ($>99.9\%$). Η απόδοση αυτή σε τέτοιες υψηλές συγκεντρώσεις της εισροής οφείλεται πιθανά στη βελτιωμένη ζώνη βιοψεκασμού, όπου μια καλύτερα ανε-

πτυγμένη βιομάζα ήταν ικανή να απομακρύνει επιπλέον μάζα ρυπαντών σε γρηγορότερους συνολικούς ρυθμούς.

Τα BTEX δεν αποδομούνται από τον κοκκώδη σίδηρο(O' Hannesin pers.comm). Συγκρατούνται στη ζώνη του σιδήρου λόγω ρόφησης, και παροδικά εκκροφούνται. Η μείωση τους οφείλεται στην αερόβια αποδόμηση και στην πτητικοποίηση τους στα χαλίκια πριν από τη ζώνη βιοψεκασμού.

Η ζώνη βιοψεκασμού περιγράφεται καλύτερα ως βιοαντιδραστήρας πλήρους ανάμιξης παρά ως πορώδες μέσο εξαιτίας του μεγάλου πορώδους (>90 %) και της συχνής ανάμιξης του υπογείου νερού στη διάρκεια της εισαγωγής οξυγόνου. Σε ένα βιοαντιδραστήρα πλήρους ανάμιξης, οι συγκεντρώσεις των διαλυμένων ουσιών ομογενοποιούνται.

Η εμπειρία από προηγούμενες μελέτες πεδίου (Focht and O'Hannesin) έδειξε την τάση αύξησης του pH στη ζώνη του κοκκώδους σιδήρου. Ο περιοδικός ψεκασμός με CO₂ αποδείχτηκε αποτελεσματική μέθοδος για την ουδετεροποίηση του pH ,χωρίς να δρα αρνητικά στις αερόβιες μικροβιακές διεργασίες στη ζώνη βιοψεκασμού.

Γενικά ,αυτή η επίδειξη πεδίου έδειξε πως η επεξεργασία πλουμίου πολλών αναμεμιγμένων ρυπαντών (χλωριωμένοι διαλύτες και υδρογονάνθρακες πετρελαίου) χρησιμοποιώντας διαδοχικά μια ζώνη με κοκκώδη σίδηρο και μια ζώνη βιοψεκασμού είναι μια εφικτή επιλογή για το χειρισμό αυτού του τύπου ρύπανσης του υπογείου νερού.

10.2.2 Εγκατάσταση Διοίκησης Ομοσπονδιακού Αυτοκινητοδρόμου, Lakewood, CO

Ημερομηνία εγκατάστασης : Οκτώβριος 1996

Ρυπαντές : TCA, 1,1-DCE, TCE, cDCE

Αντιδρών μέσο : Fe⁰

Κόστος εγκατάστασης : 1.000.000 \$

Κατασκευή : Συγκλίνοντα φράγματα και πολλαπλοί δίοδοι

Περιγραφή περιοχής

Ένα υπόγειο διαπερατό φράγμα (PRB) εγκαταστάθηκε τον Οκτώβρη του 1996 σε μια έκταση στο Lakewood του Κολοράντο για την εξυγίανση της περιοχής από τα TCA, 1,1-DCE, TCE, cDCE. Η ρυπασμένη περιοχή είναι ένας ελεύθερος υδροφορέας πάχους 15-25 πόδια που αποτελείται από μη συμπαγοποιημένη χαλικώδη άμμο η οποία υπέρκειται ενός στρώματος αποσαθρωμένου πηλού. Τα στρώματα αυτά ενώνονται υδραυλικά και δρουν σαν ένας υδροφόρος. Η γεωμετρία του υδροφόρου είναι ακανόνιστη, με την παρουσία φακών πηλού στην άμμο και φακών αμμωδών πετρωμάτων στο στρώμα του πηλού. Ο υδροφορέας είναι αδιαπέρατος από κάτω εξαιτίας της ύπαρξης ενός στρώματος μη αποσαθρωμένου πηλού κάτω από τα άλλα στρώματα.

Εφαρμογή της τεχνολογίας

Το σύστημα των PRB αποτελείται από ένα φράγμα μήκους 1,040 πόδια και τέσσερις διόδους πλάτους 40 ποδιών. Αυτό ήταν το πρώτο σύστημα υπόγειων διαπερατών φραγμάτων με πολλαπλές διόδους που χρησιμοποιούσε κοκκώδη σίδηρο μηδενικού σθένους. Ο μεγάλος βαθμός της παράλληλης γεωλογικής ετερογένειας και της διακύμανσης των συγκεντρώσεων των πτητικών οργανικών υδρογονανθράκων (VOC) οδήγησε στην τοποθέτηση ζωνών διαφορετικού πάχους σε κάθε πύλη. Στην κατασκευή των διόδων έγινε εκσκαφή του μητρικού υλικού και αντικατάσταση του με το πληρωτικό υλικό, το οποίο διαχωριζόταν από τα υλικά του υδροφορέα με ένα στρώμα χαλικιών.

Κόστος

Το κόστος εγκατάστασης του συστήματος έφτασε τα 1.000.000 \$ και περιλαμβάνεται κόστος της μελέτης, της κατασκευής, των πρώτων υλών, και του σιδήρου.

Αποτελέσματα

Οι ταχύτητες του υπόγειου νερού διαμέσου των πυλών αναμένονταν να κυμαίνονται από 1 ft/d έως 10 ft/d, ανάλογα με τις υδρογεωλογικές συνθήκες στην περιοχή της κάθε διόδου. Μετρήσεις στις διόδους με θερμικούς (heat-pulse) μετρητές ροής κυμάνθηκαν από <0,1 ft/d έως 1,5 ft/d. Οι συγκεντρώσεις σχεδιασμού ήταν 700 μg/l για το TCE και 700μg/l για το 1,1-DCE. Ο χρόνος ημιζωής αυτών των ενώσεων όπως προκύπτει από μελέτες είναι μια ώρα ή και λιγότερο. Ο μόνος υδρογονάνθρακας που βρέθηκε να περνάει το επίπεδο αναφοράς σύμφωνα με τα όρια (5 μg/l) ήταν το 1,1-DCE με 8 μg/l στην έξοδο της διόδου.

Υπάρχουν στοιχεία για καθίζηση ασβεστίτη και σιδερίτη μέσα στα κε-
λιά των διόδων, βασισμένα στη μείωση της συγκέντρωσης του ασβεστίου και
του ανόργανου άνθρακα στο επεξεργασμένο υπόγειο νερό. Το φαινόμενο αυτό
έχει υπολογιστεί πως θα οδηγήσει σε μείωση του πορώδους κατά 0,5 % ανά
χρόνο λειτουργίας.

Το υδραυλικό ύψος ανάντη του φράγματος έχει αυξηθεί ,έως και 10 ft
σε μερικά σημεία. Αυτό αυξάνει την πιθανότητα το ρυπασμένο νερό να κινηθεί
γύρω από το φράγμα. Πράγματι, οι συγκεντρώσεις των VOCs αυξάνουν στο
υπόγειο νερό που κινείται γύρω από το νότιο άκρο του φράγματος, και μάλιστα
υπάρχουν ενδείξεις πως VOCs κινούνται και κάτω από το φράγμα σε μια πε-
ριοχή.

10.2.3 East Carrington, (Near Olds), Alberta, Canada

Ημερομηνία εγκατάστασης : Σεπτέμβριος 1995

Ρυπαντές : BTEX

Αντιδρών μέσο : O₂

Κόστος εγκατάστασης : 67.200 \$

Κατασκευή : Τάφροι αποκοπής και δίοδοι

Περιγραφή περιοχής

Ανιχνεύθηκαν συγκεντρώσεις BTEX μέχρι και 12 mg/lit μέσα στα όρια της εγκατάστασης. Σκοπός της πιλοτικής αυτής επίδειξης ήταν ο περιορισμός του BTEX στα όρια της εγκατάστασης και η διαβεβαίωση πως μόνο επεξεργασμένο υπόγειο νερό θα βγαίνει εκτός των ορίων της εγκατάστασης.

Το υπέδαφος στην περιοχή αποτελείται από ένα σχηματισμό 10 – 16 ft επιστρωμάτων από την εποχή των παγετώνων, μικρής αγωγιμότητας, αποτελούμενο από αργιλώδη πηλό και πλούσιες σε λίθους αποθέσεις. Κάτω από αυτό το στρώμα υπάρχει ένα στρώμα αργιλώδους σχιστόλιθου με φακούς άμμου. Ο ρυπασμένος υδροφορέας εκτείνεται από την επιφάνεια μέχρι τα 10 ft.

Εφαρμογή της τεχνολογίας

Έγινε εκσκαφή δύο τάφρων αποκοπής μήκους 145 ft ο καθένας, που σχηματίζουν γωνία 90 μοιρών, μέχρι το σχεδόν αδιαπέρατο πέτρωμα. Ο πυθμένας και οι κατάντη πλευρές των τάφρων μονώθηκαν με αδιαπέρατη συνθετική μεμβράνη, προτού να γεμιστούν με μείγμα αδρανών υψηλής διαπερατότητας. Το υπόγειο διαπερατό σύστημα αποτελείται από τρεις αρθρωτές διόδους πλάτους 6 ποδιών, που κατασκευάστηκαν με κάθετους αγωγούς που εισάγουν αέρα στο ρυπασμένο υπόγειο νερό, επιταχύνοντας την αποδόμηση των υδρογονανθράκων. Ο χρόνος παραμονής μέσα στη δίοδο είναι 24 ώρες. Το επεξεργασμένο νερό στη συνέχεια περνάει μέσα από μια διάταξη φιλτραρίσματος αποτελούμενη από λεπτά κάθετα χαντάκια, που περιέχουν χαλίκια υψηλής διαπερατότητας.

Επιλέχθηκε το σύστημα “ Τάφροι αποκοπής και δίοδοι” αντί του συστήματος “Συγκλίνοντα φράγματα και δίοδοι” για οικονομικούς λόγους αφού τα χαμηλής διαπερατότητας ιζήματα της περιοχής μπορούσαν να παίζουν το ρόλο των φραγμάτων.

Η τοποθέτηση αγωγών αποστράγγισης μέσα στις τάφρους είχε τα εξής αποτελέσματα

- Βελτιώθηκε η αποστράγγιση της ρυπασμένης περιοχής
- Αυξήθηκε η ζώνη εγκλωβισμού και οριζόντια και κατακόρυφα
- Αποφεύχθηκε η συσσώρευση νερού στις τάφρους αποκοπής, που θα είχε ως αποτέλεσμα την κίνηση των ρυπαντών γύρω ή κάτω τους

Κόστος

Ο σχεδιασμός, τα υλικά και η τοποθέτηση κόστισε περίπου 67.000 \$

Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της πιλοτικής αυτής εφαρμογής δείχνουν πως το ρυπασμένο πλούμιο εγκλωβίστηκε και επεξεργάστηκε από το σύστημα. Πρόσφατη δειγματοληψία έδωσε συγκεντρώσεις BTEX κάτω από τα 10 µg/lit στην δίοδο, και μηδενικές συγκεντρώσεις έξω από τα όρια της εγκατάστασης

Η εισαγωγή αέρα αποδείχτηκε μια αποτελεσματική μέθοδος για την εντατικοποίηση της βιοαποδόμησης μέσω της πρόσθεσης οξυγόνου στο κελί επεξεργασίας. Πειράματα με τη χρήση μείγματος απελευθέρωσης οξυγόνου (ORC), δεν ήταν αποτελεσματικά. Παρόλα αυτά η πρόσθεση φωσφόρου αύξησε τους ρυθμούς της βιοαποδόμησης.

Περισσότερες εφαρμογές των υπόγειων διαπερατών φραγμάτων παρατίθενται στο Παράρτημα II

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
“FUNNEL AND GATE” ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ ARGUS ONE student
ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΡΥΠΑΣΜΕΝΗ ΑΠΟ
BTEX

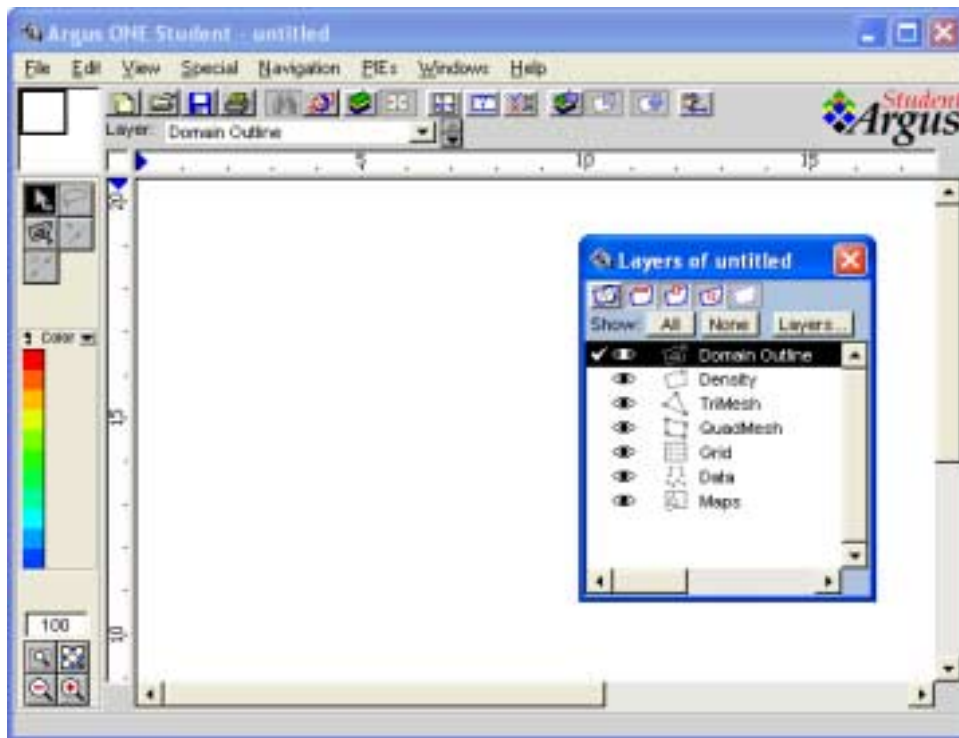
11. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΔΩΝ ΣΕ ΔΥΟ ΑΠΛΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΡΥΠΑΣΜΕΝΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

11.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

11.1.1 Προσομοίωση Αρχικής Κατάστασης Της Περιοχής

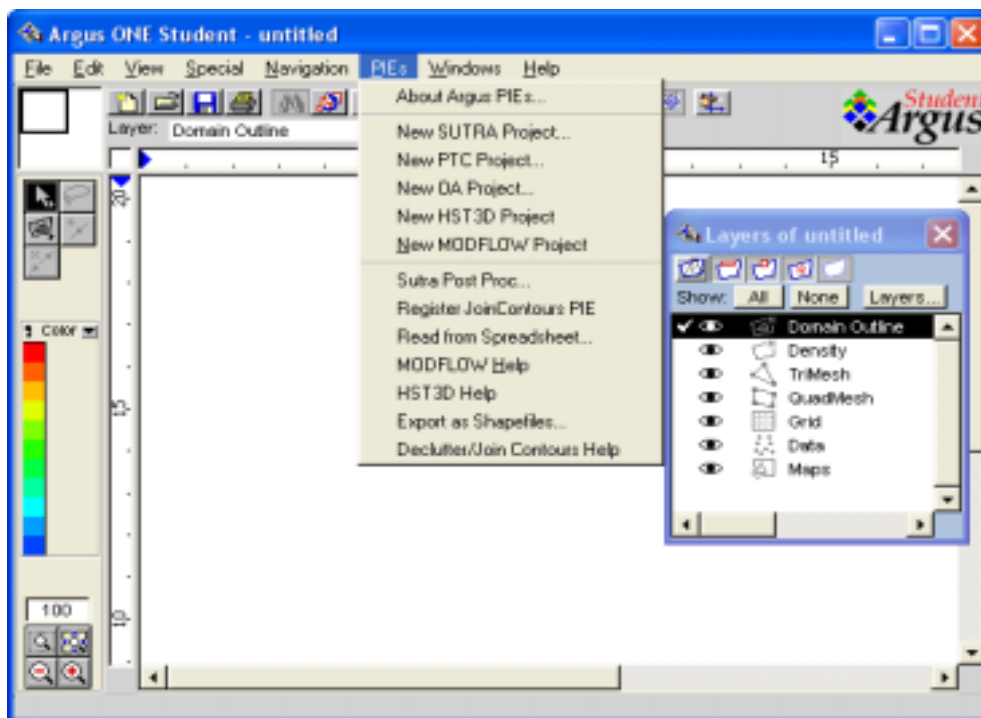
Πριν την εφαρμογή της τεχνολογίας των συγκλινόντων φραγμάτων και διόδων για την εξυγίανση της περιοχής που θα μελετήσουμε στην παρούσα εργασία είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί ένα απλό παράδειγμα που θα οδηγήσει στην εύρεση της βέλτιστης διάταξης φραγμάτων και διόδων που εφαρμοστεί στο πεδίο. Στην φανταστική αυτή περίπτωση θα προσομοιώσουμε την ροή του υπογείου ύδατος και τη μεταφορά ρύπων, σε *ελεύθερο υδροφόρεα* με τη χρήση του Μοντέλου ARGUS ONE και του κώδικα PTC. Στην συνέχεια θα προσπαθήσουμε να εφαρμόσουμε την τεχνολογία των συγκλινόντων φραγμάτων και διόδων για την εξυγίανση της περιοχής αυτής.

Όταν το πρόγραμμα ARGUS ONE ξεκινά εμφανίζεται το βασικό παράθυρο του προγράμματος και η στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας ‘**Layers**’ όπως φαίνεται στην Εικόνα 11-1. Αρχικά τα επίπεδα πληροφορίας που δημιουργούνται είναι οι **Domain Outline**, **Density**, **TriMesh**, **QuadMesh**, **Grid**, **Data** and **Maps**.



Εικόνα 11-1 Βασικό παράθυρο του ARGUS ONE και η στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας

Για να δημιουργήσουμε μια νέα εφαρμογή στο ARGUS ONE επιλέγουμε από το μενού PIEs το “**New PTC Project. . .**” όπως στην Εικόνα 11-2 Αυτή η επιλογή θα εμφανίσει το παράθυρο που φαίνεται στην Εικόνα 11-3.



Εικόνα 11-2 Η επιλογή “New PTC Project. . .” από το μενού PIEs



Εικόνα 11-3 Διαμόρφωση της εφαρμογής του PTC ‘PTC Configuration’, ‘General’

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ PTC ‘PTC Configuration’

Το παράθυρο του ‘PTC Configuration’ έχει δύο επιλογές:

A) General (Εικόνα 11-3)

Σ’ αυτήν την επιλογή εισάγονται:

- 1 Το όνομα του εφαρμογής ‘**Project title**’.
2. Το είδος του δικτύου που θα δημιουργηθεί ‘**Mesh type**’ . Το πρόγραμμα δίνει δυο επιλογές την τριγωνική και την τετραγωνική ‘**triangular or quadrilateral**’. Επιλέγεται η τριγωνική για καλύτερη προσομοίωση των διαφορών οριακών συνθηκών. Αν ο χρήστης δεν καθορίσει το είδος του δικτύου, επιλέγεται αυτόματα η τριγωνική μορφή. Όταν το ‘PTC Configuration’ επανεμφανιστεί με τη επιλογή ‘**Edit Project Info. . .**’ από το μενού ‘**PIEs**’, δεν είναι δυνατόν να αλλαχθούν τα δεδομένα που αφορούν το είδος του δικτύου.

3. Τη μοριακή διάχυση **‘molecular diffusion’**.
4. Το βάρος στα ανάντη **‘upstream weight’**.
5. Το κριτήριο μέγιστης απόκλισης που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς για να θεωρηθεί ότι έχουμε σταθερή κατάσταση **‘steady-state criterion’**.

Στην ομάδα παραμέτρων με επικεφαλίδα *Ελεύθερη επιφάνεια νερού*

‘Use water table’, εισάγονται:

1. Επιλέγεται το **‘Use water table’** στην περίπτωση που έχουμε ελεύθερο υδροφορέα. Σε αντίθετη περίπτωση δηλαδή, όταν ο υδροφορέας είναι περιορισμένος το αφήνουμε κενό.
2. Αν ο υδροφορέας είναι ελεύθερος εισάγεται ο αριθμός των επαναλήψεων **‘number of iterations for water table’**.
3. Το κριτήριο απόκλισης για τις παραπάνω επαναλήψεις προσομοίωσης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού **‘convergence criterion’**.

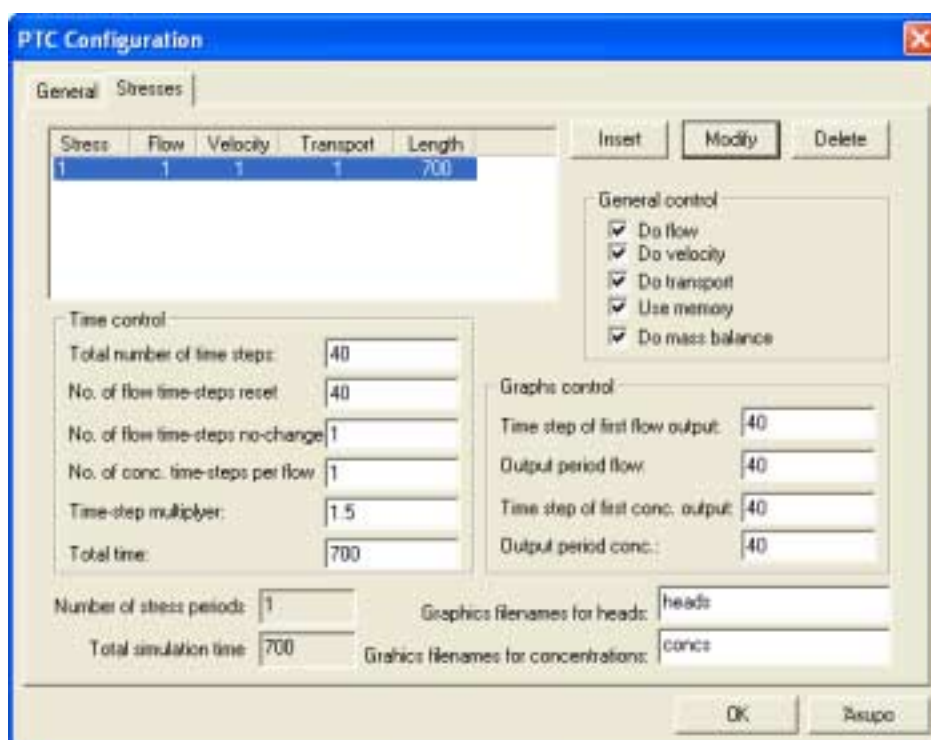
Στην ομάδα παραμέτρων με επικεφαλίδα **‘Echo options’**, επιλέγουμε τα δεδομένα που επιθυμούμε να εξαχθούν από το μοντέλο:

1. Συντεταγμένες των κόμβων **‘Nodal coordinates’**.
2. Ανύψωση της διεπιφάνειας των στρωμάτων **‘Interface elevations’**.
3. Οριακές συνθήκες **‘Boundary conditions’**.
4. Ιδιότητες γεωλογικών στρωμάτων **‘Material properties’**.
5. Λίστα συμβάντων **‘Incidence list’**.
6. Παροχή διήθησης (βροχή) **‘Infiltration flux (rain)’**.
7. Αρχικά υδραυλικά ύψη **‘Initial heads’**.

8. Αρχικές Συγκεντρώσεις ‘Initial concentrations’.

Τέλος, ορίζεται ο αριθμός των γεωλογικών σχηματισμών της εφαρμογής από την επιλογή ‘Number of layers’. *

B) Stresses (Εικόνα 11-4)



Εικόνα 11-4 Διαμόρφωση της εφαρμογής του PTC ‘PTC Configuration’, ‘Stresses’.

Σ’ αυτήν την επιλογή καθορίζεται ο αριθμός των εργασιών της εφαρμογής και οι τιμές όλων των παραμέτρων του PTC που αλλάζουν ανά εργασία. Η λίστα ελέγχου στη κορυφή έχει προκαθορισμένη μια περίοδο εργασίας. Τα κουμπιά “Insert”, “Modify” και “Delete” δίνουν την δυνατότητα πρόσθεσης, μετατροπής και διαγραφής εργασιών.

Για να αλλαχθούν οι τιμές μιας συγκεκριμένης εργασίας,

* Στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότεροι από ένας γεωλογικοί σχηματισμοί η αρίθμηση τους ξεκινάει από κατώτερα στρώματα.

1. Επιλέγεται η εργασία από την λίστα ελέγχου,
2. Εισάγονται οι νέες τιμές στα αντίστοιχα κουτιά επιλογής της σελίδας,
3. Για να αναγνωρίσει ο κώδικας τις αλλαγές πρέπει να πατηθεί το κουμπί

Modify

Τα σημεία ελέγχου στη σελίδα αυτή προσδιορίζουν τις ακόλουθες παραμέτρους και διακόπτες ανά εργασία στο PTC.

Στην ομάδα παραμέτρων με επικεφαλίδα “**General control**”, υπάρχουν πέντε κουτιά επιλογής που εξηγούνται στον παρακάτω πίνακα:

Do flow	Να γίνουν ή όχι οι υπολογισμοί ροής υπογείου ύδατος
Do velocity	Να γίνουν ή όχι οι υπολογισμοί ταχύτητας
Do transport	Να γίνουν ή όχι οι υπολογισμοί μεταφοράς μάζας ρύπων
Use memory	Χρήση εικονικής μνήμης, να είναι επιλεγμένο
Do mass balance	Να γίνουν ή όχι οι υπολογισμοί ισοζυγίου μάζας, να είναι επιλεγμένο

Πίνακας 11-1 Ομάδα παραμέτρων “**General control**”

Στην ομάδα παραμέτρων με επικεφαλίδα “**Time control**”, υπάρχουν έξι κουτιά κειμένων, που εξηγούνται στον παρακάτω πίνακα:

Total number of time steps	Αριθμός χρονικών βημάτων για την περίοδο εργασίας.
No. of flow time-steps reset	Αριθμός χρονικών βημάτων μετά τον οποίο το χρονικό βήμα θα αλλάξει με βάση τον πολλαπλασιαστή που καθορίζεται παρακάτω.
No. of flow time-steps no-change	Αριθμός χρονικών βημάτων μετά τον οποίο το χρονικό βήμα δεν θα αλλάζει πια από τον πολλαπλασιαστή.
No. of conc. time-steps per flow	Αριθμός χρονικών βημάτων για τους υπολογισμούς της συγκέντρωσης των ρυπαντών ανά χρονικό βήμα για τη ροή.
Time-step multiplier	Πολλαπλασιαστής του χρονικού βήματος που χρησιμοποιείται στα κουτιά δύο και τρία αυτής της ομάδας.
Total time	Συνολικός χρόνος για την περίοδο εργασίας.

Πίνακας 11-2 Ομάδα παραμέτρων “Time control”

Στην ομάδα παραμέτρων με επικεφαλίδα ‘**Graphs control**’, υπάρχουν τέσσερα κουτιά κειμένων, που εξηγούνται στον παρακάτω πίνακα:

Time step of first flow output	Χρονικό βήμα πρώτης εξαγωγής της ροής σε αρχεία γραφικών.
Output period flow	Περίοδος εξαγωγής ροής σε αρχεία γραφικών.
Time step of first conc. output	Ομοίως με τη ροή αλλά για συγκέντρωση.
Output period conc	Ομοίως με τη ροή αλλά για συγκέντρωση.

Πίνακας 11-3 Ομάδα παραμέτρων ‘Graphs control’

Τα τέσσερα τελευταία κουτιά ελέγχου είναι:

Number of stress periods	Αριθμός περιόδων εργασίας
Total simulation time	Συνολικός χρόνος προσομοίωσης, ίσος με το άθροισμα όλων των χρόνων που εισάγονται ανά εργασία.
Graphics filenames for heads	Εισαγωγή ονομάτων αρχείων γραφικών ανά εργασία για τα υδραυλικά ύψη.
Graphics filenames for concentrations	Εισαγωγή ονομάτων αρχείων γραφικών ανά εργασία για τη συγκέντρωση

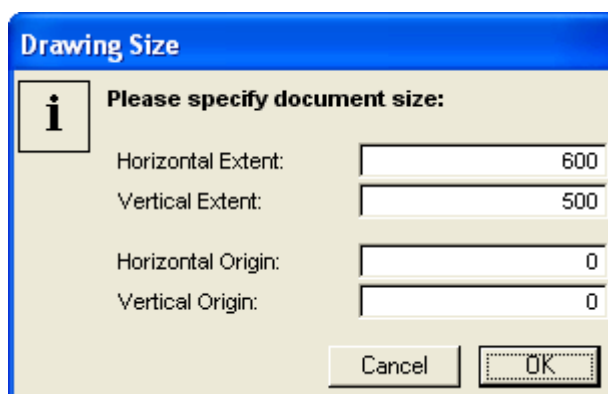
Πίνακας 11-4 Κουτιά γενικού ελέγχου

Στην εφαρμογή εισάγονται οι τιμές που φαίνονται στις Εικόνα 11-4. Υπάρχει, δηλαδή, μια περίοδος εργασίας και ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης είναι 700. Ο χρόνος προσομοίωσης και τα χρονικά βήματα εκφράζονται σε ημέρες. Το χρονικό βήμα ισούται με το πηλίκο του χρόνου προσομοίωσης δια τον αριθμό των χρονικών βημάτων.

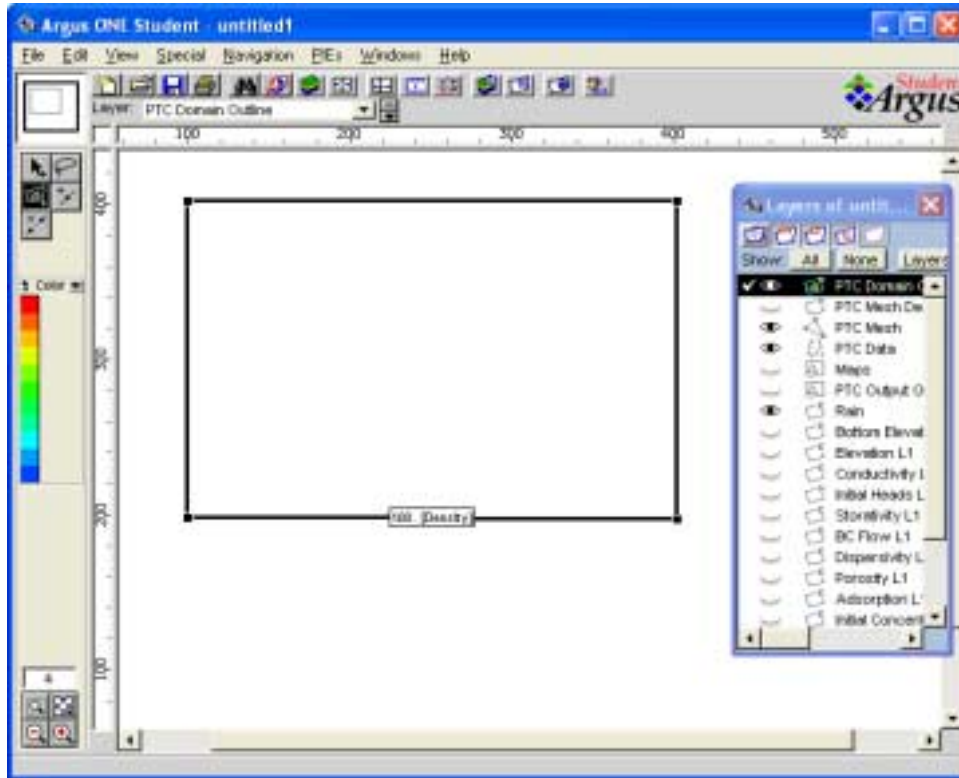
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Πριν αρχίσει ο σχεδιασμός της περιοχής, καθορίζεται το μέγεθος της περιοχής σχεδίασης. Η οριζόντια έκταση είναι 600 m και η κάθετη 500 m. Τα δεδομένα αυτά εισάγονται από το μενού “**Special / Drawing size**”(Εικόνα 11-5).

Εικόνα 11-5 Καθορισμός μεγέθους περιοχής σχεδίασης

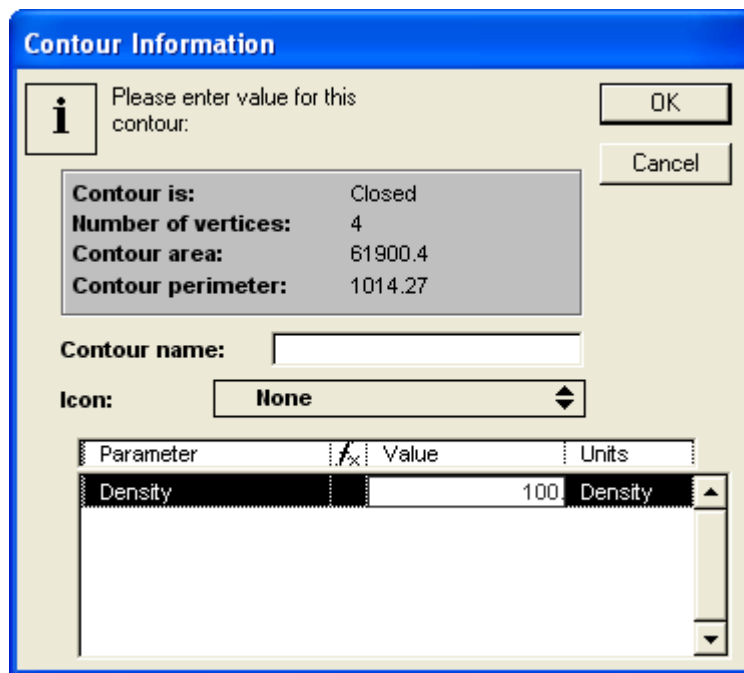


Στην συνέχεια για το σχεδιασμό της περιοχής της εφαρμογής ενεργοποιείται το **‘PTC Domain Outline layer’**. Από την αριστερή εργαλειοθήκη επιλέγεται το **‘Closed Geographic Tool’** και σχεδιάζεται ορθογωνική περιοχή μήκους 300 m και πλάτους 200 m (Εικόνα 11-6)



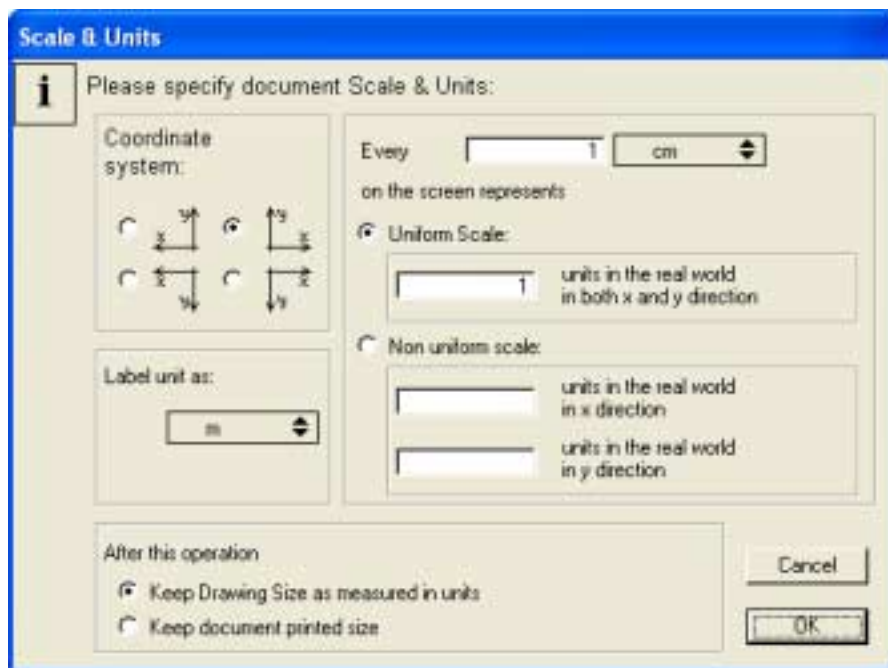
Εικόνα 11-6 Σχεδιασμός περιοχής εφαρμογής

Μόλις κλείσει το ορθογώνιο εμφανίζεται το παράθυρο **‘Contour Information’** και εισάγεται η πυκνότητα του δικτύου ίση με 100 (Εικόνα 11-7). Όσο μικρότερη τιμή εισάγεται στο **‘Density’**, τόσο αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων του δικτύου που δημιουργούνται.



Εικόνα 11-7 Παράθυρο πυκνότητας δικτύου

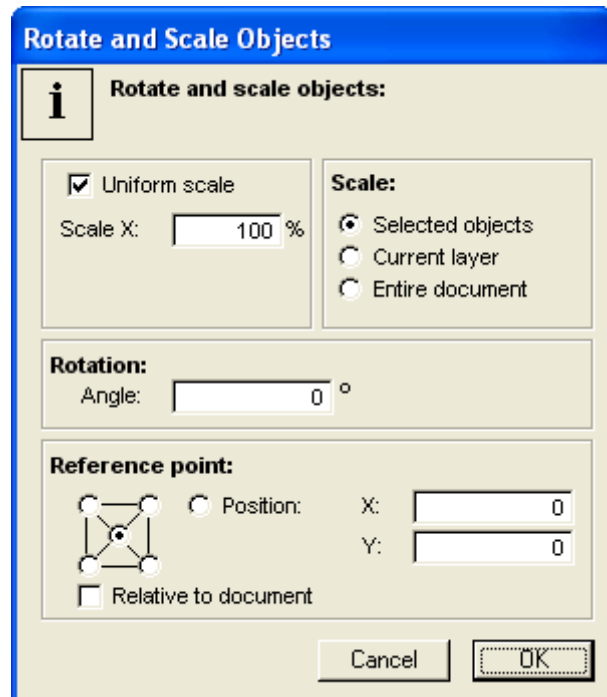
Απαραίτητο, βέβαια, είναι να καθοριστεί η μονάδα μήκους στην περιοχή σχεδίασης. Από το μενού “**Special / Scale and Units / Label unit as**” επιλέγεται ως μονάδα μήκους τα μέτρα (m). Οι υπόλοιπες επιλογές του παραθύρου αφήνονται ως έχουν (Εικόνα 11-8).



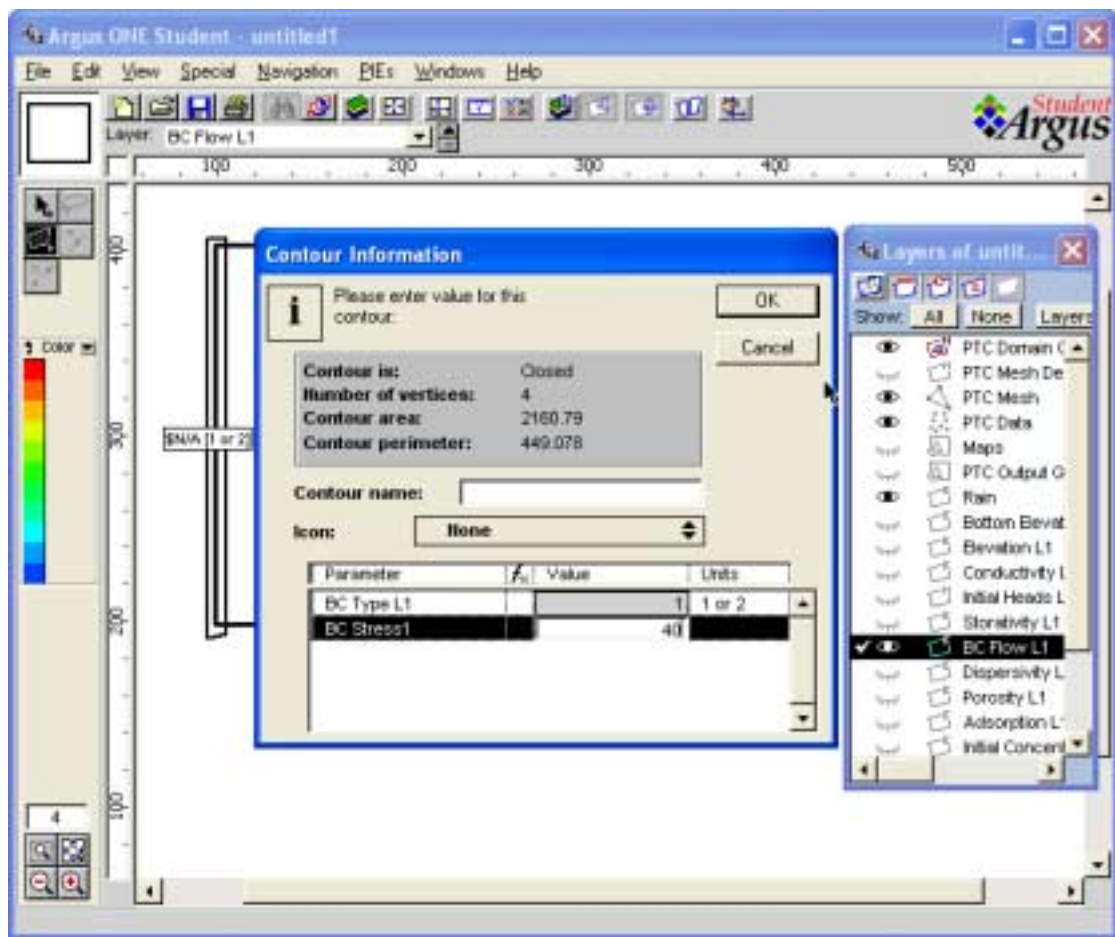
Εικόνα 11-8 Καθορισμός μονάδας μήκους

Από το μενού “**Special / Rotate and Scale Objects**”, επιλέγεται ομοιόμορφη κλίμακα και ορίζεται η κλίμακα στον X άξονα ίση με 100 % (Εικόνα 11-9).

Εικόνα 11-9 Ορισμός κλίμακας στον X άξονα



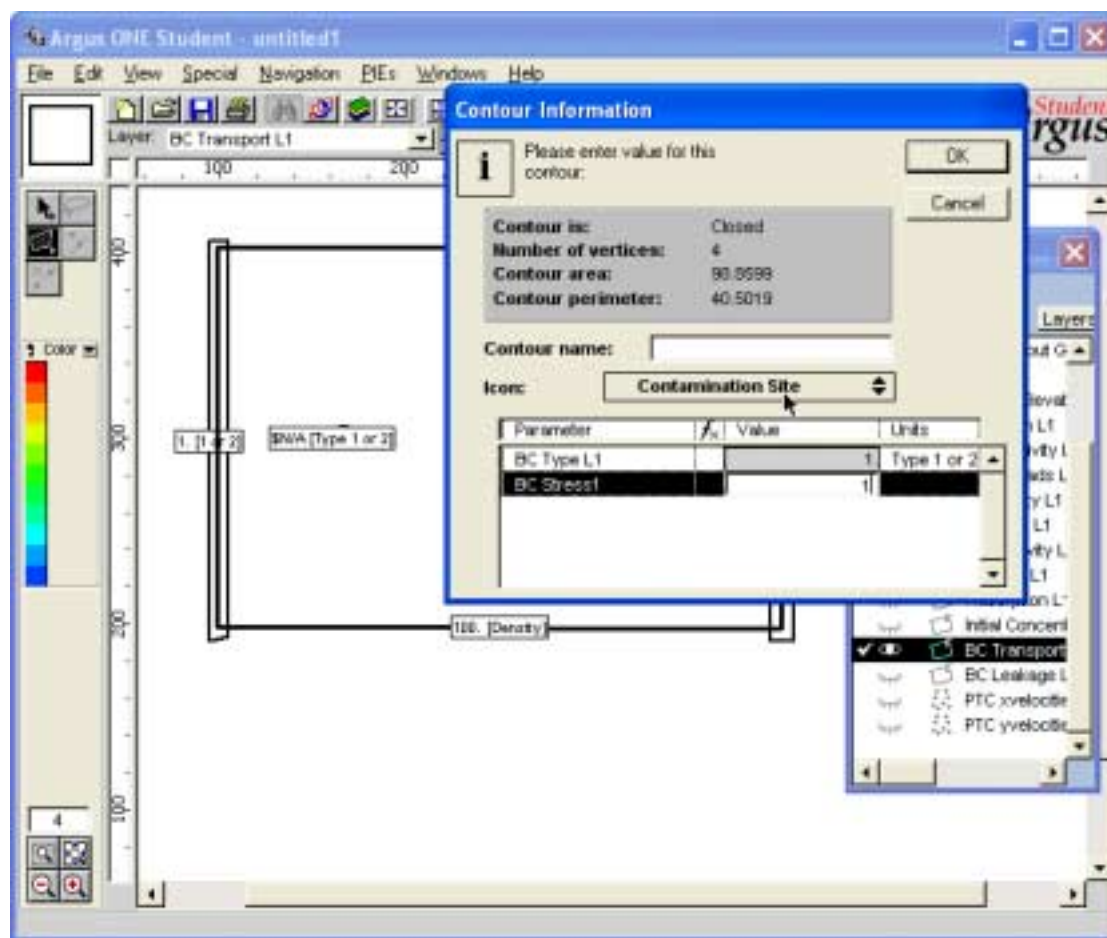
Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τον καθορισμό των οριακών συνθηκών ροής . Ενεργοποιείται από τη στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας ‘**Layers**’ το “**BC Flow L1 layer**”. Από την αριστερή εργαλειοθήκη επιλέγεται το ‘**Closed Polygon Tool**’ και περικλείονται οι περιοχές για τις οποίες θα ισχύουν οι αντίστοιχες οριακές συνθήκες. Μόλις κλείσει το ορθογώνιο που περικλείει τις περιοχές εμφανίζεται το παράθυρο ‘**Contour Information**’. Στην παράμετρο ‘**BC Type L1**’ εισάγεται η τιμή 1 που αντιστοιχεί στο πρώτο είδος οριακών συνθηκών (σταθερό υδραυλικό ύψος). Στην παράμετρο ‘**BC Stress1**’ εισάγεται η τιμή του υδραυλικού ύψους. Για το αριστερό όριο το υδραυλικό ύψος είναι 40 m και για το δεξί 33 m (Εικόνα 11-10).



Εικόνα 11-10 Εισαγωγή οριακών συνθηκών ροής

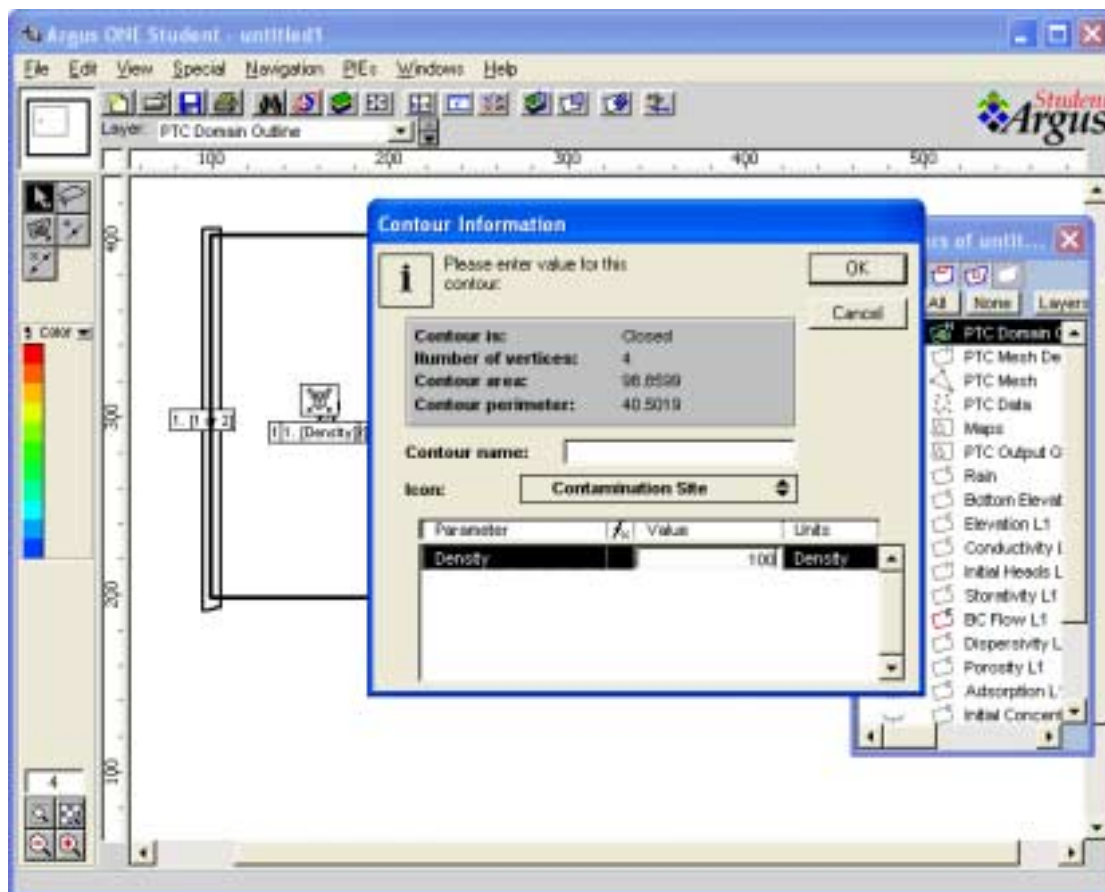
Στη συνέχεια θα τοποθετηθεί μια πηγή ρύπανσης (Εικόνα 11-11), για να προσομοιωθεί η μεταφορά μάζας στην περιοχή. Ενεργοποιείται από τη στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας **'Layers'** το **"BC Transport L1 layer"**. Από την αριστερή εργαλειοθήκη επιλέγεται το **'Closed Polygon Tool'** και περικλείεται η περιοχή που καλύπτει η πηγή. Μόλις σχηματιστεί η πηγή, εμφανίζεται το παράθυρο **'Contour Information'**. Στην παράμετρο **'BC Type L1'** εισάγεται η τιμή 1 που αντιστοιχεί στο πρώτο είδος οριακών συνθηκών (σταθερή συγκέντρωση). Στην παράμετρο **'BC Stress1'** εισάγεται η τιμή 1 που αντιστοιχεί σε συγκέντρωση ρυπαντή ίση με $1 \text{ gr} / \text{m}^3$. Με τον τρόπο αυτό είναι εύκολο να εξαχθούν συμπεράσματα για οποιαδήποτε συγκέντρωση ρυπαντή, αφού όλες οι συγκεντρώσεις που θα παρατηρηθούν στην περιοχή θα είναι ποσοστό της μονάδας.

Από την επιλογή ‘**Icon**’ επιλέγεται η εικόνα που αντιστοιχεί στην πηγή ρύπανσης ‘**Contamination site**’.



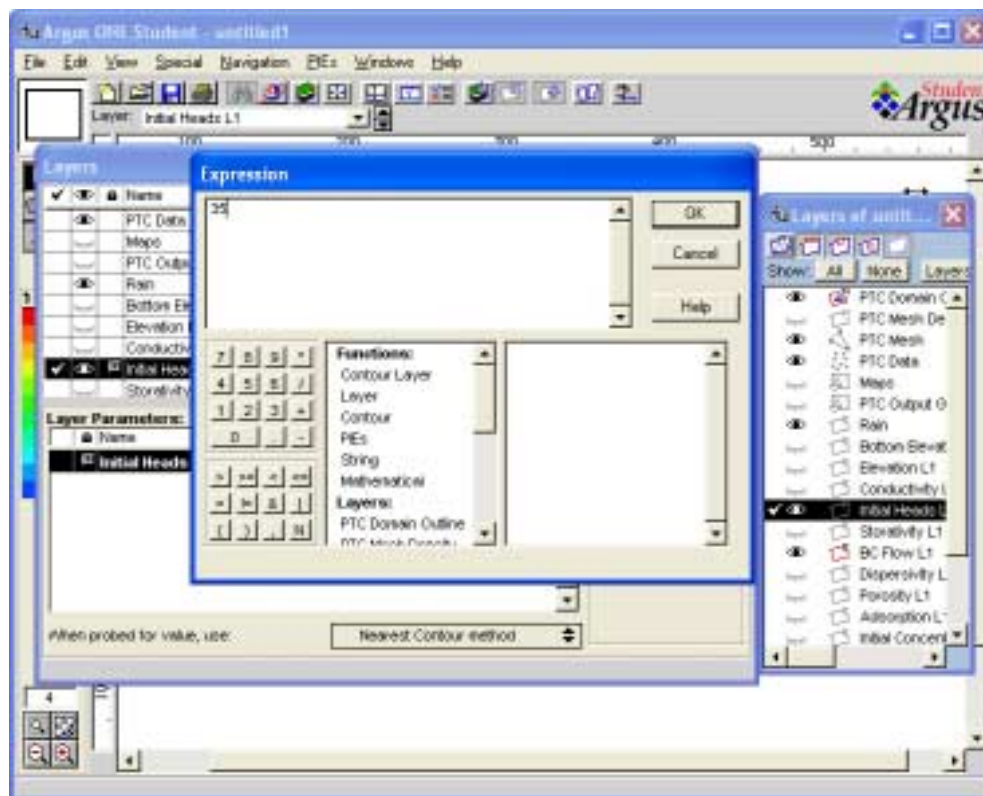
Εικόνα 11-11 Τοποθέτηση πηγής ρύπανσης.

Είναι σημαντικό η πηγή να τοποθετηθεί και στο ‘**Domain Outline layer**’. Βρισκόμενοι στο “**BC Transport L1 layer**” επιλέγουμε την πηγή με το ‘**Navigate Tool**’ της αριστερής εργαλειοθήκης, την αντιγράφουμε (**Copy**) και αφού το ‘**Domain Outline layer**’ έχει ενεργοποιηθεί, την επικολλούμε (**Paste**). Στη συνέχεια την επιλέγουμε από το ‘**Domain Outline layer**’ και εμφανίζεται το παράθυρο ‘**Contour Information**’ όπου αλλάζουμε το ‘**Density value**’ σε 100 (Εικόνα 11-12).



Εικόνα 11-12 Παράθυρο ‘Contour Information’

Στο επόμενο στάδιο προσδιορίζονται οι τιμές των επιπέδων πληροφορίας. Ενεργοποιείται από τη στήλη ‘Layers’ το ‘Initial Heads L1 layer’, και από την επιλογή ‘Show’ του παραθύρου ανοίγεται το ‘Layers’. Στο ‘Layer Parameter / Value’ επιλέγεται το κουμπί **fx** και ανοίγει το παράθυρο ‘Expression’ στο οποίο εισάγεται η τιμή του αρχικού ύψους της περιοχής (Εικόνα 11-13). Το είδος της τιμής που θα δοθεί ορίζεται ως πληροφορία ‘Information’.



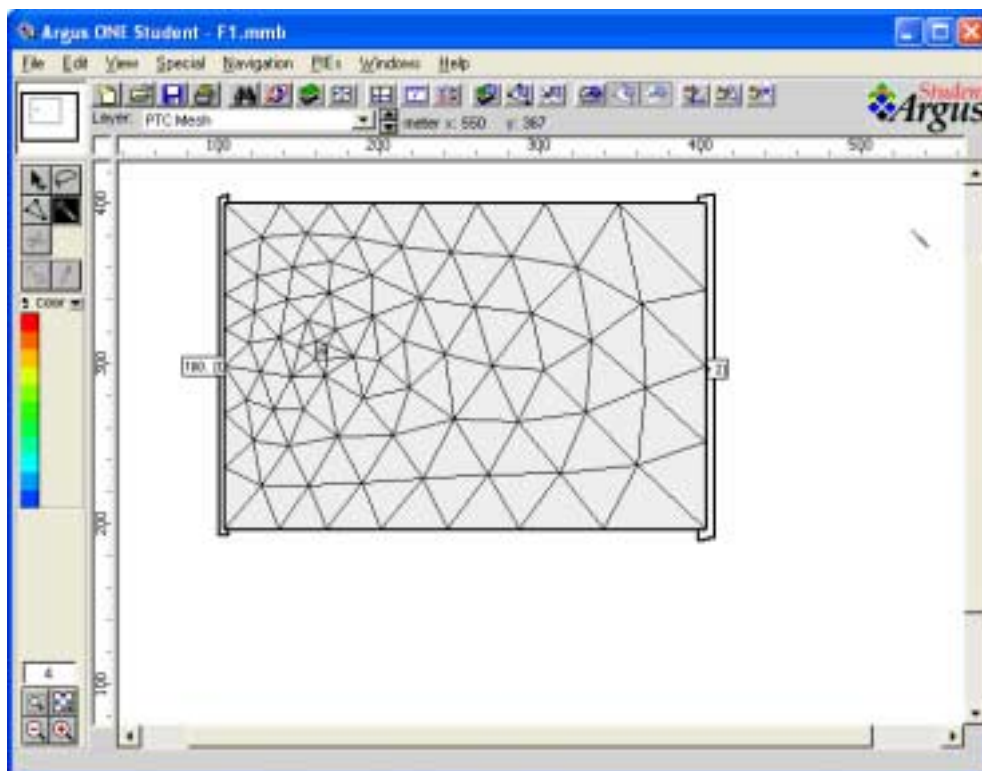
Εικόνα 11-13 Εισαγωγή τιμής αρχικού ύψους περιοχής

Με την ίδια διαδικασία, δίνονται τιμές στα επίπεδα πληροφορίας του πίνακα που ακολουθεί :

Initial Head L1 (m)	35
Elevation L1 (m)	45
Bottom Elevation L1 (m)	0
Porosity L1	0.2
Storativity L1	0.6
Initial Concentration L1 (gr / m ³)	0
Rain (m / day)	0
Conductivity L1 x / y / z (m / day)	1 / 1 / 0.1
Dispersivity L1 x / y / z (m)	1 / 1 / 1
Adsorption L1 x / y / z	0 / 0 / 0

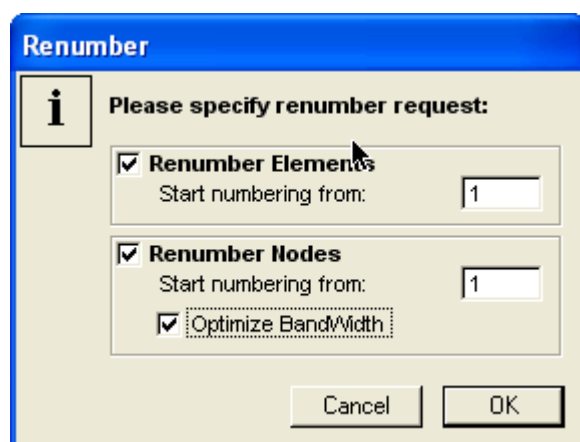
Πίνακας 11-5 Τιμές των παραμέτρων εισαγωγής στο μοντέλο

Στο επόμενο στάδιο δημιουργείται το δίκτυο των στοιχείων στην περιοχή της προσομοίωσης. Ενεργοποιείται από τη στήλη **'Layers'** το **'PTC Mesh'** και από την αριστερή εργαλειοθήκη διαλέγεται το **'Magic wand tool'**. Πατώντας με το **'Magic wand tool'** μέσα στην περιοχή μελέτης αυτόματα δημιουργείται το δίκτυο των στοιχείων (Εικόνα 11-14). Η έκδοση του μοντέλου που χρησιμοποιείται (ARGUS ONE Student) υποστηρίζει δίκτυα που αποτελούνται το πολύ από 2000 στοιχεία.



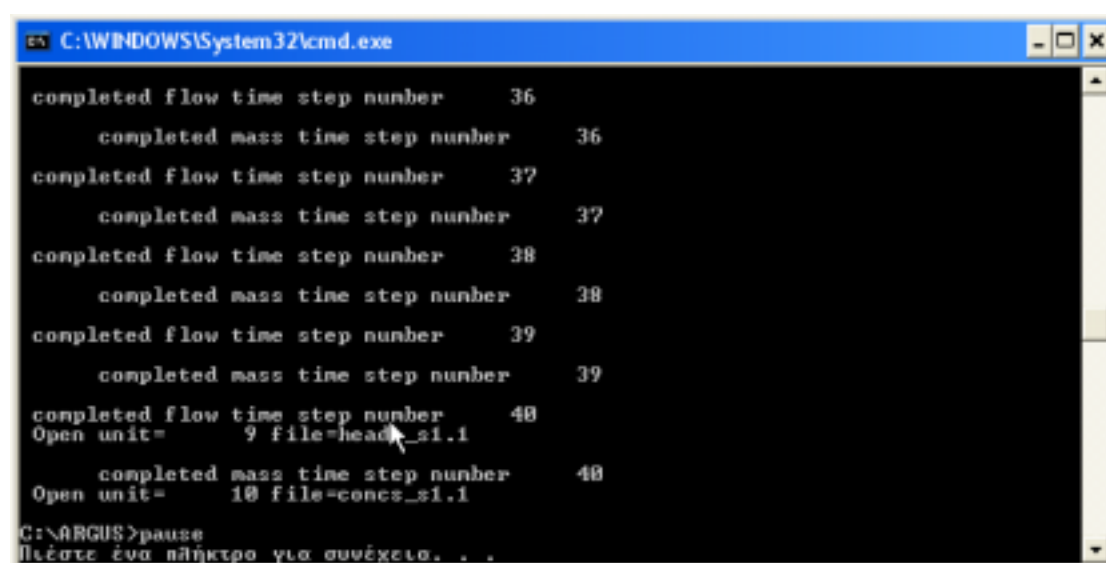
Εικόνα 11-14 Σχηματισμός δικτύου στοιχείων.

Μετά το σχηματισμό δικτύου στοιχείων, για την εξοικονόμηση μνήμης του ηλεκτρονικού υπολογιστή διαλέγεται από το μενού ‘Special’ το ‘Renumber’ και τσεκάρεται η επιλογή ‘**Optimize BandWidth**’ (Εικόνα 11-15).



Εικόνα 11-15 Βελτιστοποίηση πλάτους ζώνης πίνακα αρίθμησης κόμβων.

Τώρα είμαστε έτοιμοι να τρέξουμε το μοντέλο. Από το μενού ‘PIEs’ επιλέγεται το ‘Run PTC’ και αφού οριστεί η τοποθεσία αποθήκευσης και το όνομα των output, εμφανίζεται το ακόλουθο παράθυρο (Εικόνα 11-16).



Εικόνα 11-16 Παράθυρο ‘Run’ του προγράμματος

Αφού το πρόγραμμα έτρεξε επιτυχώς, έχουν δημιουργηθεί αρχεία Output που περιέχουν τα δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο καθώς και αρχεία που περιέχουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Όλα αυτά τα αρχεία είναι αποθηκευμένα στην τοποθεσία που ορίστηκε πριν το 'Run' του προγράμματος.

Συγκεκριμένα, τα σημαντικότερα αρχεία που δημιουργούνται είναι :

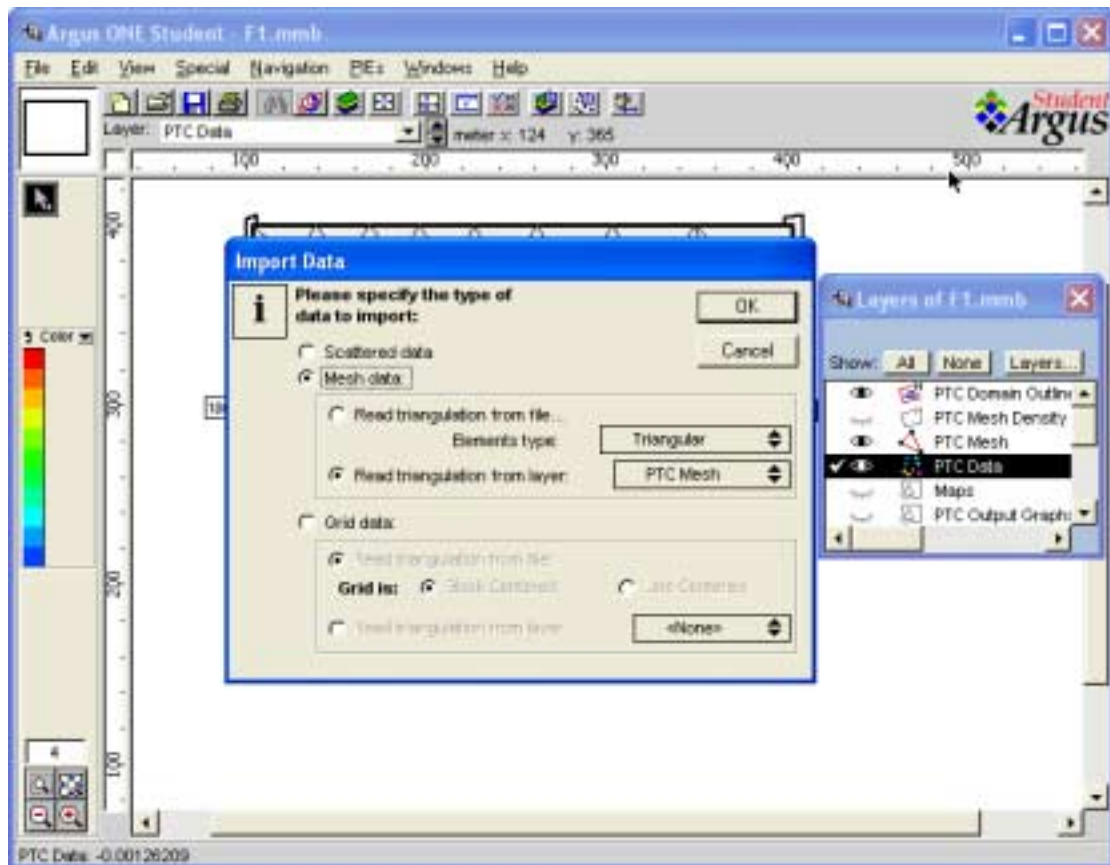
ONOMA.run	αρχείο που περιλαμβάνει τις εντολές της FORTRAN
ONOMA_mesh.inc	αρχείο των συντεταγμένων των κόμβων
ONOMA_concs_s1.fin	αρχείο με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της μεταφοράς των ρύπων
ONOMA_heads_s1.fin	αρχείο με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των υδραυλικών υψών
ONOMA_xvel_s1.fin	αρχείο με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ροής στον x άξονα
ONOMA_yvel_s1.fin	αρχείο με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ροής στον y άξονα
PTC.out	αρχείο με τα δεδομένα εισαγωγής, τις εντολές και μηνύματα σε περίπτωση λάθους

Πίνακας 11-6 Τα αρχεία του output

Το ARGUS ONE δίνει τη δυνατότητα να απεικονιστούν γραφικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (υδραυλικά ύψη, συγκεντρώσεις, ταχύτητες).

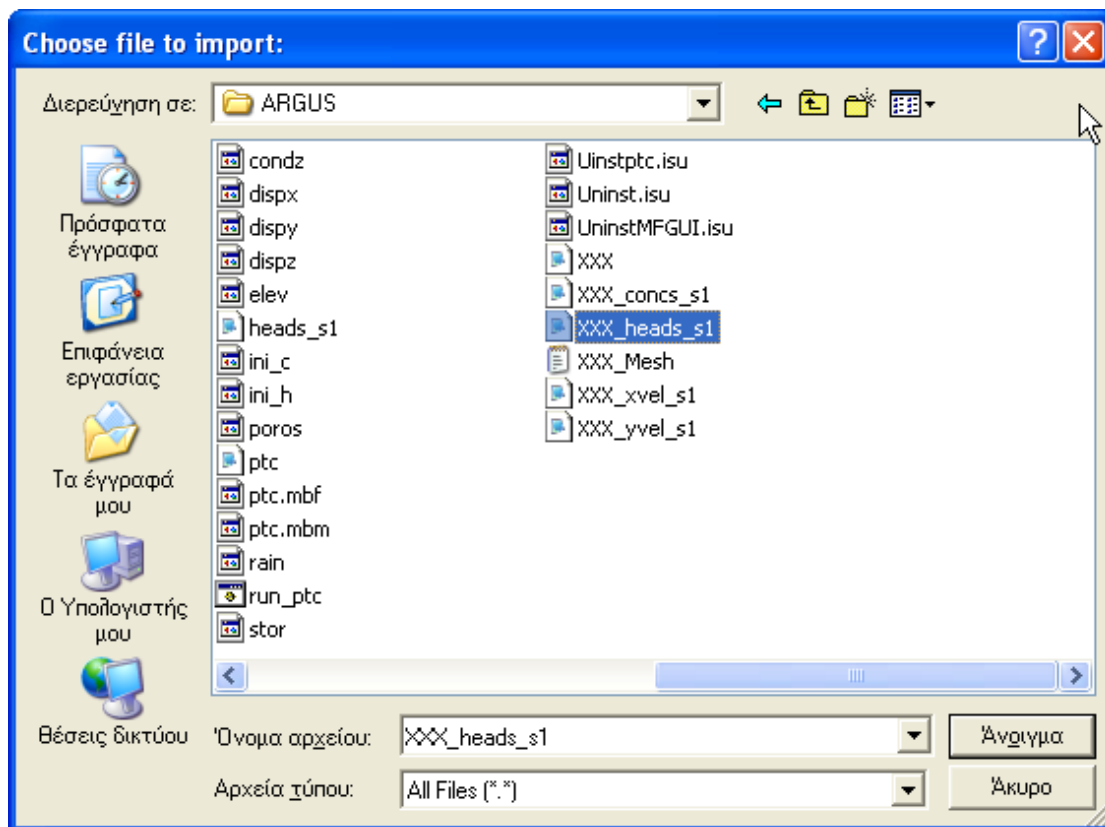
Αρχικά θα δημιουργηθεί το γράφημα των υδραυλικών υψών. Ενεργοποιείται από τη στήλη '**Layers**' το '**PTC Data**', και επιλέγοντας από το μενού '**File / Import Data / Text File**', εμφανίζεται το παράθυρο '**Import Data**'

(Εικόνα 11-17) Στο παράθυρο αυτό σημειώνονται οι επιλογές **‘Mesh data’** και **‘Read triangulation from layer’**



Εικόνα 11-17 Παράθυρο **‘Import Data’**

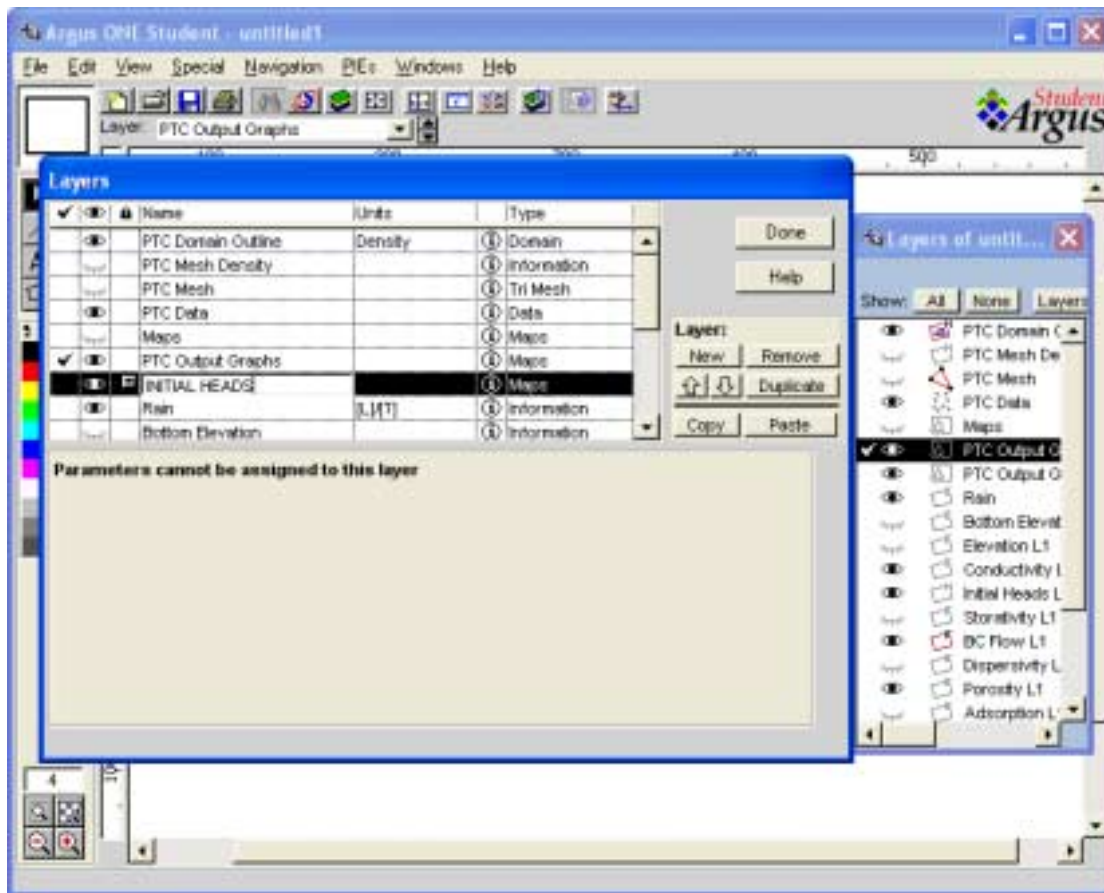
Πατώντας OK στο παράθυρο **‘Import Data’** εμφανίζεται το παράθυρο **‘Choose file to import’**. Στα **‘Αρχεία_τύπου’** επιλέγουμε **‘All file(*.*)’**, και από τη λίστα των αρχείων ανοίγουμε το αρχείο **‘ONOMA_heads_s1.fin’**(Εικόνα 11-18).



Εικόνα 11-18 Παράθυρο 'Choose file to import'

Ενεργοποιείται από τη στήλη '**Layers**' το '**PTC Output Graphs**' και από την εντολή '**Show**' ανοίγεται το παράθυρο '**Layers**'. Με την εντολή '**Duplicate**' αντιγράφεται το '**PTC Output Graphs**' και μετονομάζεται σε '**Initial Heads**'.[✎] Για να γίνει το γράφημα το είδος '**Type**', πρέπει να είναι '**Maps**'. Ο διάλογος ολοκληρώνεται πατώντας '**Done**' (Εικόνα 11-19).

[✎] Με τον όρο Initial εννοείται η κατάσταση της περιοχής πριν την εφαρμογή τεχνολογίας εξυγίανσης



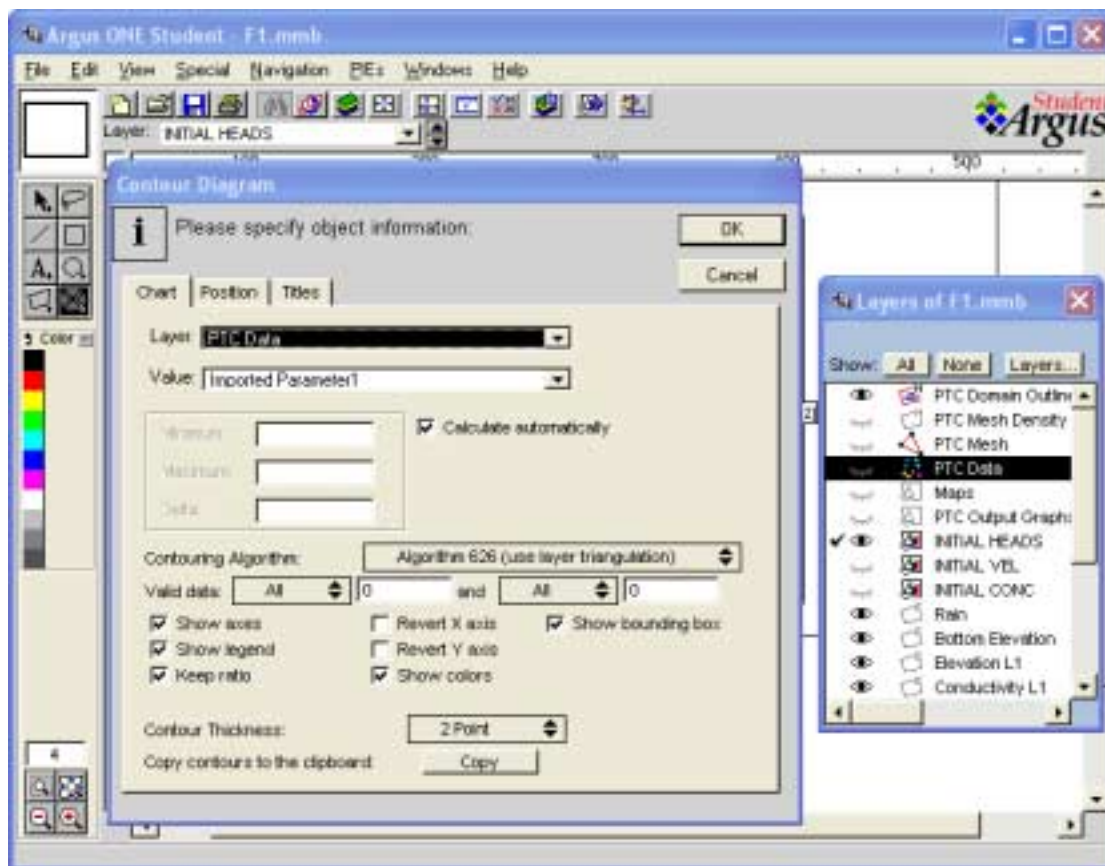
Εικόνα 11-19 Παράθυρο 'Layers'

Ενεργοποιείται από τη στήλη 'Layers' το 'Initial Heads' και από την αριστερή εργαλειοθήκη επιλέγεται το κουμπί 'Post-processing' με τη μορφή ισοϋψών. Επιλέγοντας ένα τμήμα της περιοχής της μοντελοποίησης με τον κέρσορα ,εμφανίζεται το παράθυρο 'Contour Diagram' (Εικόνα 11-20).Το παράθυρο αυτό έχει τρεις επιλογές : το 'Chart' (Εικόνα 11-20), το 'Position' (Εικόνα 11-21) και το 'Titles' (Εικόνα 11-22).

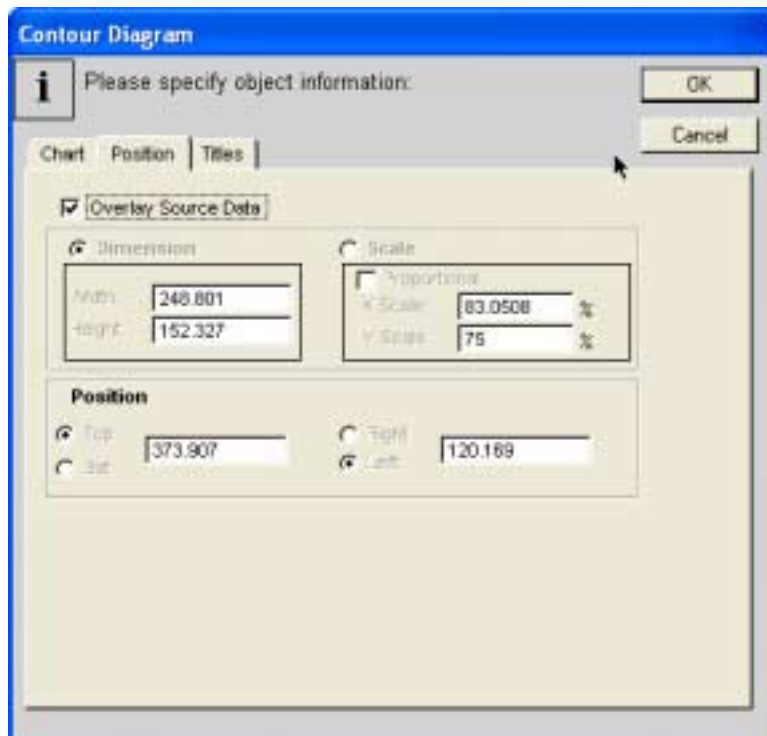
Στην επιλογή 'Chart' στο 'Layer' διαλέγουμε το 'PTC data' και στο 'Value' το 'Imported Parameter1' (Εικόνα 11-20).

Στην επιλογή 'Position' τσεκάρεται το κουτί 'Overlay Source Data'

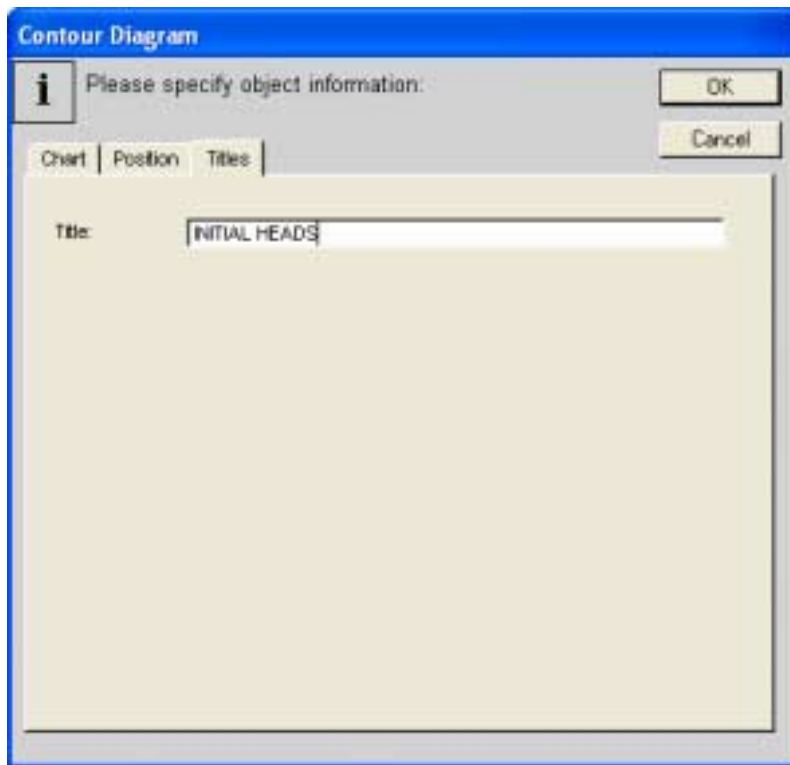
Στην επιλογή 'Titles' εισάγεται το όνομα του τίτλου του γραφήματος.



Εικόνα 11-20 Παράθυρο 'Contour Diagram', επιλογή 'Chart'

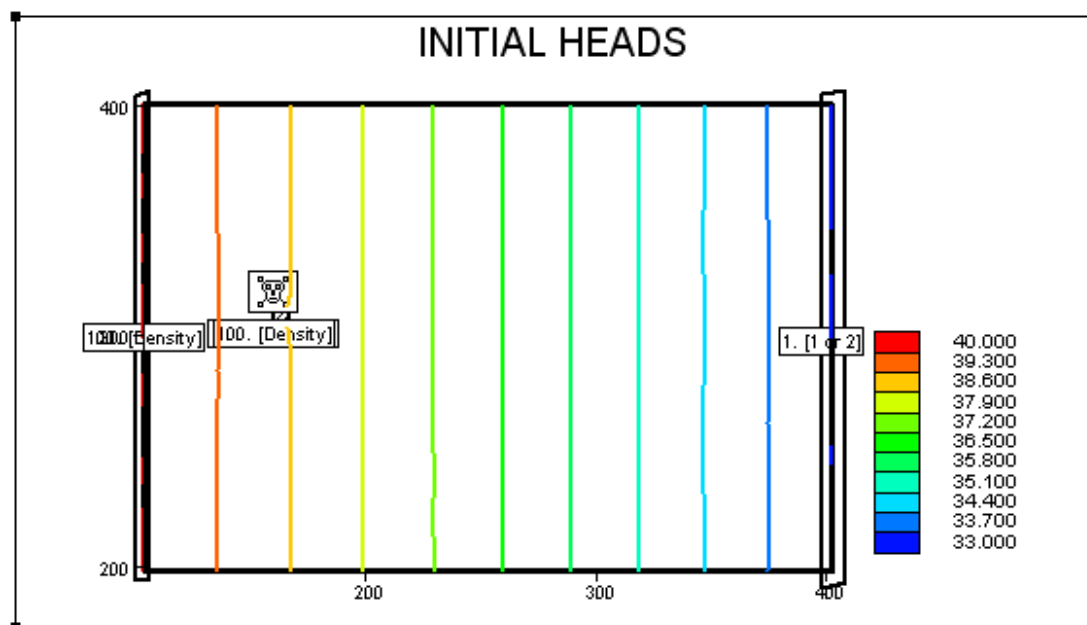


Εικόνα 11-21 Παράθυρο 'Contour Diagram', επιλογή 'Position'



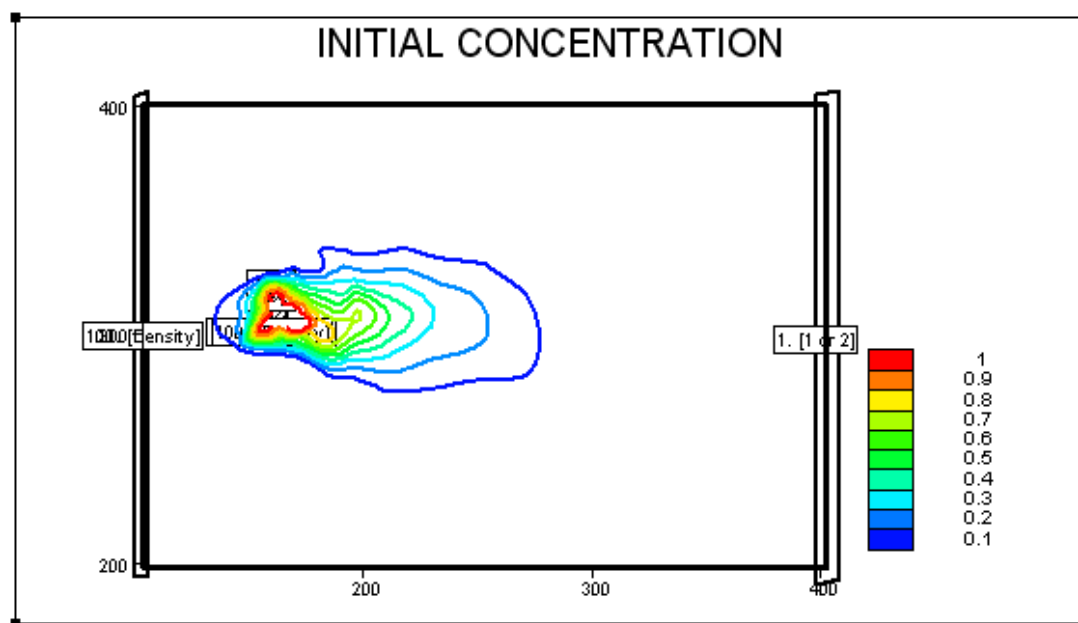
Εικόνα 11-22 Παράθυρο ‘Contour Diagram’, επιλογή ‘Titles’

Πατώντας το **OK** εμφανίζεται το Γράφημα των υδραυλικών υψών.
(Γράφημα 11-1)



Γράφημα 11-1 ‘Initial Heads’

Ακριβώς με την ίδια διαδικασία δημιουργείται το Διάγραμμα της κατανομής των συγκεντρώσεων των ρύπων **‘Initial Concentrations’**, (Γράφημα 11-2).



Γράφημα 11-2 ‘Initial Concentrations’

Για τη δημιουργία του διαγράμματος της συνισταμένης ταχύτητας στο $x - y$ επίπεδο ακολουθείται διαφορετική διαδικασία. Αρχικά ενεργοποιείται από τη στήλη **‘Layers’** το **‘PTC xvelocities’** και επιλέγοντας από το μενού **‘File / Import PTC xvelocities / Text File’**, εμφανίζεται το παράθυρο **‘Import Data’**. Στο παράθυρο αυτό σημειώνονται οι επιλογές **‘Mesh data’** και **‘Read triangulation from layer’**. Πατώντας **OK** στο παράθυρο **‘Import Data’** εμφανίζεται το παράθυρο **‘Choose file to import’**. Στα **‘Αρχεία_τύπου’** επιλέγουμε **‘All file(*.*)’**, και από τη λίστα των αρχείων ανοίγουμε το αρχείο **‘ONOMA_xvel_s1.fin’**.

Στην συνέχεια ενεργοποιείται από τη στήλη **‘Layers’** το **‘PTC yvelocities’** και επιλέγοντας από το μενού **‘File / Import PTC yvelocities / Text File’**, εμφανίζεται το παράθυρο **‘Import Data’**. Στο παράθυρο αυτό σημειώνονται οι επιλογές **‘Mesh data’** και **‘Read triangulation from layer’**. Πατώντας **OK** στο παράθυρο **‘Import Data’** εμφανίζεται το παράθυρο **‘Choose file to im-**

port .Στα **‘Αρχεία_τύπου’** επιλέγουμε **‘All file(*.*)’** ,και από τη λίστα των αρχείων ανοίγουμε το αρχείο **‘ONOMA_yvel_s1.fin’** .

Ενεργοποιείται από τη στήλη **‘Layers’** το **‘PTC Output Graphs’** και από την εντολή **‘Show’** ανοίγεται το παράθυρο **‘Layers’**. Με την εντολή **‘Duplicate ’** αντιγράφεται το **‘PTC Output Graphs’** και μετονομάζεται σε **‘Initial Velocities’**.Για να γίνει το γράφημα το είδος **‘Type’** , πρέπει να είναι **‘Maps’**.Ο διάλογος ολοκληρώνεται πατώντας **‘Done’**.

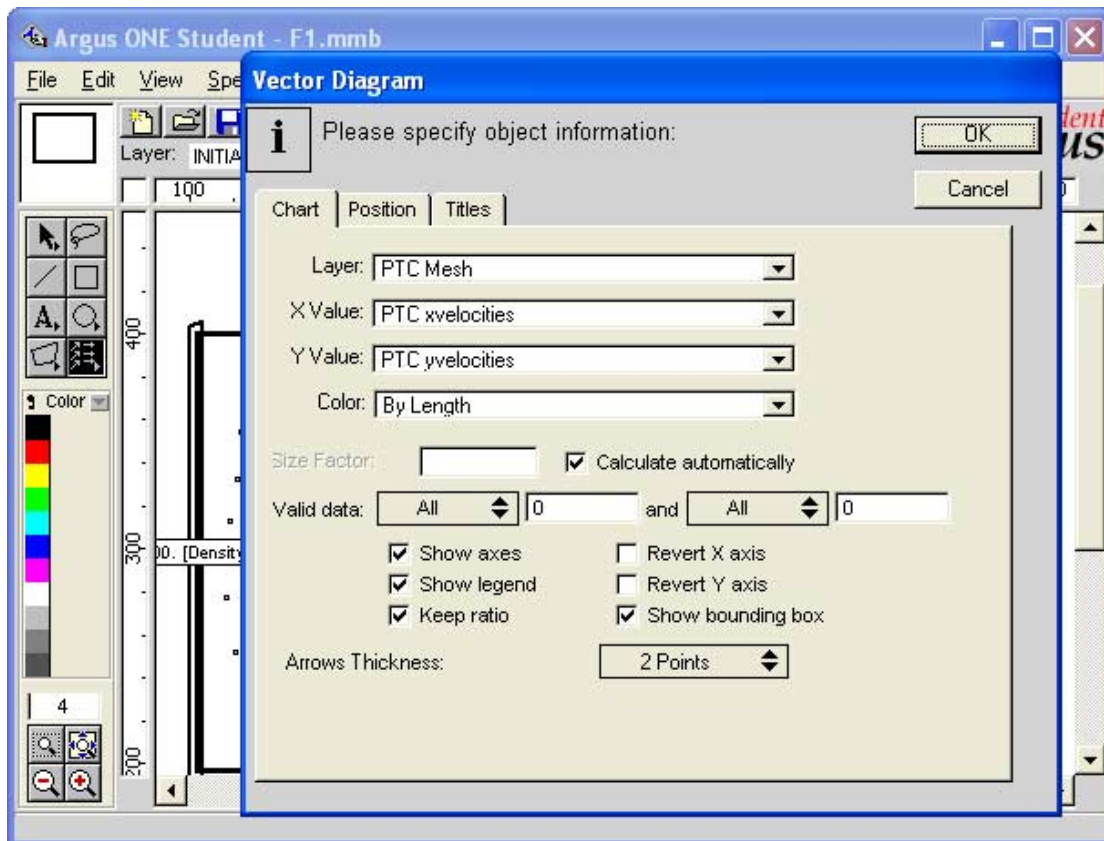
Ενεργοποιείται από τη στήλη **‘Layers’** το **‘Initial Velocities’** και από την αριστερή εργαλειοθήκη επιλέγεται το κουμπί **‘Post-processing’** με τη μορφή μικρών βελών. Επιλέγοντας ένα τμήμα της περιοχής της μοντελοποίησης με τον κέρσορα ,εμφανίζεται το παράθυρο **‘Vector Diagram’** (Εικόνα 11-23).

Το παράθυρο αυτό έχει τρεις επιλογές : το **‘Chart’** (Εικόνα 11-23), το **‘Position’** και το **‘Titles’**

Στην επιλογή **‘Chart’** στο **‘Layer’** διαλέγουμε το **‘PTC Mesh’** (Εικόνα 11-23).

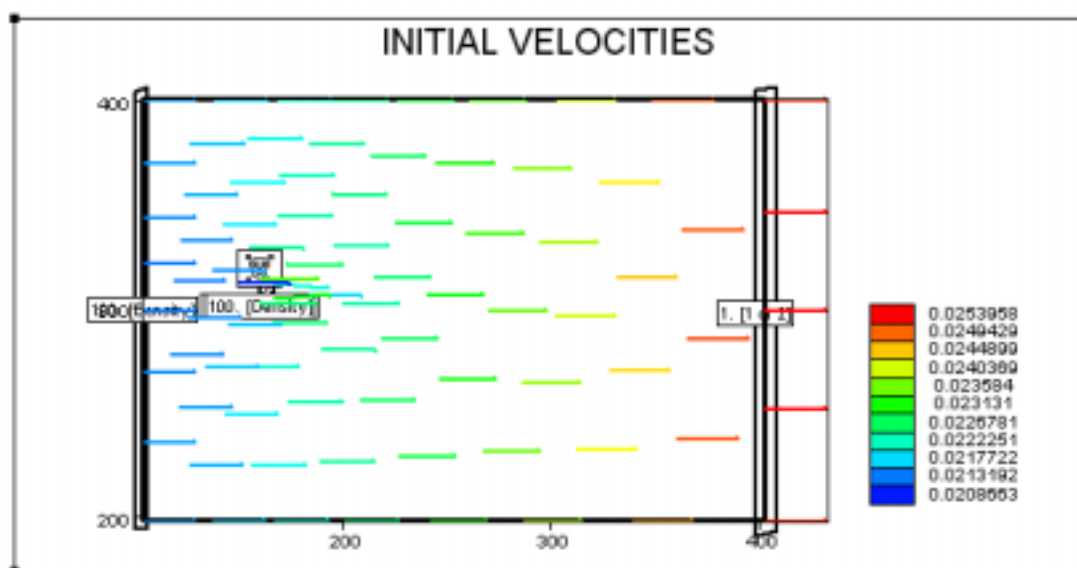
Στην επιλογή **‘Position’** τσεκάρεται το κουτί **‘Overlay Source Data’**

Στην επιλογή **‘Titles’** εισάγεται το όνομα του τίτλου του γραφήματος.



Εικόνα 11-23 Παράθυρο ‘Vector Diagram’

Πατώντας το OK εμφανίζεται το γράφημα των ταχυτήτων (Γράφημα 11-3).

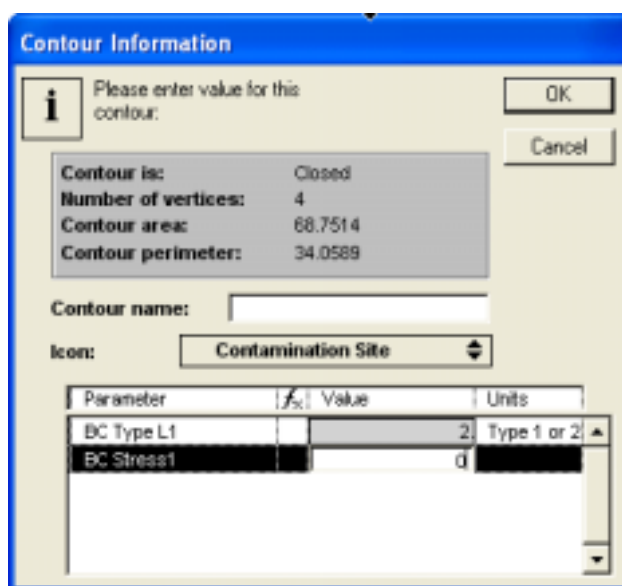


Γράφημα 11-3 ‘Initial Velocities’

11.1.2 Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετα Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή

Στο στάδιο αυτό, θα παρατηρηθεί η κατάσταση ρύπανσης της περιοχής δυο χρόνια μετά από την στιγμή που η πηγή σταμάτησε να ρυπαίνει την περιοχή χωρίς την εφαρμογή τεχνολογιών εξυγίανσης.

Ενεργοποιείται από τη στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας **‘Layers’** το **“BC Transport L1 layer”**. Από την αριστερή εργαλειοθήκη επιλέγεται το **‘Navigate Tool’** και τσεκάρεται η πηγή. Τότε, εμφανίζεται το παράθυρο **‘Contour Information’**. Στην παράμετρο **‘BC Type L1’** εισάγεται η τιμή 2 που αντιστοιχεί στο δεύτερο είδος οριακών συνθηκών (σταθερός ρυθμός έκχυσης). Στην παράμετρο **‘BC Stress1’** εισάγεται η τιμή 0 που αντιστοιχεί σε ρυθμό έκχυσης ρυπαντή ίση με 0 gr / m³ ανά d (Εικόνα 11- 24).



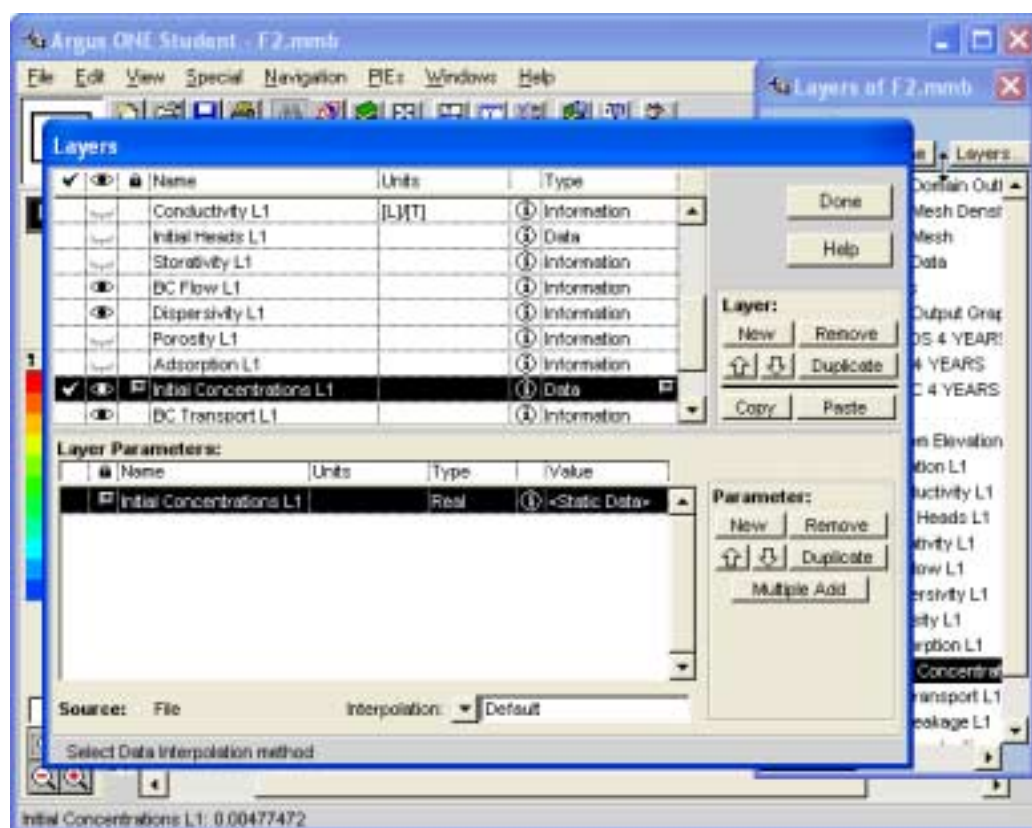
Εικόνα 11-24 Παράθυρο **‘Contour Information’**

Ως αρχικές συνθήκες υδραυλικών υψών **‘Layers / Initial heads L1’** και συγκεντρώσεων **‘Layers / Initial concentrations L1’** θα εισαχθούν τα αρχεία Output της πρώτης προσομοίωσης. Δηλαδή, τα αρχεία **‘ONOMA_heads_s1.fin’** και **‘ONOMA_concs_s1.fin’**.

Ενεργοποιείται από τη στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας ‘Layers’ το “ **Initial concentrations L1**”. Από την εντολή ‘Show’ ανοίγεται το παράθυρο ‘Layers’. Για να γίνει το γράφημα το είδος ‘Type’ , πρέπει να είναι ‘Data’.Ο διάλογος ολοκληρώνεται πατώντας ‘Done’ (Εικόνα 11-25).

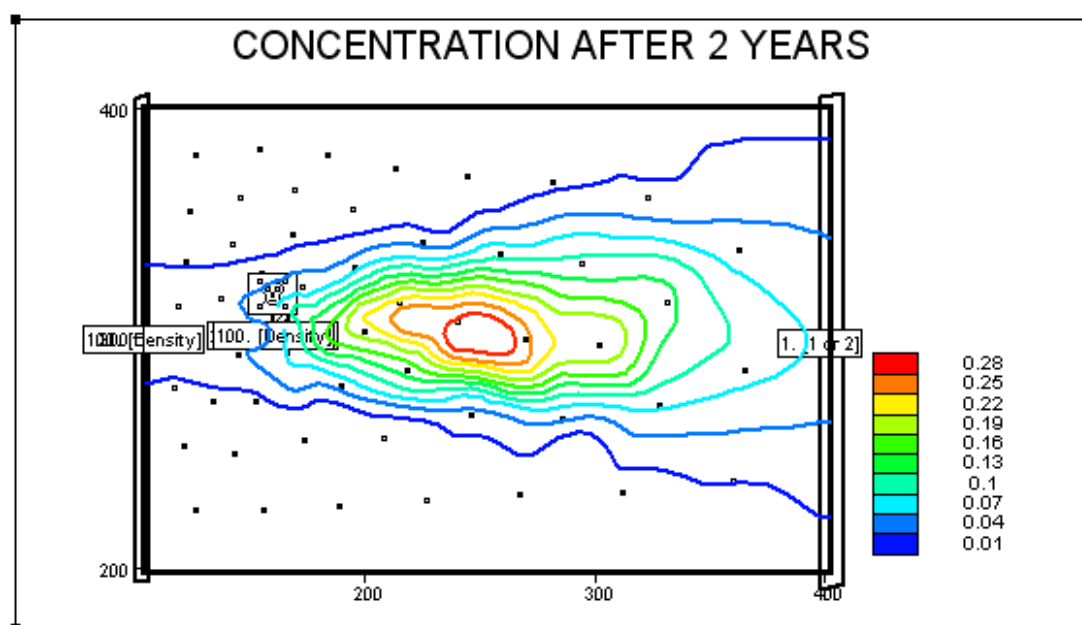
Από το μενού ‘File / Import Initial concentrations L1/ Text File’ , εμφανίζεται το παράθυρο ‘Import Data’. Στο παράθυρο αυτό σημειώνονται οι επιλογές ‘Mesh data’ και ‘Read triangulation from layer’. Πατώντας OK στο παράθυρο ‘Import Data’ εμφανίζεται το παράθυρο ‘Choose file to import’ .Στα ‘Αρχεία_τύπου’ επιλέγουμε ‘All file(*.*)’ ,και από τη λίστα των αρχείων ανοίγουμε το αρχείο ‘ONOMA_concs_s1.fin’ .

Ομοίως εισάγουμε τις αρχικές συνθήκες υδραυλικών υψών από το αρχείο ‘ONOMA_heads_s1.fin’.



Εικόνα 11-25 Παράθυρο ‘Layers’- ‘Initial concentrations L1’

Σώζουμε το νέο σενάριο με διαφορετικό όνομα και αφού τρέξει, δημιουργούνται τα νέα αρχεία Output. Έπειτα δημιουργείται το Γράφημα των συγκεντρώσεων με την μεθοδολογία που αναφέρθηκε παραπάνω (Γράφημα 11-4).



Γράφημα 11-4 Συγκεντρώσεις 2 χρόνια μετά την παύση λειτουργίας της πηγής.

11.1.3 Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετα Τη Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή Με Την Εφαρμογή Της Τεχνολογίας Εξυγίανσης «Συγκλίνοντα Φράγματα Και Δίοδος»

1. ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΣΕ ΕΥΘΕΙΑ ΚΑΙ ΔΙΟΔΟΣ 14 ΜΕΤΡΩΝ

Στο στάδιο αυτό, θα παρατηρηθεί η κατάσταση ρύπανσης της περιοχής δυο χρόνια (700 ημέρες) μετά από την στιγμή που η πηγή σταμάτησε να ρυπαίνει την περιοχή με την εφαρμογή της τεχνολογίας εξυγίανσης «Συγκλίνοντα φράγματα και δίοδος», (Funnel and Gate).

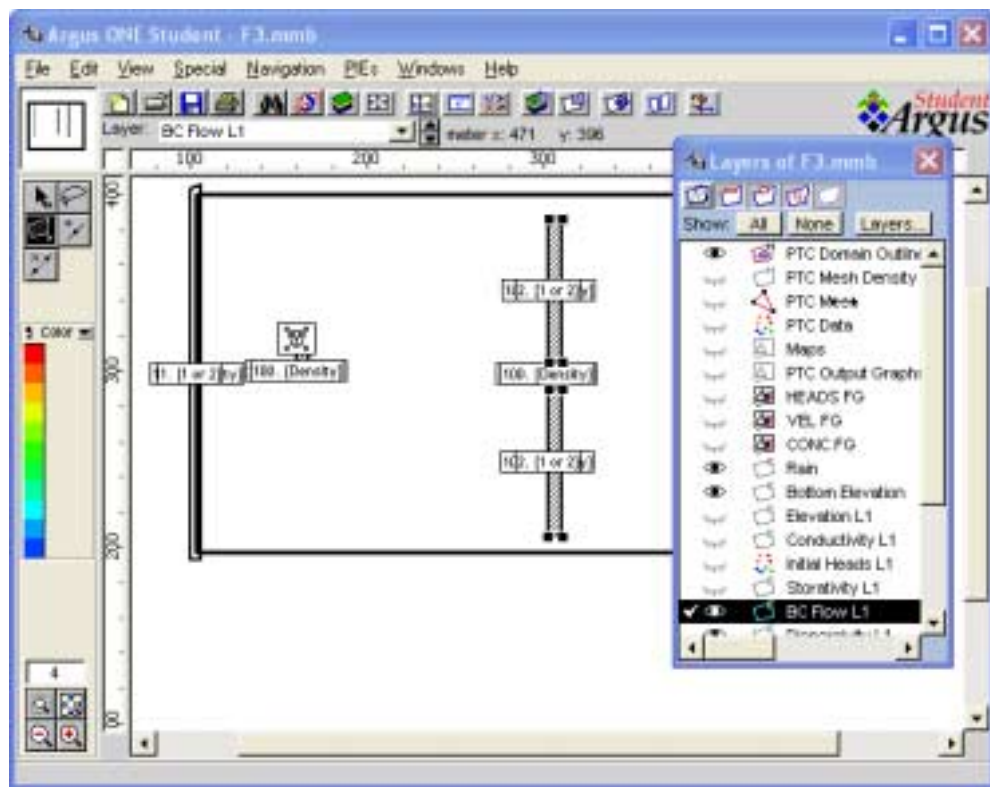
Από το προηγούμενο στάδιο, ως αρχικές συνθήκες υδραυλικών υψών ‘Layers / Initial heads L1’ και συγκεντρώσεων ‘Layers / Initial concentrations L1’ έχουν εισαχθεί τα αρχεία Output της πρώτης προσομοίωσης. Δηλαδή, τα αρχεία ‘ONOMA_heads_s1.fin’ και ‘ONOMA_concs_s1.fin’.

Επίσης, η πηγή έχει ήδη σταματήσει να ρυπαίνει αφού από πριν έχει οριστεί **‘BC Type L1’** ίσο με δύο, και **‘BC Stress1’** ίσο με 0.

Επόμενο βήμα είναι η προσομοίωση των υπόγειων φραγμάτων. Ενεργοποιείται από τη στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας **‘Layers’** το **“ BC Flow L1”**. Από την αριστερή εργαλειοθήκη επιλέγεται το **‘Closed Polygon Tool’** και σχεδιάζονται δύο ορθογώνια, μήκους 90 m περίπου το καθένα, που θα αποτελέσουν τα αδιαπέρατα τμήματα της τεχνολογίας «Συγκλίνοντα φράγματα και δίοδος». Τα φράγματα σχεδιάζονται στο σημείο που είχε φτάσει η ρύπανση μετά τα δύο χρόνια της συνεχούς έκχυσης. Στο κενό ανάμεσα τους θα προστεθεί αργότερα η δίοδος (Εικόνα 11-26).

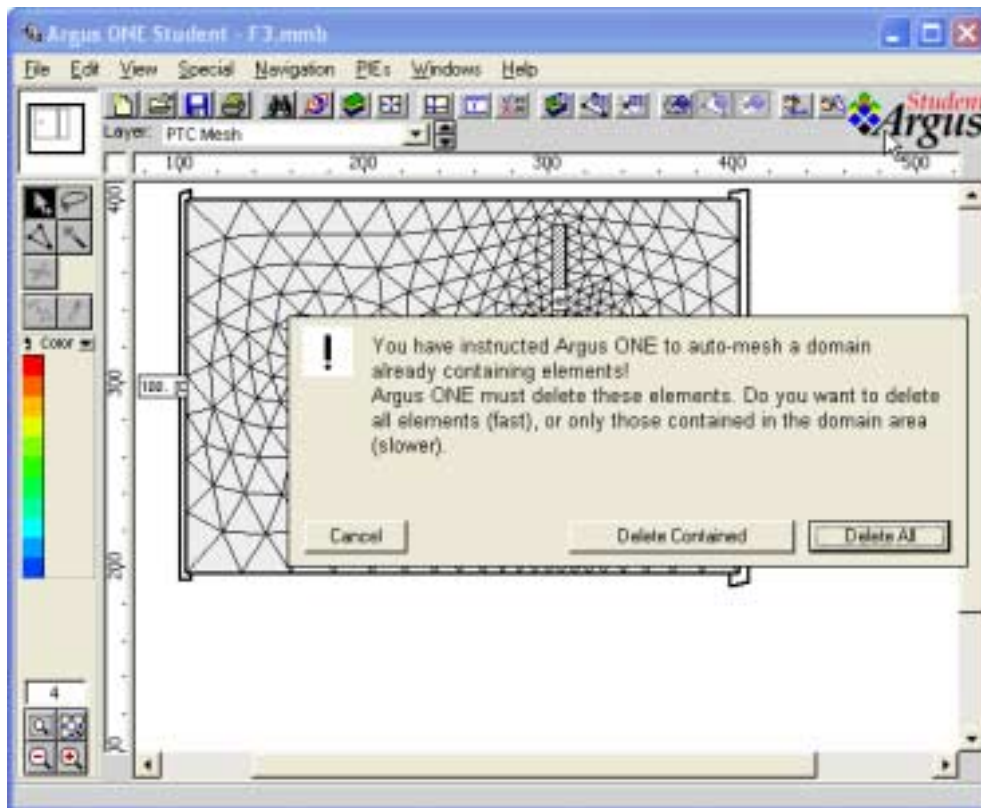
Μόλις κλείσει το κάθε ορθογώνιο εμφανίζεται το παράθυρο **‘Contour Information’**. Στην παράμετρο **‘BC Type L1’** εισάγεται η τιμή 2 που αντιστοιχεί στο δεύτερο είδος οριακών συνθηκών (σταθερός ρυθμός ροής). Στην παράμετρο **‘BC Stress1’** εισάγεται η τιμή 0, δηλαδή δεν έχουμε ροή στην περιοχή που περικλείεται από τα ορθογώνια.

Είναι σημαντικό τα φράγματα να τοποθετηθούν και στο **‘Domain Outline layer’**. Βρισκόμενοι στο **“BC Flow L1 layer”** επιλέγουμε τα φράγματα με το **‘Navigate Tool’** της αριστερής εργαλειοθήκης, τα αντιγράφουμε (**Copy**) και αφού το **‘Domain Outline layer’** έχει ενεργοποιηθεί, τα επικολλούμε (**Paste**). Στη συνέχεια τα επιλέγουμε από το **‘Domain Outline layer’** και εμφανίζεται το παράθυρο **‘Contour Information’** όπου αλλάζουμε το **‘Density value’** σε 100.



Εικόνα 11-26 Σχεδιασμός φραγμάτων

Ενεργοποιείται από τη στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας ‘Layers’ το “PTC Mesh”, και αφού επιλέξουμε πάλι το ‘Magic Wand Tool’ δημιουργείται νέο δίκτυο στοιχείων. Επειδή υπήρχε από πριν ένα δίκτυο στοιχείων, στο μήνυμα που βγάζει το πρόγραμμα επιλέγουμε ‘Delete All’ (Εικόνα 11-27).



Εικόνα 11-27 Δημιουργία νέου δικτύου στοιχείων

Επόμενο βήμα είναι η προσομοίωση της διόδου, δηλαδή του διαπερατού τμήματος της τεχνολογίας αυτής, στο οποίο γίνεται η επεξεργασία των ρυπαντών. Η διάδος (Gate) θα τοποθετηθεί στο κενό ανάμεσα στα δύο φράγματα.

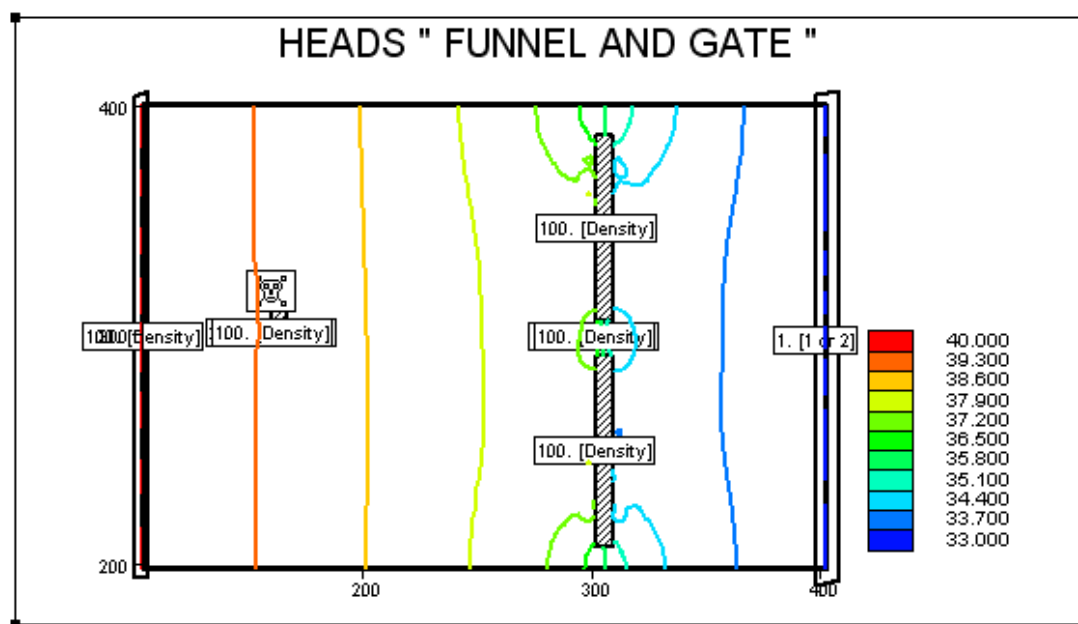
Ενεργοποιείται από τη στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας **'Layers'** το **"BC Transport L1 layer"**. Από την αριστερή εργαλειοθήκη επιλέγεται το **'Closed Polygon Tool'** και περικλείονται τα στοιχεία της περιοχής ανάμεσα στα δύο φράγματα. Μόλις σχηματιστεί η διάδος, εύρους 14 m, εμφανίζεται το παράθυρο **'Contour Information'**. Στην παράμετρο **'BC Type L1'** εισάγεται η τιμή 1 που αντιστοιχεί στο πρώτο είδος οριακών συνθηκών (σταθερή συγκέντρωση). Στην παράμετρο **'BC Stress1'** εισάγεται η τιμή 0,1 που αντιπροσωπεύει μείωση της συγκέντρωσης του ρυπαντή κατά 90 %.

Έπειτα η διάδος τοποθετείται και στο **'Domain Outline layer'**. Βρισκόμενοι στο **"BC Transport L1 layer"** επιλέγουμε τη διάδο με το **'Navigate Tool'** της αριστερής εργαλειοθήκης, την αντιγράφουμε (**Copy**) και αφού το **'Domain Outline layer'** έχει ενεργοποιηθεί, την επικολλούμε (**Paste**). Στη συ-

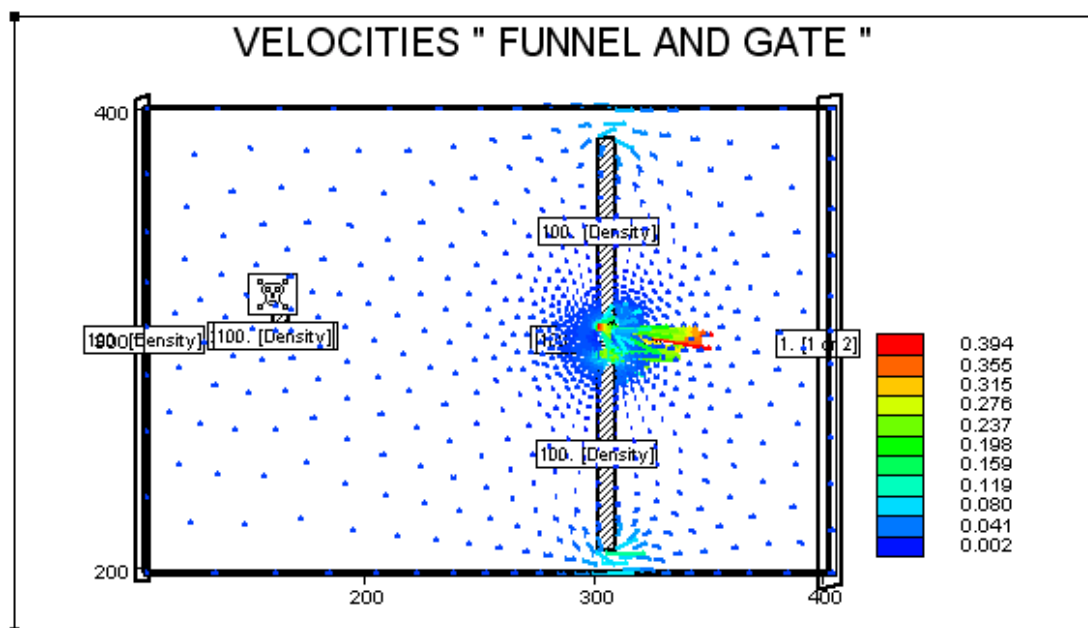
νέχεια την επιλέγουμε από το **‘Domain Outline layer’** και εμφανίζεται το παράθυρο **‘Contour Information’** όπου αλλάζουμε το **‘Density value’** σε 100.

Ενεργοποιείται από τη στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας **‘Layers’** το **“ PTC Mesh”**, και αφού επιλέξουμε πάλι το **‘Magic Wand Tool’** δημιουργείται νέο δίκτυο στοιχείων. Επειδή υπήρχε από πριν ένα δίκτυο στοιχείων, στο μήνυμα που βγάζει το πρόγραμμα επιλέγουμε **‘Delete All’**.

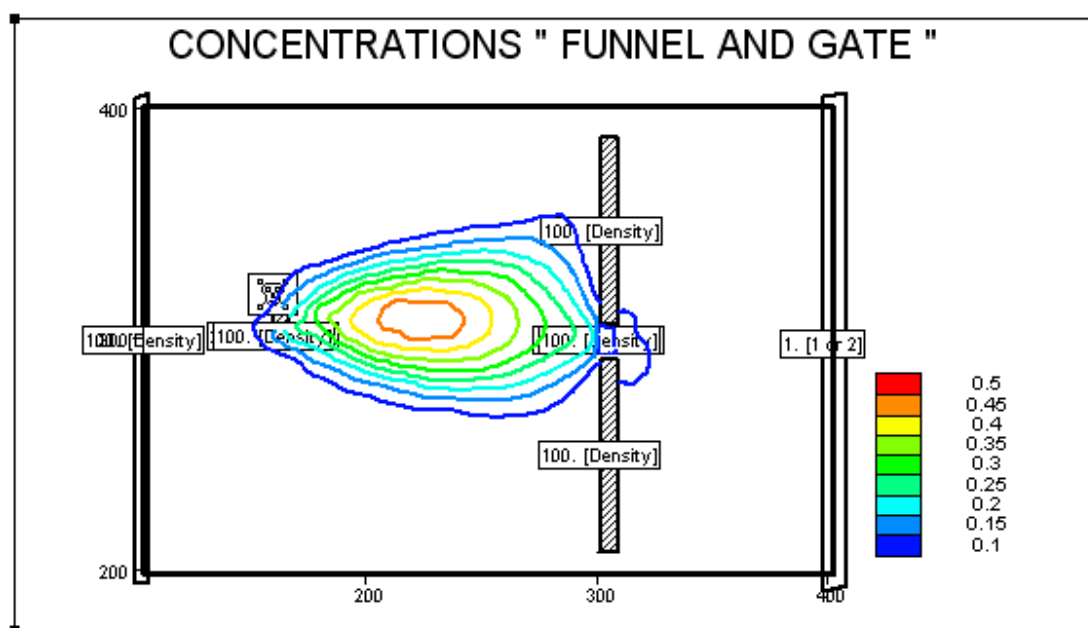
Το επόμενο βήμα είναι να τρέξουμε το πρόγραμμα. Από τα νέα Output δημιουργούμε τα νέα γραφήματα των υδραυλικών υψών (Γράφημα 11-5), των ταχυτήτων (Γράφημα 11-6), και της κατανομής των συγκεντρώσεων (Γράφημα 11-7).



Γράφημα 11-5 Υδραυλικά ύψη με την ύπαρξη **‘Funnel and Gate’**



Γράφημα 11-6 Ταχύτητες υπογείου νερού με την ύπαρξη 'Funnel and Gate'

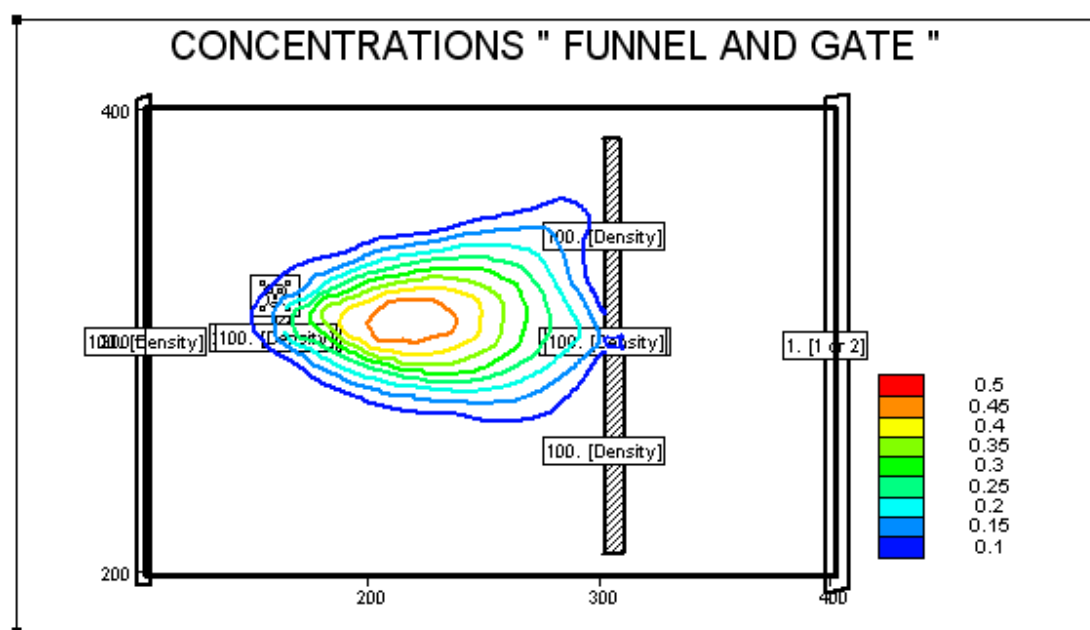


Γράφημα 11-7 Συγκεντρώσεις ρύπου με την ύπαρξη 'Funnel and Gate'

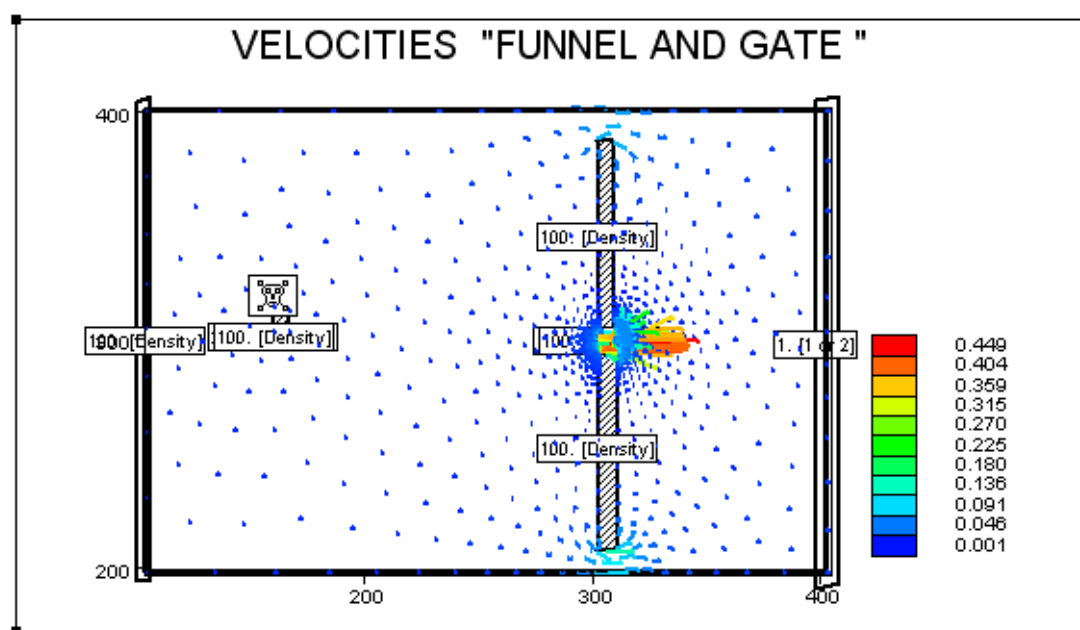
2. ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΣΕ ΕΥΘΕΙΑ ΚΑΙ ΔΙΟΔΟΣ 5 ΜΕΤΡΩΝ

Η διαδικασία του σχεδιασμού των Συγκλινόντων Φραγμάτων και της διόδου είναι η ίδια με το προηγούμενο σενάριο. Σε αυτή την περίπτωση όμως η διόδος έχει εύρος 5 m.

Στα παρακάτω γραφήματα φαίνονται οι συγκεντρώσεις και οι ταχύτητες που εξάγονται από αυτό το σενάριο.



Γράφημα 11-8 Συγκεντρώσεις με την ύπαρξη 'Funnel and Gate' με διόδο 5 m

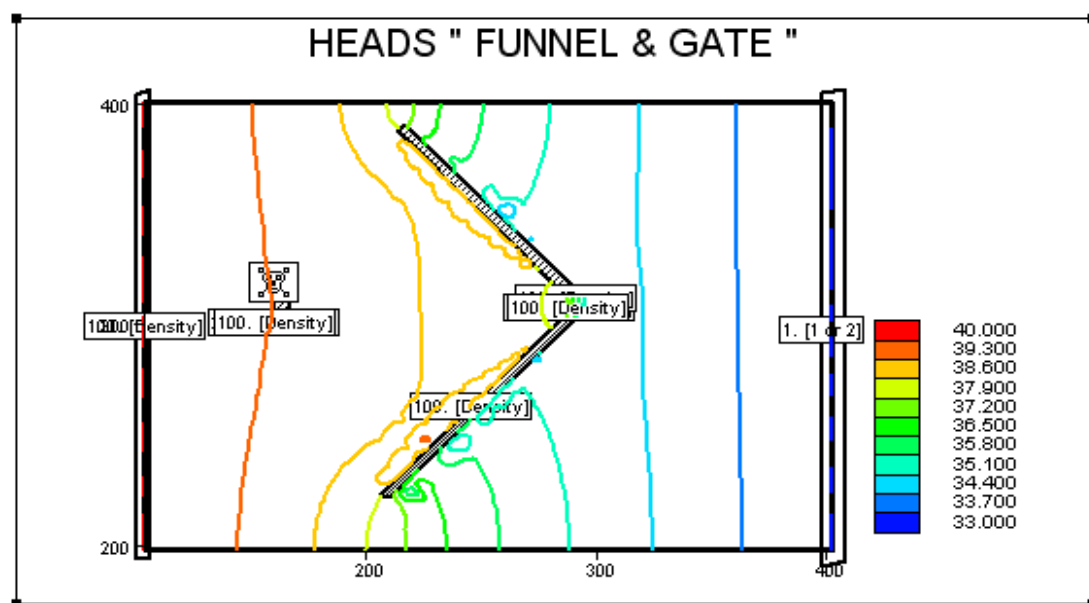


Γράφημα 11-9 Ταχύτητες με την ύπαρξη 'Funnel and Gate' με διόδο 5 m

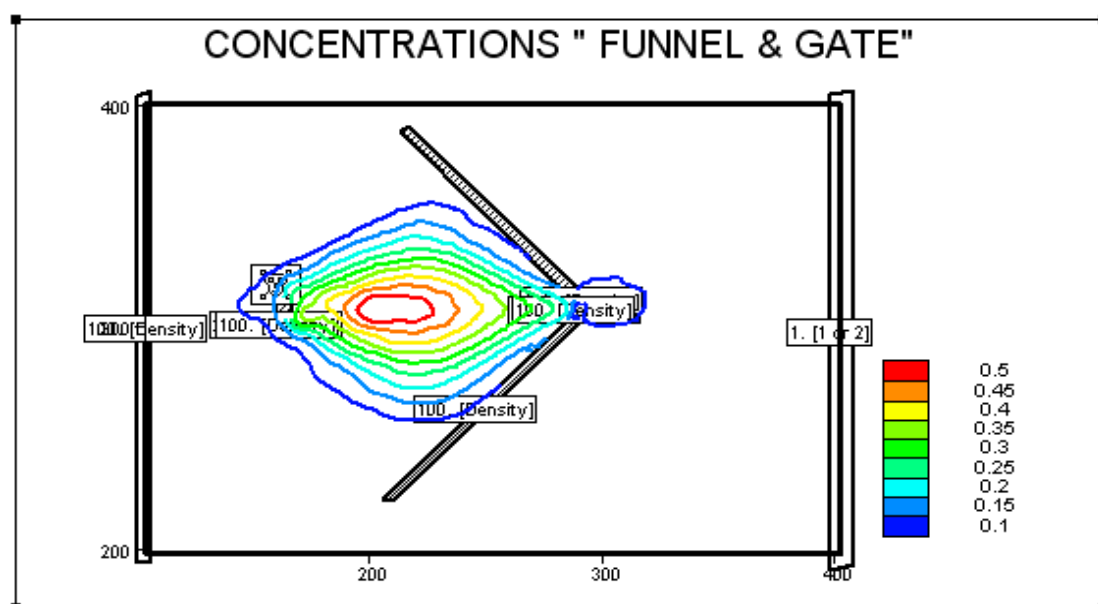
3. ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΜΕ ΓΩΝΙΑ ΚΑΙ ΔΙΟΔΟ 10 ΜΕΤΡΩΝ

Η διαδικασία του σχεδιασμού των Συγκλινόντων Φραγμάτων και της διόδου είναι η ίδια με το προηγούμενο σενάριο. Σε αυτή την περίπτωση όμως η διόδος έχει εύρος 10m και τα φράγματα έχουν μήκος περίπου 120 m το καθένα. Είναι μεγαλύτερα από τα φράγματα σε ευθεία, έτσι ώστε το πλάτος της κατασκευής να εγκλωβίζει όλο το πλούμιο.

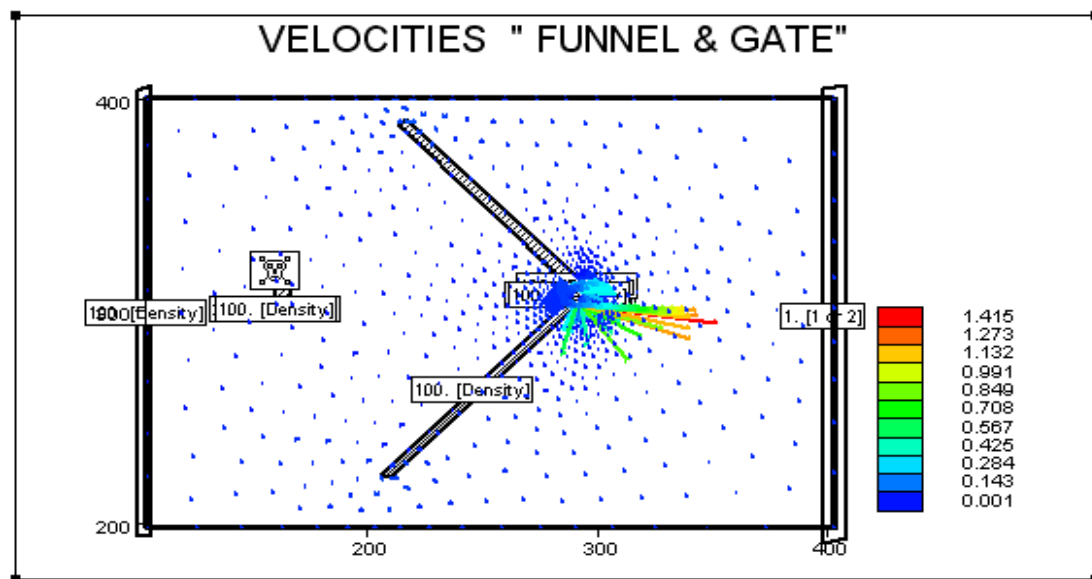
Στα παρακάτω γραφήματα φαίνονται τα υδραυλικά ύψη, οι συγκεντρώσεις και οι ταχύτητες που εξάγονται από αυτό το σενάριο.



Γράφημα 11-10 Υδραυλικά ύψη με την ύπαρξη 'Funnel and Gate' με διόδο 10m



Γράφημα 11-11 Συγκεντρώσεις με την ύπαρξη 'Funnel and Gate' με διόδο 10m

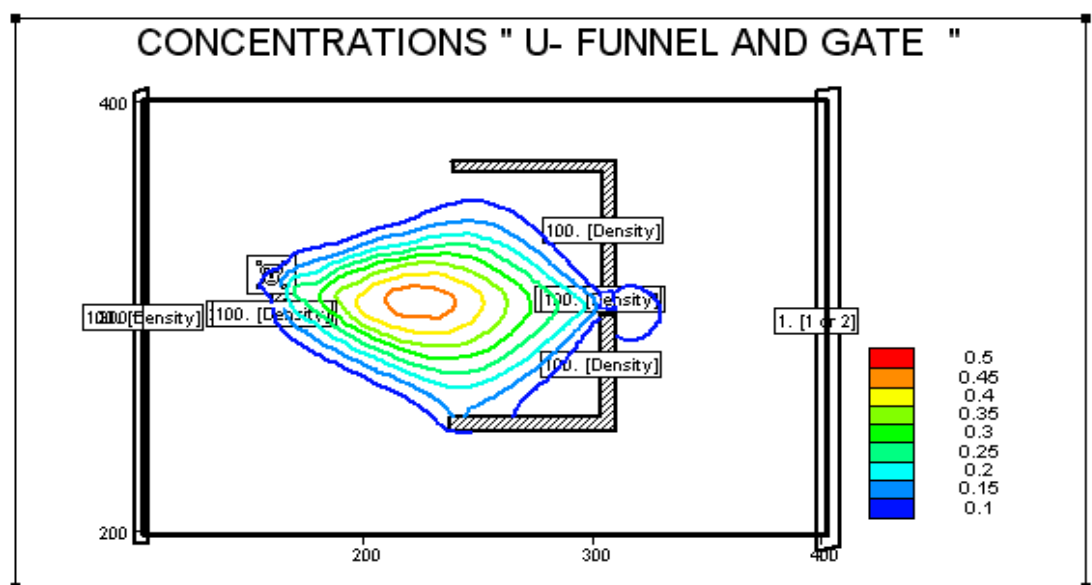


Γράφημα 11-12 Ταχύτητες με την ύπαρξη 'Funnel and Gate' με διάδο 10m

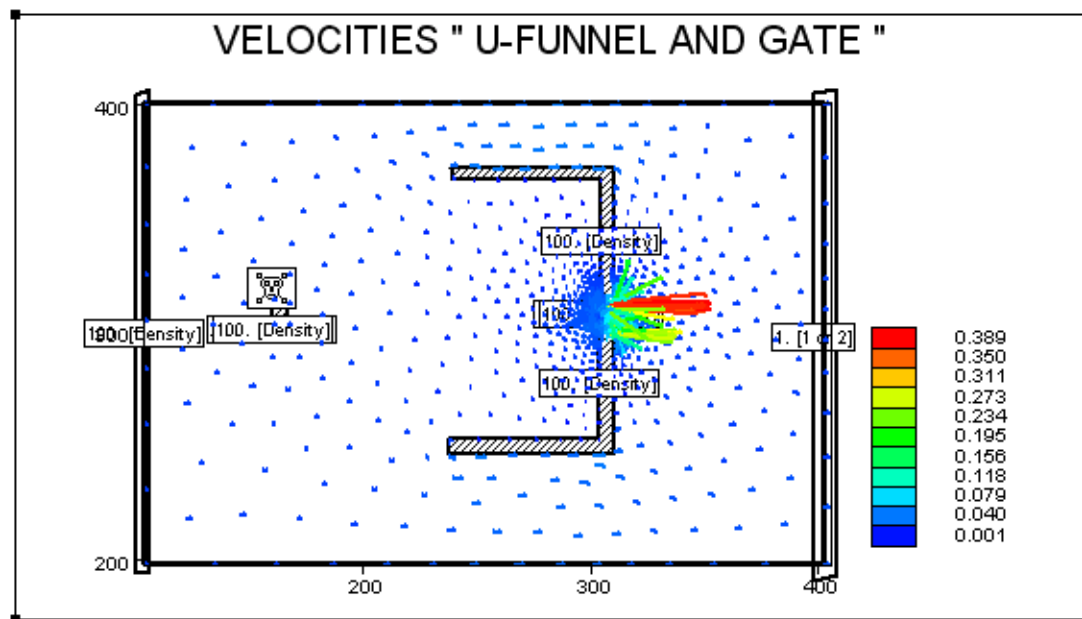
4. ΦΡΑΓΜΑ ΣΧΗΜΑΤΟΣ -U- ΚΑΙ ΔΙΟΔΟ 10 ΜΕΤΡΩΝ

Η διαδικασία του σχεδιασμού των Συγκλινόντων Φραγμάτων και της διόδου είναι η ίδια με το προηγούμενο σενάριο. Σε αυτή την περίπτωση τα φράγματα έχουν τέτοιο μήκος ώστε το πλάτος της κατασκευής να εγκλωβίζει όλο το πλούμιο.

Στα παρακάτω γραφήματα φαίνονται οι συγκεντρώσεις και οι ταχύτητες που εξάγονται από αυτό το σενάριο.



Γράφημα 11-13 Συγκεντρώσεις με την ύπαρξη ' U- Funnel and Gate'

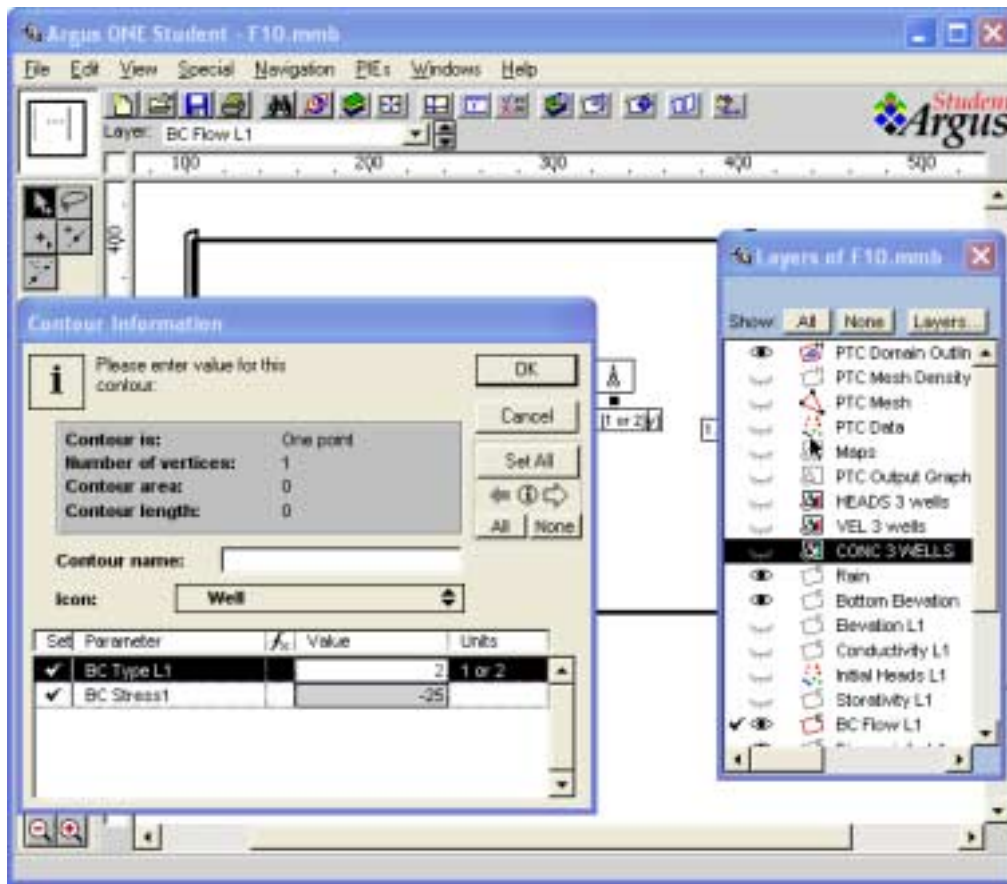


Γράφημα 11-14 Ταχύτητες με την ύπαρξη ‘ U- Funnel and Gate’

11.1.4 Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετα Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή Με Την Εφαρμογή Της Τεχνολογίας Εξυγίανσης «Άντληση Και Επεξεργασία (Pump and Treat)»

Στο σενάριο αυτό, τοποθετούνται στην περιοχή του πλουμίου τρία πηγάδια άντλησης. Η ρυπασμένη μάζα που αφαιρείται από τον υπόγειο υδροφόρα θα επεξεργαστεί με εφαρμογή τεχνικών απορρύπανσης. Το σενάριο αυτό πραγματοποιείται για να συγκριθούν τα αποτελέσματα εξυγίανσης του υδροφόρα της τεχνολογίας ‘*Pump and treat*’ με αυτά της τεχνολογίας ‘*Συγκλινόντων Φραγμάτων και διόδου*’.

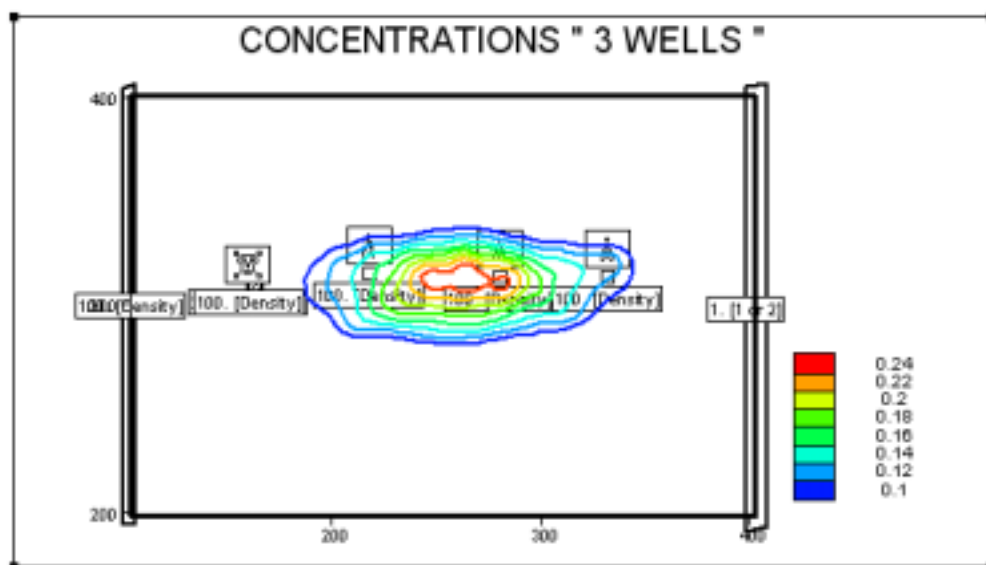
Για την τοποθέτηση των πηγαδιών ενεργοποιείται από τη στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας ‘**Layers**’ το “**BC Flow L1 layer**”. Από την αριστερή εργαλειοθήκη επιλέγεται το ‘**Point Tool**’ και σημειώνονται οι θέσεις των πηγαδιών . Με την τοποθέτηση κάθε πηγαδιού εμφανίζεται το παράθυρο ‘**Contour Information**’. Στην παράμετρο ‘**BC Type L1**’ εισάγεται η τιμή 2 που αντιστοιχεί στο δεύτερο είδος οριακών συνθηκών (σταθερός ρυθμός άντλησης). Στην παράμετρο ‘**BC Stress1**’ εισάγεται η τιμή του ρυθμού άντλησης ($-25 \text{ m}^3/\text{day}$). Με το αρνητικό πρόσημο εκφράζεται η άντληση του νερού (Εικόνα 11-28).



Εικόνα 11-28 Τοποθέτηση πηγαδιών

Είναι σημαντικό τα πηγάδια να τοποθετηθούν και στο **'Domain Outline layer'**. Βρισκόμενοι στο **"BC Flow L1 layer"** επιλέγουμε τα πηγάδια με το **'Navigate Tool'** της αριστερής εργαλειοθήκης, τα αντιγράφουμε (**Copy**) και αφού το **'Domain Outline layer'** έχει ενεργοποιηθεί, τα επικολλούμε (**Paste**). Στη συνέχεια τα επιλέγουμε από το **'Domain Outline layer'** και εμφανίζεται το παράθυρο **'Contour Information'** όπου αλλάζουμε το **'Density value'** σε 100.

Έπειτα ακολουθεί η δημιουργία του νέου δικτύου στοιχείων, το σώσιμο του σεναρίου και το τρέξιμο του προγράμματος. Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται οι συγκεντρώσεις που εξάγονται από αυτό το σενάριο (Γράφημα 11-15).

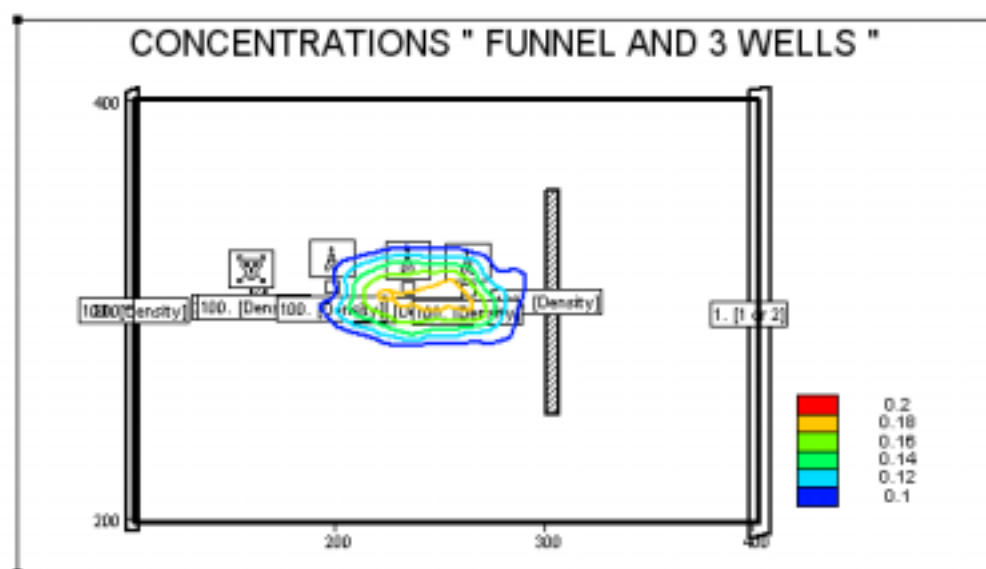


Γράφημα 11-15 Συγκεντρώσεις με τη χρήση της τεχνικής 'Pump and Treat'

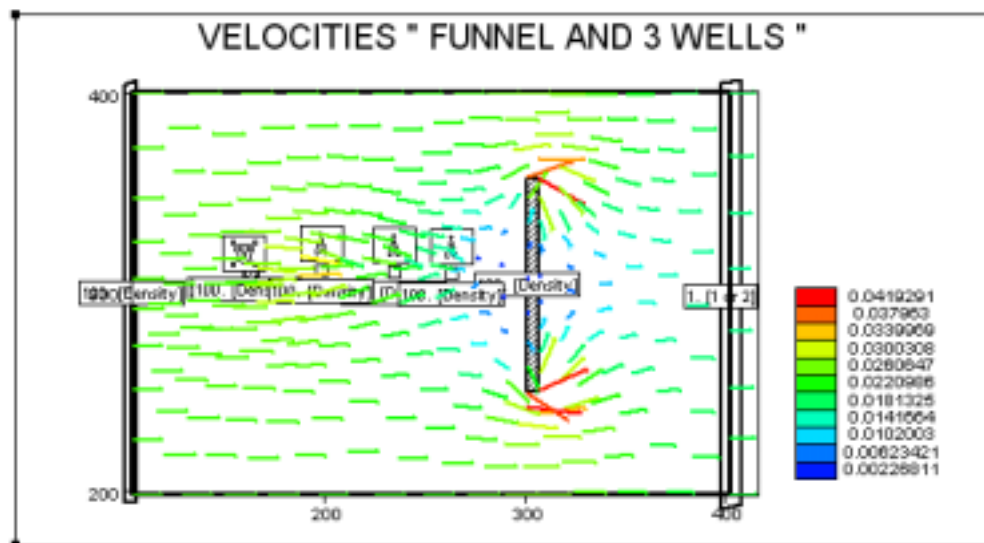
11.1.5 Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετα Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή Με Την Εφαρμογή Της Τεχνολογίας Εξυγίανσης «Άντληση Και Επεξεργασία (Pump And Treat)» Σε Συνδυασμό Με Κατασκευή Φράγματος

Η εγκατάσταση των πηγαδιών και του φράγματος γίνεται όπως στα προηγούμενα σενάρια.

Ακολουθούν τα γραφήματα των ταχυτήτων (Γράφημα 11-17), και των συγκεντρώσεων (Γράφημα 11-16) για τη σύνθετη αυτή μέθοδο.



Γράφημα 11-16 Συγκεντρώσεις με τη χρήση της τεχνικής 'Pump and Treat' και 'Funnel'



Γράφημα 11-17 Ταχύτητες με τη χρήση της τεχνικής ‘Pump and Treat’ και ‘Funnel’

11.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

Στην περίπτωση αυτή θα προσομοιώσουμε την ροή του υπογείου ύδατος και τη μεταφορά ρύπων, σε περιορισμένο υδροφόρο με τη χρήση του Μοντέλου ARGUS ONE και του κώδικα PTC. Στην συνέχεια θα προσπαθήσουμε να εφαρμόσουμε την τεχνολογία των συγκλινόντων φραγμάτων και διόδων για την εξυγίανση της περιοχής αυτής.

Όταν το πρόγραμμα ARGUS ONE ξεκινά εμφανίζεται το βασικό παράθυρο του προγράμματος και η στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας ‘**Layers**’ όπως φαίνεται στην Εικόνα 11-1, σελίδα 148.

Για να δημιουργήσουμε μια νέα εφαρμογή στο ARGUS ONE επιλέγουμε από το μενού PIES το “ **New PTC Project. . .** ” όπως στην Εικόνα 11-2, σελίδα 148. Αυτή η επιλογή θα εμφανίσει το παράθυρο ‘**PTC Configuration**’

Το παράθυρο αυτό έχει δύο επιλογές: το ‘General’ και το ‘Stresses’

Στην επιλογή ‘**General**’ εισάγονται όπως και στην περίπτωση του ελεύθερου υδροφορέα: το ‘**Project title**’, το ‘**Mesh type**’ (triangular), το ‘**molecular diffusion**’, το ‘**upstream weight**’, και το ‘**steady-state criterion**’

Στην ομάδα παραμέτρων με επικεφαλίδα *Ελεύθερη επιφάνεια νερού* ‘**Use water table**’, σε αντίθεση με τον ελεύθερο υδροφορέα δεν επιλέγεται το ‘**Use water table**’

Στην ομάδα παραμέτρων με επικεφαλίδα ‘**Echo options**’, επιλέγουμε τα ίδια δεδομένα με την περίπτωση του ελεύθερου υδροφορέα.

Στην επιλογή Stresses εισάγονται τα ίδια δεδομένα με τον ελεύθερο υδροφορέα.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η διαδικασία σχεδιασμού της περιοχής της προσομοίωσης είναι ακριβώς η ίδια με την περίπτωση του ελεύθερου υδροφορέα. Οι διαστάσεις της περιοχής είναι και σε αυτή την περίπτωση 300 m μήκος και 200 m πλάτος.

Οι οριακές συνθήκες ροής είναι τύπου 1 (σταθερό υδραυλικό ύψος) και με τιμές (**BC Stress1**) 25 m για το αριστερό άκρο και 15 m για το δεξί.

Τα δεδομένα που αφορούν την πηγή ρύπανσης εισάγονται με την μέθοδο που ακολουθήθηκε για τον ελεύθερο υδροφορέα

Οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν την κατάσταση στην περιοχή μελέτης παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Initial Head L1 (m)	35
Elevation L1 (m)	30
Bottom Elevation L1 (m)	0
Porosity L1	0.2
Storativity L1	10^{-4}
Initial Concentration L1 (gr / m ³)	0
Rain (m / day)	0
Conductivity L1 x / y / z (m / day)	1 / 1 / 0.1
Dispersivity L1 x / y / z (m ² / day)	1 / 1 / 1
Adsorption L1 x / y / z	0 / 0 / 0

Πίνακας 11-7 Τιμές των παραμέτρων εισαγωγής στο μοντέλο

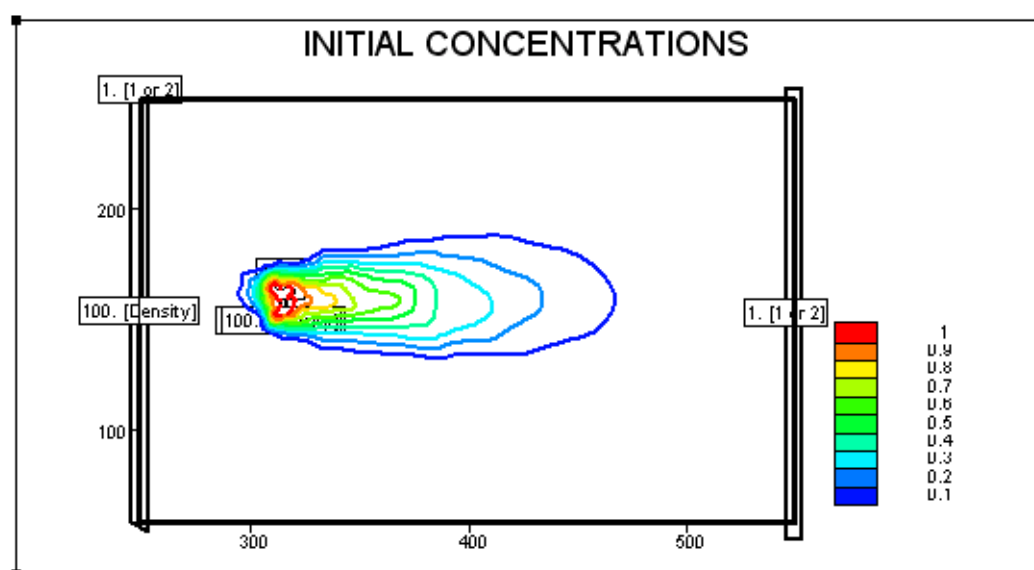
Στο επόμενο στάδιο δημιουργείται το δίκτυο των στοιχείων στην περιοχή της προσομοίωσης. Ενεργοποιείται από τη στήλη **‘Layers’** το **‘PTC Mesh’** και από την αριστερή εργαλειοθήκη διαλέγεται το **‘Magic wand tool’**. Πατώντας με το **‘Magic wand tool’** μέσα στην περιοχή μελέτης αυτόματα δημιουργείται το δίκτυο των στοιχείων. Μετά το σχηματισμό δικτύου στοιχείων, για την εξοικονόμηση μνήμης του ηλεκτρονικού υπολογιστή διαλέγεται από το μενού **‘Special’** το **‘Renumber’** και τσεκάρεται η επιλογή **‘Optimize BandWidth’**.

Τώρα είμαστε έτοιμοι να τρέξουμε το μοντέλο. Από το μενού **‘PIEs’** επιλέγεται το **‘Run PTC’** και αφού οριστεί η τοποθεσία αποθήκευσης και το όνομα των output, εμφανίζεται το παράθυρο.

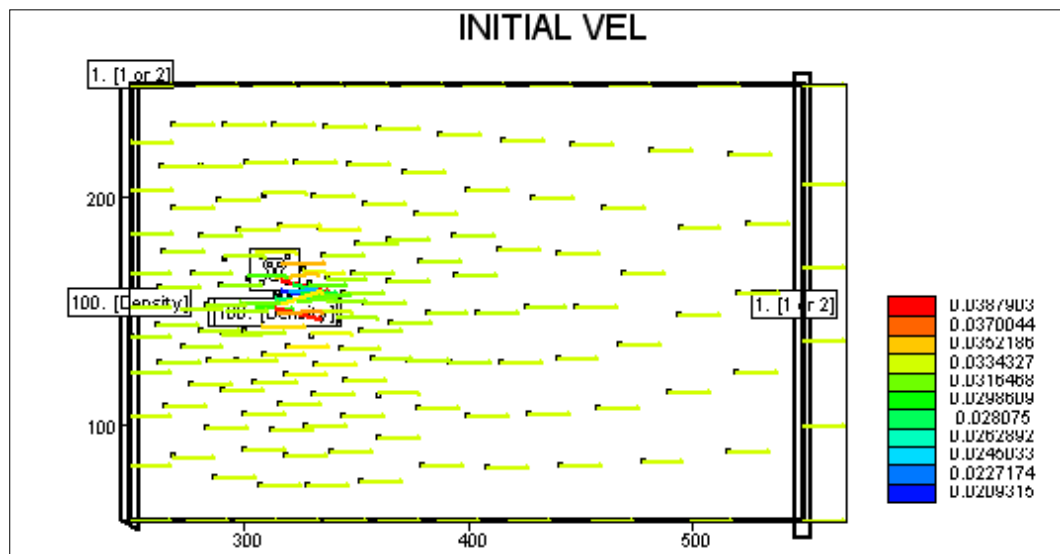
Το ARGUS ONE δίνει τη δυνατότητα να απεικονιστούν γραφικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (υδραυλικά ύψη, συγκεντρώσεις, ταχύτητες). Με τη μέθοδο που έχει εφαρμοστεί στα προηγούμενα σενάρια θα δημιουργηθούν τα γραφήματα στα παρακάτω σενάρια.

11.2.1 Αρχική Κατάσταση Περιοχής

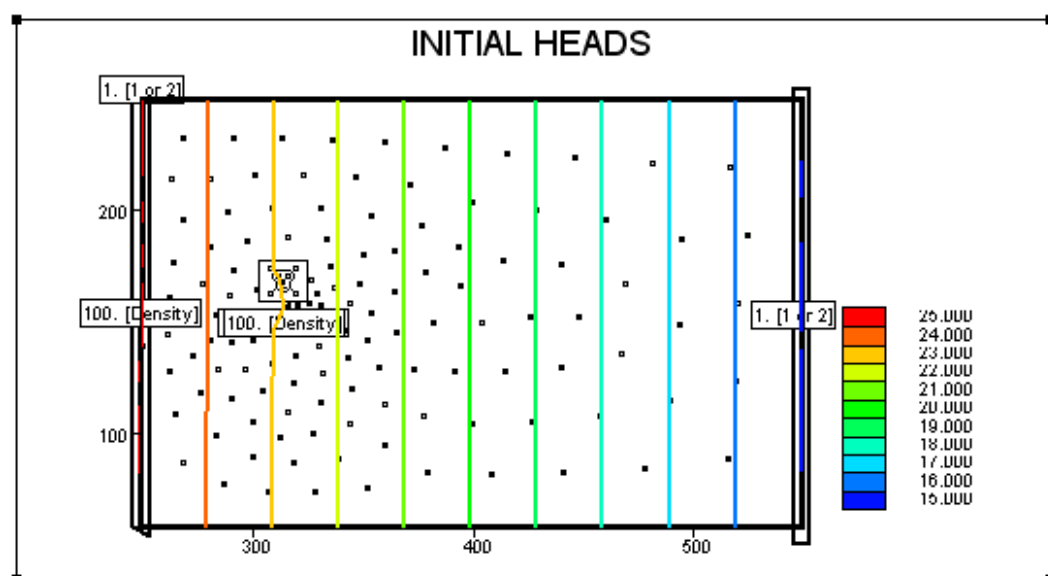
Στην περιοχή προσομοίωσης υπάρχει πηγή ρύπανσης, η οποία εκχύνει ρύπους για δύο χρόνια περίπου (700 μέρες). Στα γραφήματα που ακολουθούν απεικονίζονται τα υδραυλικά ύψη του ρύπου (Γράφημα 11-20), οι συγκεντρώσεις του ρύπου (Γράφημα 11-18), και οι ταχύτητες του ρύπου (Γράφημα 11-19).



Γράφημα 11-18 Αρχικές συγκεντρώσεις ρύπου



Γράφημα 11-19 Αρχικές ταχύτητες στον περιορισμένο υδροφορέα

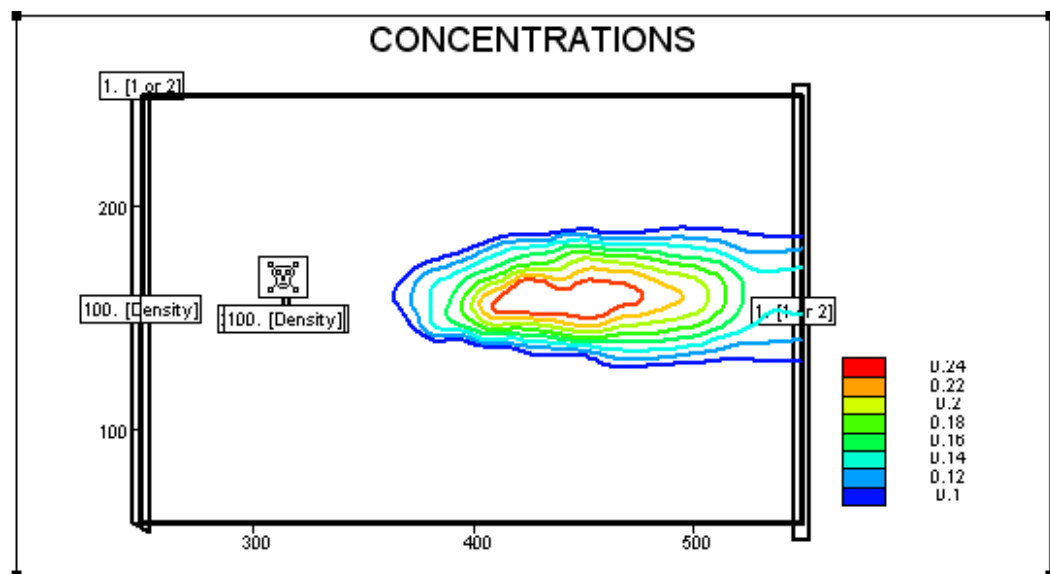


Γράφημα 11-20 Αρχικά υδραυλικά ύψη περιορισμένου υδροφορέα

11.2.2 Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετά Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή

Στην περιοχή προσομοίωσης δεν υπάρχει πλέον η πηγή ρύπανσης. Ως αρχικές συνθήκες για τα υδραυλικά ύψη και για τις συγκεντρώσεις εισάγονται τα αποτελέσματα της πρώτης προσομοίωσης. Στο γράφημα που ακολουθεί α-

πεικονίζονται οι συγκεντρώσεις του ρύπου (Γράφημα 11-21), δύο χρόνια περίπου (700 μέρες) από την στιγμή που η πηγή σταμάτησε να ρυπαίνει.



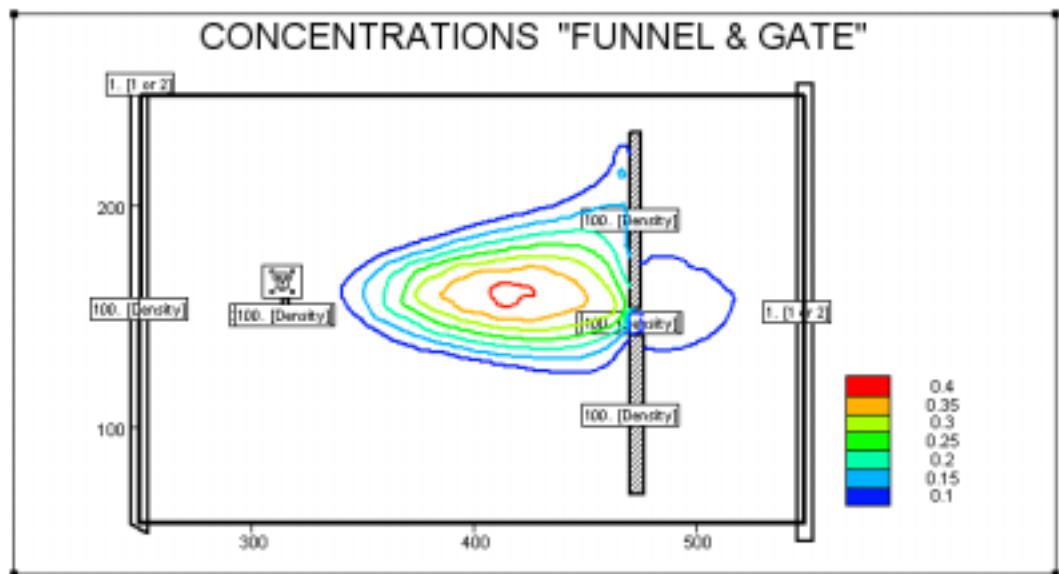
Γράφημα 11-21 Συγκεντρώσεις ρύπου στον περιορισμένο υδροφορέα

11.2.3 Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετά Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή Με Την Εφαρμογή Της Τεχνολογίας Εξυγίανσης «Συγκλίνοντα Φράγματα Και Δίοδος»

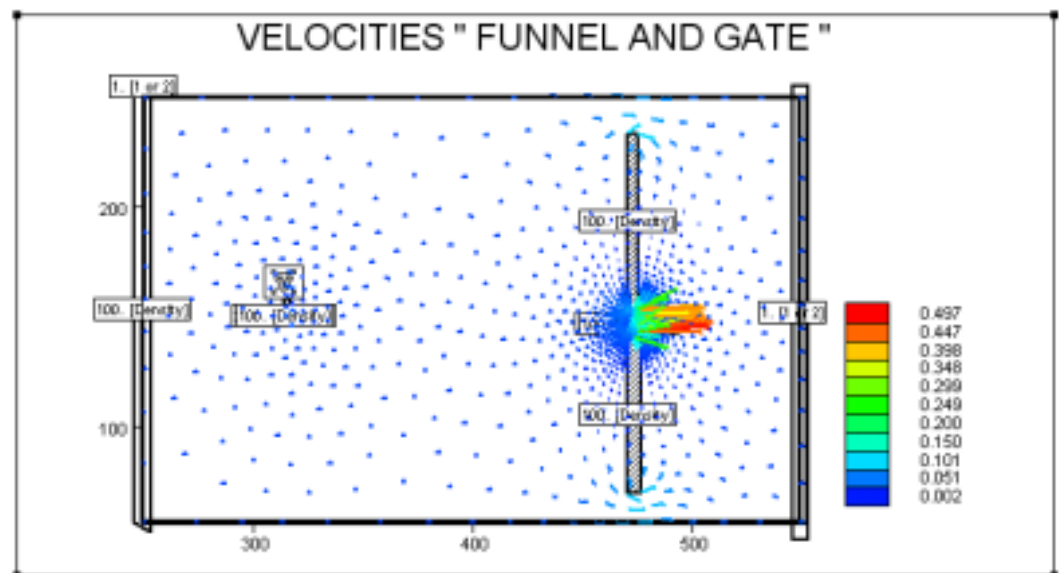
ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΣΕ ΕΥΘΕΙΑ ΚΑΙ ΔΙΟΔΟΣ

Στο στάδιο αυτό, θα παρατηρηθεί η κατάσταση ρύπανσης της περιοχής δυο χρόνια (700 ημέρες) μετά από την στιγμή που η πηγή σταμάτησε να ρυπαίνει την περιοχή με την εφαρμογή της τεχνολογίας εξυγίανσης «Συγκλίνοντα φράγματα και δίοδος», (Funnel and Gate).

Στα γραφήματα που ακολουθούν απεικονίζονται , οι συγκεντρώσεις του ρύπου (Γράφημα 11-22) και οι ταχύτητες του υπόγειου νερού (Γράφημα 11-23)



Γράφημα 11-22 Συγκεντρώσεις με την ύπαρξη ‘Funnel and Gate’



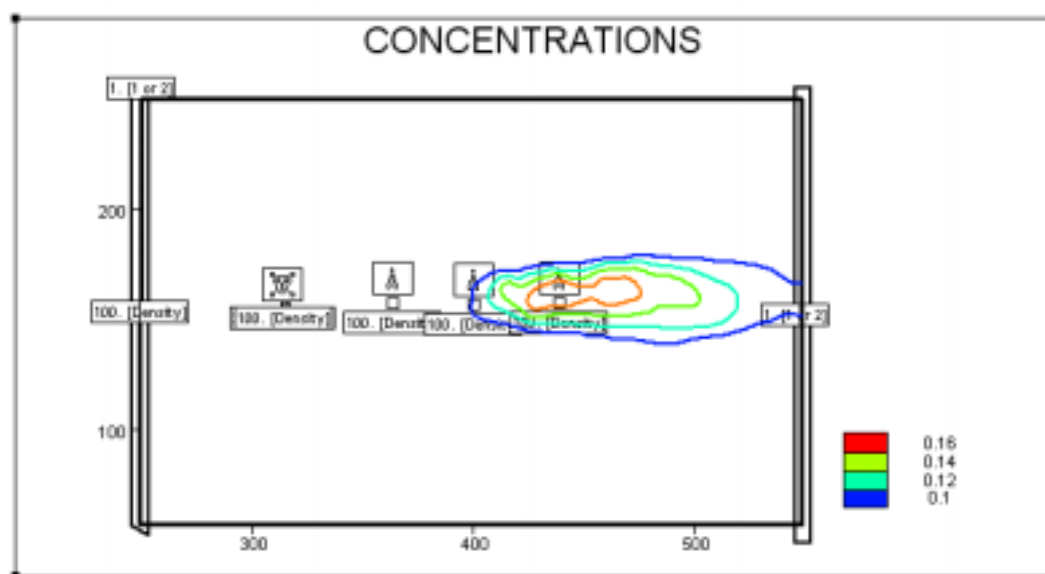
Γράφημα 11-23 Ταχύτητες με την ύπαρξη ‘Funnel and Gate’

11.2.4 Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετά Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή Με Την Εφαρμογή Της Τεχνολογίας Εξυγίανσης «Άντληση Και Επεξεργασία (Pump And Treat)»

Στο σενάριο αυτό, τοποθετούνται στην περιοχή του πλουμίου τρία πηγάδια με σταθερό ρυθμό άντλησης ίσο με $-15 \text{ m}^3/\text{d}$. Η διαδικασία εισαγωγής των πηγαδιών στο μοντέλο είναι ίδια με αυτή που εφαρμόστηκε στον ελεύθερο υδροφορέα. Η ρυπασμένη μάζα που αφαιρείται από τον υπόγειο υδροφορέα θα

επεξεργαστεί με εφαρμογή τεχνικών απορρύπανσης. Το σενάριο αυτό πραγματοποιείται για να συγκριθούν τα αποτελέσματα εξυγίανσης του υδροφορέα της τεχνολογίας ‘*Pump and treat*’ με αυτά της τεχνολογίας ‘*Συγκλινόντων Φραγμάτων και διόδου*’.

Ακολουθεί το γράφημα των συγκεντρώσεων του ρύπου (Γράφημα 11-24)

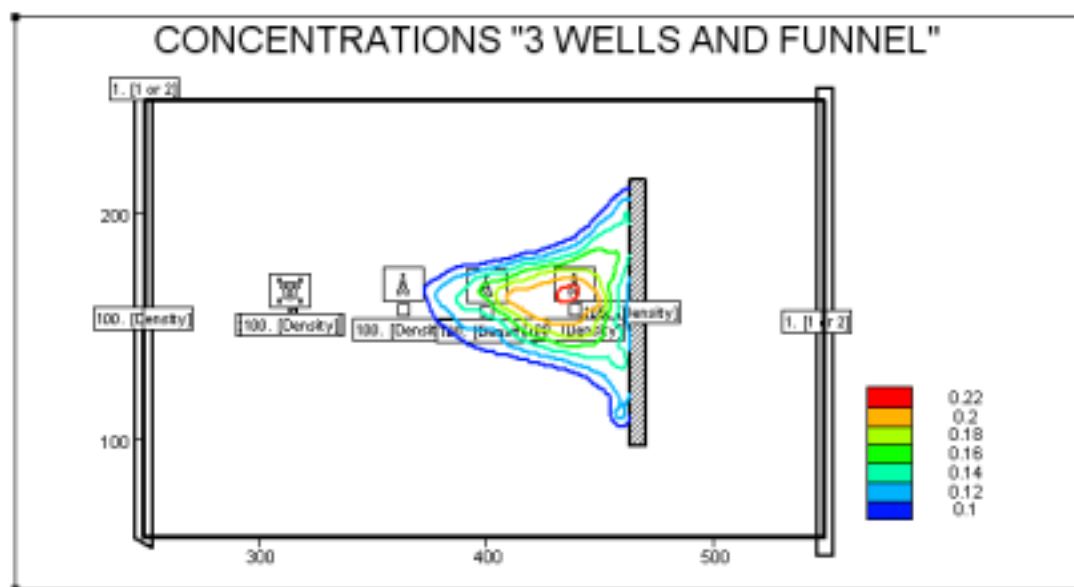


Γράφημα 11-24 Συγκεντρώσεις ρύπου με την τεχνολογία ‘*Pump and treat*’

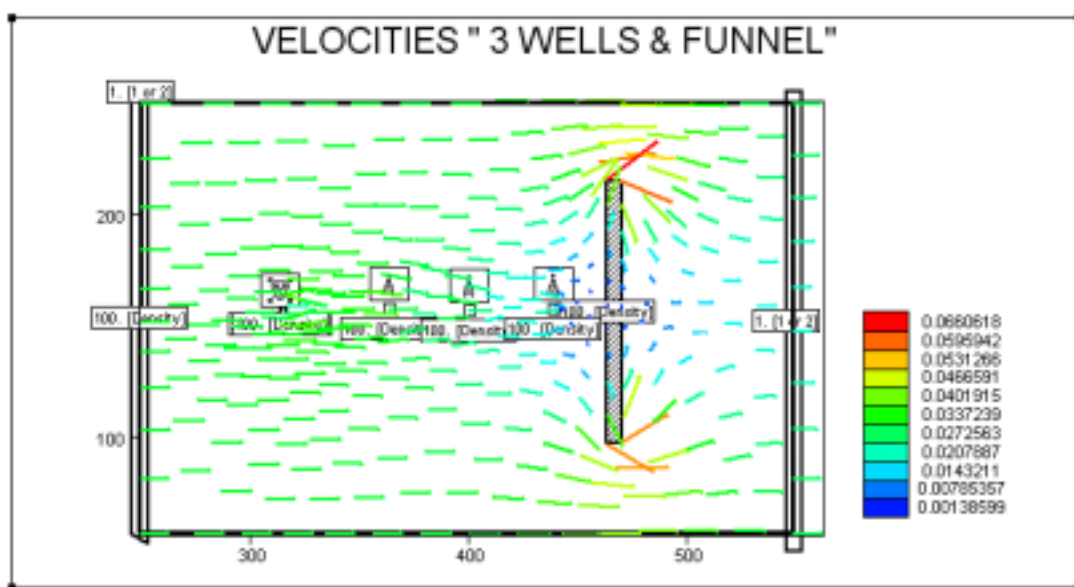
11.2.5 Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετα Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή Με Την Εφαρμογή Της Τεχνολογίας Εξυγίανσης «Αντλήση Και Επεξεργασία (Pump And Treat)» Σε Συνδυασμό Με Κατασκευή Αδιαπέρατου Φράγματος

Η εγκατάσταση των πηγαδιών και του φράγματος γίνεται όπως στα προηγούμενα σενάρια.

Ακολουθούν τα γραφήματα των ταχυτήτων (Γράφημα 11-26) και των συγκεντρώσεων (Γράφημα 11-25) για τη σύνθετη αυτή μέθοδο.



Γράφημα 11-25 Συγκεντρώσεις ρύπου με την τεχνολογία 'Pump and treat and Funnel'



Γράφημα 11-26 Ταχύτητες με την τεχνολογία 'Pump and treat and Funnel'

11.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

11.3.1 Ελεύθερος Υδροφορέας

Στο **Σενάριο 11.1.1** προσομοιώθηκε η κατάσταση της περιοχής δύο χρόνια από την στιγμή που άρχισε η έκχυση των ρύπων από την πηγή. Παρατηρούμε ότι το ρυπασμένο πλούμιο έχει μετακινηθεί περίπου 150 μέτρα, και οι συγκεντρώσεις έχουν τιμές από $1-0,1^{\Delta}$ gr/m³ (Γράφημα 11-2, σελ 170). Οι ταχύτητες του υπογείου νερού κυμαίνονται από 0,02-0,025 m/day (Γράφημα 11-3, σελ 172). Τα υδραυλικά ύψη κατανέμονται ομοιόμορφα από τα 40 έως τα 33 μέτρα (Γράφημα 11-1, σελ 169).

Στο **Σενάριο 11.1.2** προσομοιώθηκε η κατάσταση της περιοχής δύο χρόνια από την στιγμή που σταμάτησε η έκχυση των ρύπων από την πηγή, και χωρίς την εφαρμογή τεχνολογίας εξυγίανσης. Από το Γράφημα 11-4, σελ 175 φαίνεται ότι το πλούμιο των ρυπαντών έχει καλύψει όλη την περιοχή μελέτης, και οι συγκεντρώσεις έχουν τιμές από 0,28-0,01 gr/m³. Τα διαγράμματα των υδραυλικών υψών και των ταχυτήτων του υπογείου νερού δεν παρατίθενται επειδή δεν παρατηρείται καμία αλλαγή με το Σενάριο.

Στο **Σενάριο 11.1.3** προσομοιώθηκε η κατάσταση της περιοχής δύο χρόνια από την στιγμή που σταμάτησε η έκχυση των ρύπων από την πηγή, και με την εφαρμογή της τεχνολογίας εξυγίανσης «Συγκλίνοντα φράγματα και δίοδος». Στο σενάριο αυτό διακρίνονται τέσσερις υποπεριπτώσεις:

Αρχικά εξετάστηκε η εγκατάσταση φραγμάτων σε ευθεία με δίοδο 14 περίπου μέτρων. Τα υδραυλικά ύψη στην περιοχή δεν αλλάζουν σημαντικά με την εγκατάσταση του φράγματος. Ελάχιστες αλλαγές παρουσιάζονται αμέσως ανάντη και κατάντη του φράγματος, (Γράφημα 11-5, σελ 179). Αντίθετα σημαντικές αλλαγές εμφανίζονται στις ταχύτητες του υπογείου νερού. Σχεδόν μηδενίζονται στη περιοχή ανάντη του φράγματος και μακριά από αυτό. Στη

^Δ οι συγκεντρώσεις είναι κανονικοποιημένες

δίοδο όμως, όπως αναμενόταν αυξάνονται αισθητά με μέγιστη τιμή 0,394 m/day. Οι τιμές των ταχυτήτων αυξάνουν επίσης στα σημεία που τελειώνει το φράγμα, (Γράφημα 11-6, σελ 180). Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις των ρυπαντών μετά την εγκατάσταση του φράγματος παρατηρούνται σημαντικές διαφορές σε σύγκριση με το Σενάριο 11.1.2. Τώρα το ρυπασμένο πλούμιο έχει περιοριστεί στο τμήμα της περιοχής ανάντη του φράγματος. Οι τιμές των συγκεντρώσεων κυμαίνονται από 0,5-0,1 gr/m³, (Γράφημα 11-7, σελ 180). Μετά την επεξεργασία των ρύπων στη δίοδο (90 % απόδοση) οι συγκεντρώσεις τους στο υπόγειο νερό κατάντη του φράγματος έχουν μέγιστη τιμή 0,1 gr/m³. Ως αποτέλεσμα της μεθόδου αυτής το ρυπασμένο πλούμιο περιορίστηκε στα ανάντη του φράγματος. Με την πάροδο του χρόνου οι συγκεντρώσεις των ρύπων ανάντη του φράγματος μειώνονται, αφού παρασυρόμενες από το υπόγειο νερό, διέρχονται από τη δίοδο όπου και αποδομούνται.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η εγκατάσταση φραγμάτων σε ευθεία με δίοδο 5 περίπου μέτρων. Τα υδραυλικά ύψη στην περιοχή δεν αλλάζουν σημαντικά με την αλλαγή του πλάτους της διόδου. Σημαντικές αλλαγές εμφανίζονται όμως στις ταχύτητες του υπογείου νερού στη δίοδο. Η μέγιστη τιμή τους φτάνει τα 0,449 m/day (Γράφημα 11-9, σελ 181). Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο αφού η ίδια ποσότητα υπογείου νερού αναγκάζεται να περάσει από δίοδο μικρότερου πλάτους. Στην περίπτωση αυτή οι συγκεντρώσεις των ρύπων κατάντη της διόδου είναι ακόμα μικρότερες συγκρινόμενες με αυτές που παρατηρήθηκαν στη δίοδο πλάτους 14 μέτρων, δηλαδή μικρότερες των 0,1 gr/m³ (Γράφημα 11-8, σελ 181).

Στο επόμενο υποσενάριο προσομοιώθηκε η εγκατάσταση φραγμάτων με γωνία 120° και με δίοδο 10 περίπου μέτρων. Και σε αυτή την περίπτωση τα υδραυλικά ύψη δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον (Γράφημα 11-10, σελ 182). Οι ταχύτητες όμως του υπογείου νερού στη δίοδο έχουν αυξηθεί αρκετά και φτάνουν τα 1,415 m/day γεγονός που μπορεί να επιδράσει αρνητικά στην επεξεργασία των ρύπων στη δίοδο (Ελάττωση χρόνου παραμονής) (Γράφημα 11-12, σελ 183). Στην περίπτωση των συγκεντρώσεων, (Γράφημα 11-11, σελ 182), η διάταξη αυτή έχει ανάλογα αποτελέσματα με τα φράγματα σε ευθεία, αλλά απαιτείται η κατασκευή μεγαλύτερου φράγματος για τον εγκλεισμό

όλου του πλουμίου. Μεγαλύτερο φράγμα, όμως , συνεπάγεται αυξημένο κόστος εγκατάστασης.

Τέλος, εξετάστηκε η περίπτωση φράγματος σχήματος U. Οι ταχύτητες του υπογείου νερού στη δίοδο φτάνουν τα 0,389 m/day (Γράφημα 11-14, σελ 184). Στο διάγραμμα των συγκεντρώσεων φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος του φράγματος, τόσο πιο αποτελεσματική είναι η διάταξη αυτή για την εξυγίανση της περιοχής ,αφού απαιτείται ο εγκλεισμός όλου του πλουμίου. (Γράφημα 11-13, σελ 183). Μεγαλύτερο φράγμα, όμως , συνεπάγεται και πάλι αυξημένο κόστος εγκατάστασης.

Το **Σενάριο 11.1.4** πραγματοποιείται για να συγκριθούν τα αποτελέσματα εξυγίανσης του υδροφορέα της τεχνολογίας '*Pump and treat*' με αυτά της τεχνολογίας '*Συγκλινόντων Φραγμάτων και διόδου*'. Μετά την εγκατάσταση των τριών πηγαδιών στην περιοχή του ρυπασμένου πλουμίου, παρατηρείται σημαντική μείωση στις συγκεντρώσεις των ρύπων .Οι τιμές τους κυμαίνονται από 0,24-0,1 gr/m³ (Γράφημα 11-15, σελ 186). Με τη μέθοδο '*Pump and treat*' όχι μόνο περιορίζεται η εξάπλωση της ρύπανσης, αλλά επιτυγχάνεται και σημαντική εξυγίανση του υδροφορέα, αφού αφαιρείται ρυπασμένο υπόγειο νερό. Η μάζα όμως του ρυπαντή που περιέχεται σε αυτό πρέπει να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία. Όπως όμως έχει ήδη αναφερθεί στο αντίστοιχο κεφάλαιο, το κόστος της μεθόδου αυτής είναι σημαντικά υψηλότερο από αυτό της τεχνολογίας των '*Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδου*'.

Στο **Σενάριο 11.1.5** εξετάζεται ο συνδυασμός της τεχνολογίας '*Pump and treat*' με την εγκατάσταση υπόγειου μη διαπερατού φράγματος (barrier).Από το διάγραμμα των συγκεντρώσεων (Γράφημα 11-16, σελ 186) προκύπτει πως με το συνδυασμό των μεθόδων επιτυγχάνεται περαιτέρω εξυγίανση της περιοχής. Οι συγκεντρώσεις έχουν τιμές από 0,24 -0,1 gr/m³.Το αρνητικό στην περίπτωση αυτή είναι η υπερβολική αύξηση του κόστους εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης.

Συγκρίνοντας όλα τα παραπάνω σενάρια με βάση την αποτελεσματικότητά τους για τον περιορισμό του ρυπασμένου πλουμίου, την εξυγίανση της

περιοχής και το κόστος τους προκύπτει ότι βέλτιστη λύση είναι η εγκατάσταση φράγματος σε ευθεία με δίοδο πλάτους περίπου 5 μέτρων.

11.3.2 Περιορισμένος Υδροφορέας

Στο **Σενάριο 11.2.1** προσομοιώθηκε η κατάσταση της περιοχής δύο χρόνια από την στιγμή που άρχισε η έκχυση των ρύπων από την πηγή. Παρατηρούμε ότι το ρυπασμένο πλούμιο έχει μετακινηθεί περίπου 150 μέτρα, και οι συγκεντρώσεις έχουν τιμές από 1-0,1[▲] gr/m³ (Γράφημα 11-18, σελ 189). Οι ταχύτητες του υπογείου νερού κυμαίνονται από 0,02-0,038 m/day (Γράφημα 11-19, σελ 190). Τα υδραυλικά ύψη κατανέμονται ομοιόμορφα από τα 25 έως τα 15 μέτρα (Γράφημα 11-20, σελ 190).

Στο **Σενάριο 11.2.2** προσομοιώθηκε η κατάσταση της περιοχής δύο χρόνια από την στιγμή που σταμάτησε η έκχυση των ρύπων από την πηγή, και χωρίς την εφαρμογή τεχνολογίας εξυγίανσης. Από το (Γράφημα 11-21, σελ 191) φαίνεται ότι το πλούμιο των ρυπαντών έχει προχωρήσει, χωρίς όμως να παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις ρυπαντών σε όλη την περιοχή μελέτης. Οι συγκεντρώσεις έχουν τιμές από 0,24-0,1 gr/m³. Τα διαγράμματα των υδραυλικών υψών και των ταχυτήτων του υπογείου νερού δεν παρατίθενται επειδή δεν παρατηρείται καμία αλλαγή με το Σενάριο 11.2.1.

Στο **Σενάριο 11.2.3** προσομοιώθηκε η κατάσταση της περιοχής δύο χρόνια από την στιγμή που σταμάτησε η έκχυση των ρύπων από την πηγή, και με την εφαρμογή της τεχνολογίας εξυγίανσης «Συγκλίνοντα φράγματα και δίοδος».

Εξετάστηκε η εγκατάσταση φραγμάτων σε ευθεία με δίοδο 8 περίπου μέτρων. Σημαντικές αλλαγές εμφανίζονται στις ταχύτητες του υπογείου νερού. Σχεδόν μηδενίζονται στη περιοχή ανάντη του φράγματος και μακριά από αυτό. Στη δίοδο όμως, όπως αναμενόταν, αυξάνονται αισθητά με μέγιστη τιμή

[▲] οι συγκεντρώσεις είναι κανονικοποιημένες

0,497m/day. Οι τιμές των ταχυτήτων αυξάνουν επίσης στα σημεία που τελειώνει το φράγμα (Γράφημα 11-23, σελ 192).Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις των ρυπαντών μετά την εγκατάσταση του φράγματος παρατηρούνται σημαντικές διαφορές σε σύγκριση με το Σενάριο 11.2.2. Τώρα το ρυπασμένο πλούμιο έχει περιοριστεί στο τμήμα της περιοχής ανάντη του φράγματος. Οι τιμές των συγκεντρώσεων κυμαίνονται από 0,4-0,1 gr/m³ (Γράφημα 11-22, σελ 192). Μετά την επεξεργασία των ρύπων στη δίοδο (90 % απόδοση) οι συγκεντρώσεις τους στο υπόγειο νερό κατάντη του φράγματος έχουν μέγιστη τιμή 0,1 gr/m³. Ως αποτέλεσμα της μεθόδου αυτής το ρυπασμένο πλούμιο περιορίστηκε στα ανάντη του φράγματος. Με την πάροδο του χρόνου οι συγκεντρώσεις των ρύπων ανάντη του φράγματος μειώνονται, αφού παρασυρόμενες από το υπόγειο νερό, διέρχονται από τη δίοδο όπου και αποδομούνται. ,

Το **Σενάριο 11.2.4** πραγματοποιείται για να συγκριθούν τα αποτελέσματα εξυγίανσης του υδροφορέα της τεχνολογίας ‘*Pump and treat*’ με αυτά της τεχνολογίας ‘*Συγκλινόντων Φραγμάτων και διόδου*’, όπως και στην περίπτωση του ελεύθερου υδροφορέα. Μετά την εγκατάσταση των τριών πηγαδιών στην περιοχή του ρυπασμένου πλουμίου, παρατηρείται σημαντική μείωση στις συγκεντρώσεις των ρύπων. Οι τιμές τους κυμαίνονται από 0,16-0,1 gr/m³ (Γράφημα 11-24, σελ 193).

Στο **Σενάριο 11.2.5** εξετάζεται ο συνδυασμός της τεχνολογίας ‘*Pump and treat*’ με την εγκατάσταση υπόγειου μη διαπερατού φράγματος (barrier). Από το γράφημα των συγκεντρώσεων προκύπτει πως με το συνδυασμό των μεθόδων επιτυγχάνεται περαιτέρω εξυγίανση της περιοχής (Γράφημα 11-25, σελ 194).. Οι συγκεντρώσεις έχουν τιμές από 0,22 -0,1 gr/m³. Οι ταχύτητες του υπόγειου νερού στα άκρα του φράγματος φτάνουν τα 0,066 m/day, ενώ σε όλη σχεδόν την περιοχή μελέτης κυμαίνονται από 0,02-0,04 m/day (Γράφημα 11-26, σελ 194).

Συγκρίνοντας όλα τα παραπάνω σενάρια για τον περιορισμένο υδροφορέα, με βάση την αποτελεσματικότητά τους για τον περιορισμό του ρυπασμέ-

νου πλουμίου, την εξυγίανση της περιοχής και το κόστος τους, προκύπτει ότι βέλτιστη λύση είναι η εγκατάσταση φράγματος σε ευθεία με δίοδο πλάτους περίπου 8 μέτρων.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των σεναρίων που προσομοιώθηκαν για ελεύθερο και περιορισμένο υδροφορέα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η ενδεδειγμένη λύση για τον περιορισμό του ρυπασμένου πλουμίου και την εξυγίανση της περιοχής μελέτης, είναι η εγκατάσταση φράγματος και διόδου σε ευθεία, κάθετα στην υδραυλική κλίση της περιοχής. Το πλάτος της διόδου προσαρμόζεται ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο.

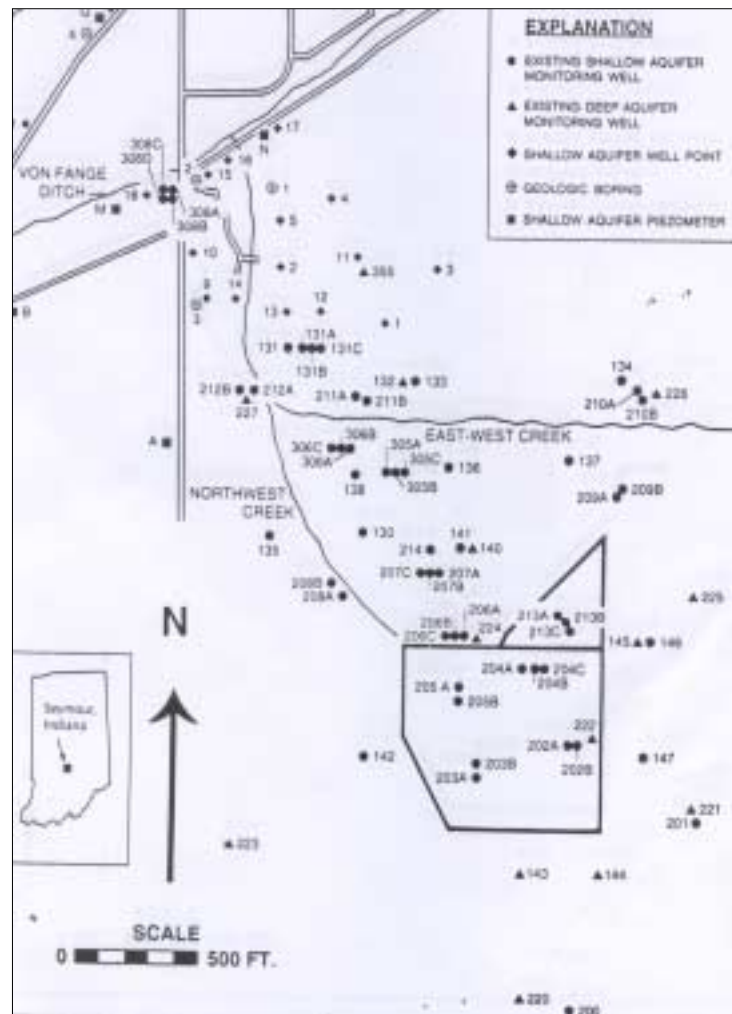
12. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΤΟΥ ΡΥΠΑΣΜΕΝΟΥ, ΑΠΟ ΒΤΕΧ, ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ SEYMOUR

12.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ SEYMOUR (Καρατζάς, 2002)

Ο οργανισμός πετρελαιοειδών του Seymour λειτουργούσε μια μονάδα στην τοποθεσία Seymour από το 1970 έως το 1979. Όμως το 1979, ο οργανισμός χρεοκόπησε και εγκατέλειψε τη μονάδα, αφήνοντας, στην τοποθεσία, μεγάλες δεξαμενές που περιείχαν υδρογονάνθρακες πετρελαίου ΒΤΕΧ. Για τα επόμενα δύο περίπου χρόνια, μια ποσότητα υγρών υδρογονανθράκων πετρελαίου διέρρευσε στο έδαφος από τις δεξαμενές πριν από την πλήρη απομάκρυνση τους το 1981. Ένα σημαντικό ποσό από τους υδρογονάνθρακες πετρελαίου διείσδυσαν στον υδροφόρα και θα απειλούσαν ιδιωτικά πηγάδια ύδρευσης στα βόρεια της περιοχής αν δεν πραγματοποιούνταν ενέργειες για την εξυγίανση της περιοχής. Οι συγκεντρώσεις του ΒΤΕΧ (Βενζόλιο) στο υπόγειο νερό ήταν περίπου 50 μg/l.

Η τοποθεσία επικινδύνων αποβλήτων στο Seymour δίνεται στο Χάρτη 12-1 που ακολουθεί.

Η γεωλογία σε αυτή την περιοχή αποτελείται από ένα στρώμα από μη σταθεροποιημένα περιπαγετώδη ιζήματα που βρίσκονται πάνω από στερεό πέτρωμα (bedrock) αργιλικού σχιστόλιθου. Τα μη σταθεροποιημένα ιζήματα αποτελούνται από αλλουβιακές αποθέσεις που προέρχονται από παγετώδεις τάφρους και λιμναία ιλύς και άργιλο. Το στερεό πέτρωμα (bedrock) αργιλικού σχιστόλιθου είναι αδιαπέρατο.



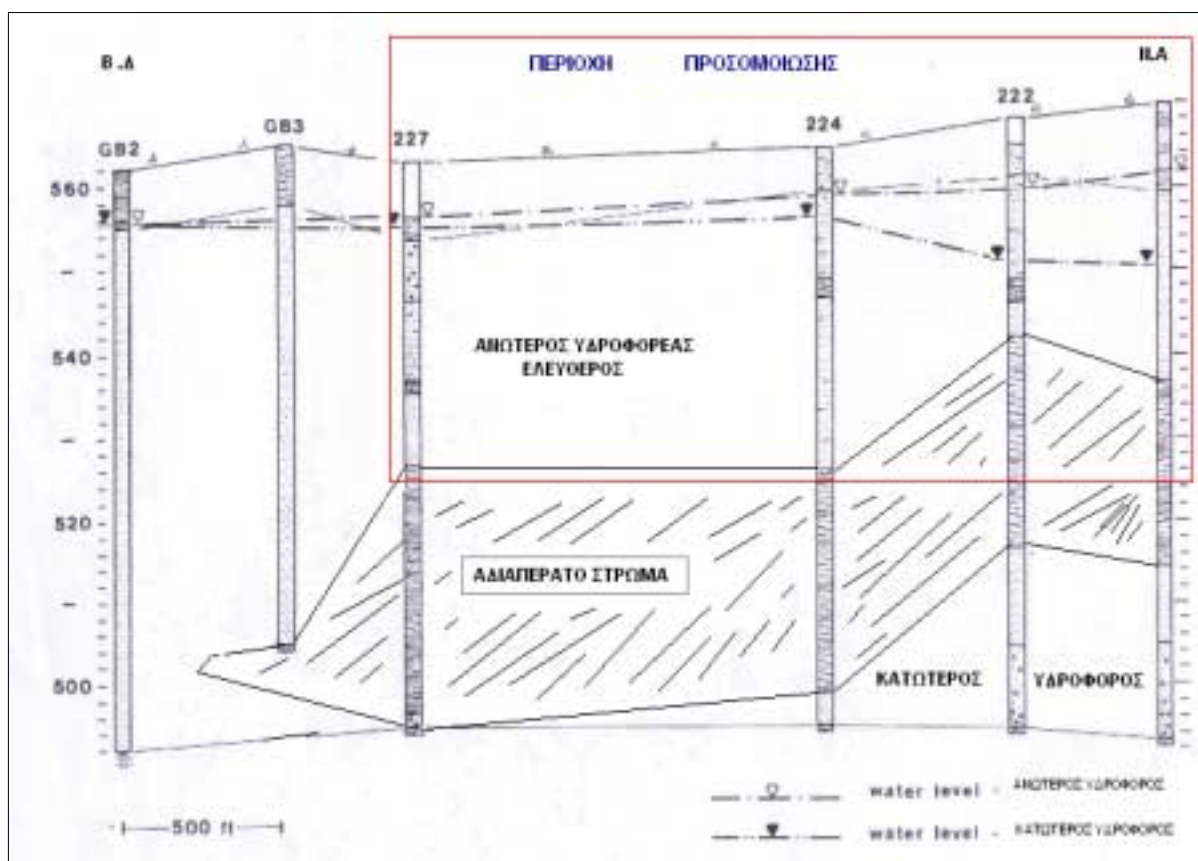
Χάρτης 12-1 Περιοχή Seymour

Τα υδρογεωλογικά δεδομένα της περιοχής θα παρουσιαστούν και θα ερμηνευτούν μέσω της χρήσης γεωλογικών εγκάρσιων τομών. Οι γεωλογικές εγκάρσιες τομές δημιουργούνται από πληροφορίες που λαμβάνονται από προ-έρχονται κυρίως από πηγάδια. Όταν γίνεται διάνοιξη ενός πηγαδιού ή όταν γίνεται άνοιγμα οπής στο έδαφος, δημιουργείται ένα περιγραφικό καρότο από στρώματα που απαντώνται. Το καρότο πολλές φορές δημιουργείται από κάποιον που ανοίγει πηγάδια (driller) και σε αυτή την περίπτωση ονομάζεται driller's log. Επειδή το επίπεδο μόρφωσης και η κατανόηση της γεωλογίας διαφέρει από κάθε άνθρωπο που ανοίγει πηγάδια, η ποιότητα των καρότων μπορεί να διαφέρει και αυτή. Τις περισσότερες φορές το γεωλογικό καρότο που δημιουργείται από ένα γεωλόγο παρέχει τις πιο αξιόπιστες πληροφορίες.

Η γεωλογική εγκάρσια τομή του σχήματος δημιουργούνται από πληροφορίες που λαμβάνονται από τις γεωτρήσεις των γεωλογικών καρότων. Η Ε-

γκάρσια τομή είναι βορειοανατολική από το GB2 έως το GB3 έως το 227, το 224, το 222, το 221. Η Εικόνα 12-1 έχει οριζόντια κλίμακα: 1in (2,54 cm) = 500ft και κάθετη κλίμακα: 1in = 20ft.

Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι η ακριβής περιγραφή της διαδικασίας σχεδιασμού της γεωλογικής εγκάρσιας τομής δεν στο σκοπό αυτής της μελέτης. Ο σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε ως εργασία στα πλαίσια του μαθήματος ‘Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων’ και γι’ αυτό το λόγο θα χρησιμοποιήσουμε την τελική μορφή της γεωλογικής εγκάρσιας τομής όπως φαίνεται στην Εικόνα 12-1.



Εικόνα 12-1 Εγκάρσια τομή της τοποθεσίας Seymour από τα N.A προς τα B.A.

Στην εγκάρσια τομή παρατηρούμε ότι υπάρχουν δύο υδροφορείς. Ειδικότερα στα γεωλογικά καρότα 2 και 3 υπάρχει ένας υδροφορέας. Στο πηγάδι 227 όμως αρχίζουν να διαχωρίζονται οι υδροφορείς σε δύο διαφορετικούς που χωρίζονται από ένα αδιαπέρατο στρώμα εδάφους. Η γεωμετρία και των δύο

υδροφορέων δεν είναι σταθερή, αντιθέτως το πάχος τους αλλάζει από σημείο σε σημείο. Συμπερασματικά έχουμε λοιπόν, δύο υδροφορείς που επικοινωνούν πλήρως μεταξύ τους στα βορειοανατολικά.

Για να σχεδιαστεί το ύψος του υδροφορέα στην εγκάρσια τομή παίρνουμε πληροφορίες από τα ρηχά πηγάδια που έχουν διανοιχτεί, δίπλα σε κάθε βαθύ πηγάδι της τομής. .

Μελετώντας τη σχέση της ανώτερης πιεζομετρικής επιφάνειας με τη στρωματογραφία παρατηρούμε ότι τα επίπεδα νερού είναι κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το ανώτερο στρώμα είναι ημιδιαπερατό γι' αυτό θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε τον υδροφορέα ελεύθερο. Σε όλο το πλάτος του υδροφορέα το έδαφος είναι αμμώδες (medium to coarse sand).

12.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΔΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ SEYMOUR

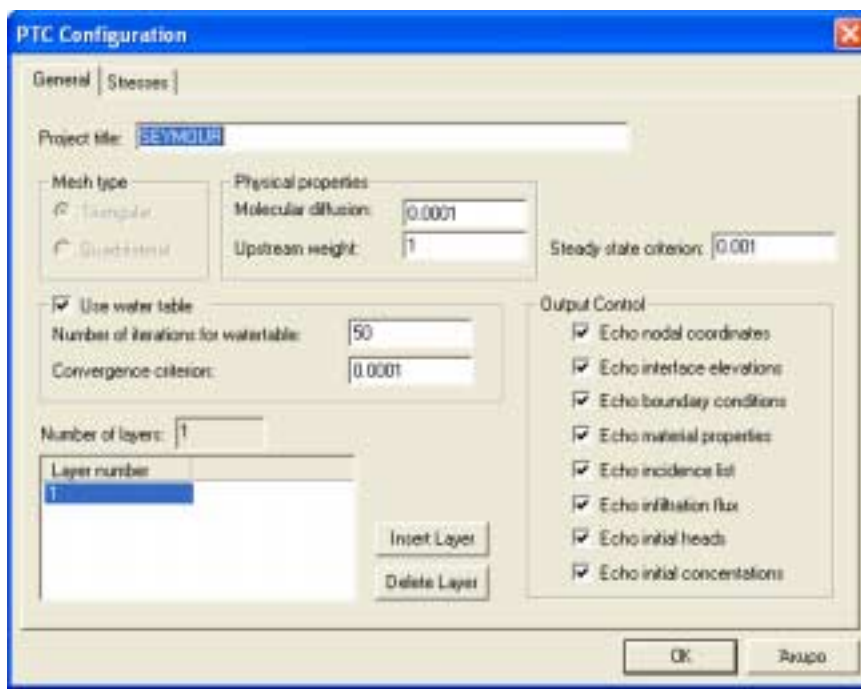
12.2.1 Προσομοίωση Αρχικής Κατάστασης Της Περιοχής Seymour

Σε αυτή την εφαρμογή πεδίου θα προσομοιώσουμε την ροή του υπογείου ύδατος και τη μεταφορά ρύπων, σε ελεύθερο υδροφορέα με τη χρήση του Μοντέλου ARGUS ONE και του κώδικα PTC. Στην συνέχεια θα προσπαθήσουμε να εφαρμόσουμε την τεχνολογία των *Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων* για την εξυγίανση της περιοχής αυτής. Η διαδικασία προσομοίωσης είναι ίδια με αυτή που εφαρμόστηκε στα σενάρια του φανταστικού προβλήματος που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα.

Όταν το πρόγραμμα ARGUS ONE ξεκινά εμφανίζεται το βασικό παράθυρο του προγράμματος και η στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας ‘**Layers**’ όπως φαίνεται στην Εικόνα 11-1, σελ 148.

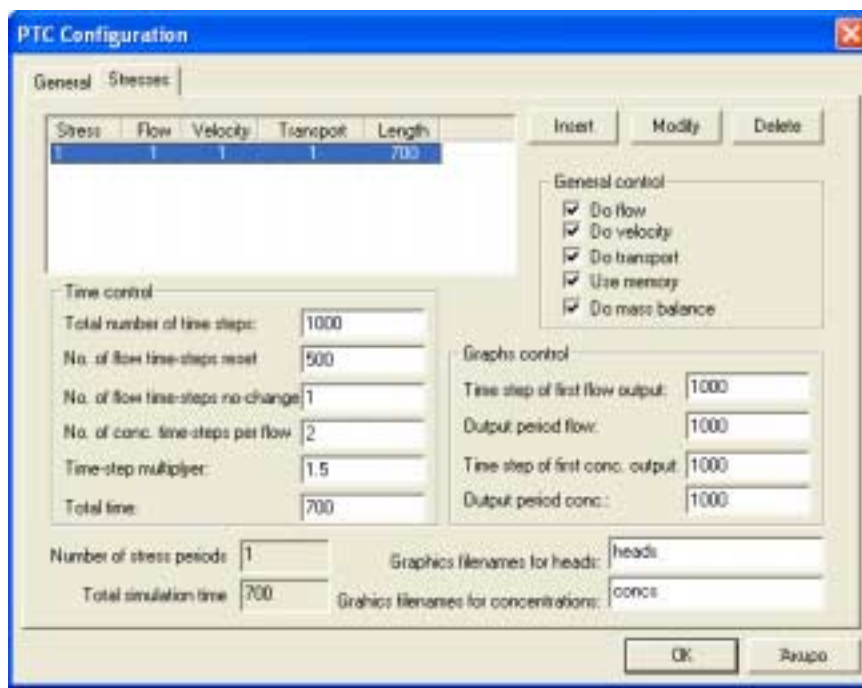
Για να δημιουργήσουμε τη νέα εφαρμογή στο ARGUS ONE επιλέγουμε από το μενού PIES το “ **New PTC Project. . .** ” όπως στην Εικόνα 11-2, σελ

148. Αυτή η επιλογή θα εμφανίσει το παράθυρο **‘PTC Configuration’**. Το παράθυρο του **‘PTC Configuration’** έχει δύο επιλογές: **‘General’** και **‘Stresses’**. Στην συνέχεια εισάγονται τα δεδομένα στις δύο αυτές επιλογές για τη διαμόρφωση του **‘PTC Configuration’**. Εικόνες 12-2 και 12-3.



Εικόνα 12-2 Διαμόρφωση της εφαρμογής του PTC **‘PTC Configuration’**, **‘General’**

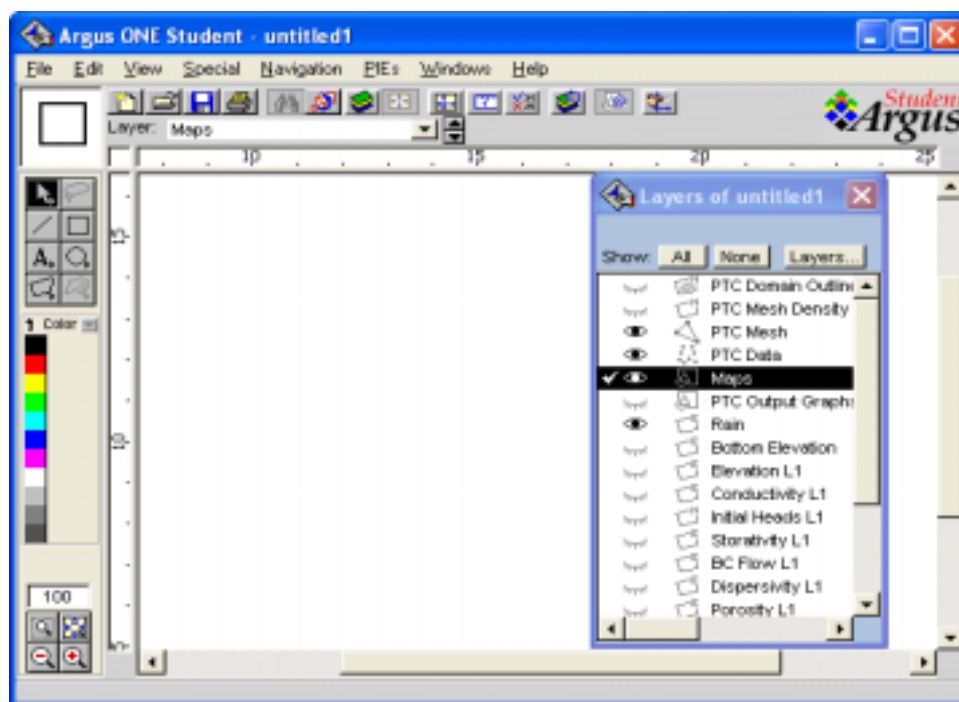
Ο υδροφορέας της περιοχής προσομοίωσης είναι ελεύθερος γι’ αυτό τσεκάρεται η επιλογή **‘Use water table’**. Στο σημείο αυτό επίσης, θεωρούμε ότι έχουμε ένα στρώμα **‘Layer’** γιατί ο υδροφορέας αποτελείται από ένα γεωλογικό στρώμα με τις ίδιες ιδιότητες και οι ρυπαντές BTEX είναι διαλυμένοι σε όλο το πάχος του.



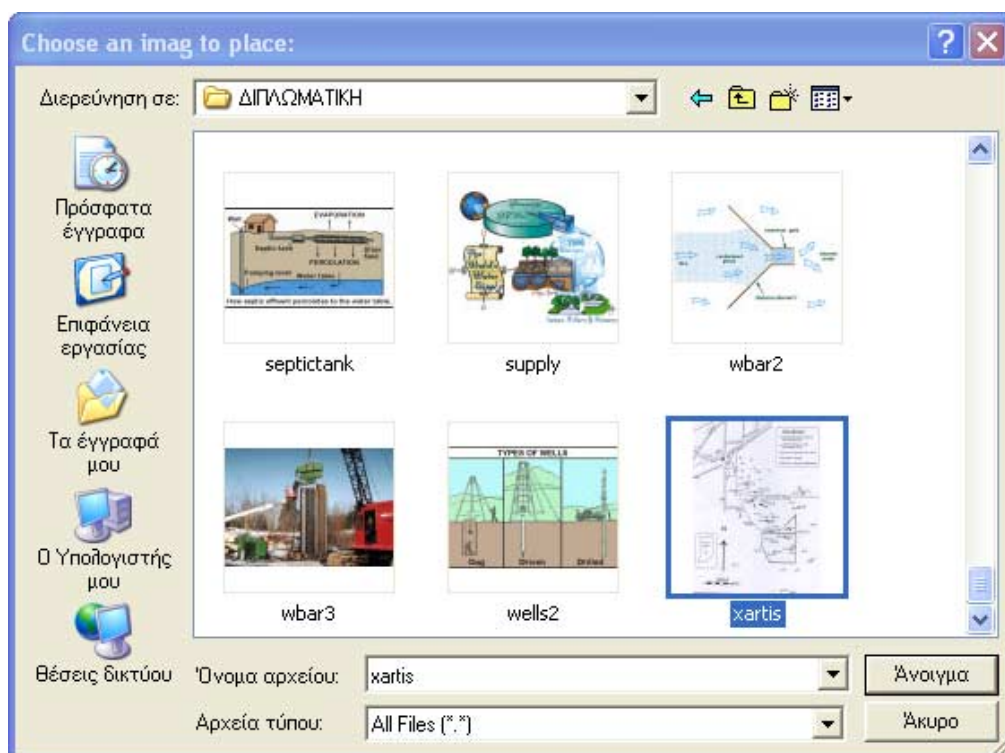
Εικόνα 12-3 Διαμόρφωση της εφαρμογής του PTC ‘PTC Configuration’, ‘Stresses’

Στην επιλογή ‘**Stresses**’ εισάγεται χρόνος προσομοίωσης 700 ημέρες (δύο χρόνια περίπου) και συνολικός αριθμός χρονικών βημάτων 1000 ώστε το κάθε βήμα να διαρκεί λιγότερο από 24 ώρες. Στη λίστα ‘**Graphs control**’ βάζουμε την τιμή 1000 έτσι ώστε τα output για τη ροή και τη μάζα να προκύπτουν μετά από 1000 χρονικά βήματα.

Στο επόμενο στάδιο θα εισάγουμε το χάρτη της περιοχής. Από τη λίστα των ‘**Layers**’ τσεκάρουμε το ‘**Maps**’ (Εικόνα 12-4) και από το μενού ‘**File**’ επιλέγουμε το ‘**Place Image**’. Τότε εμφανίζεται το παράθυρο της Εικόνα 12-5.

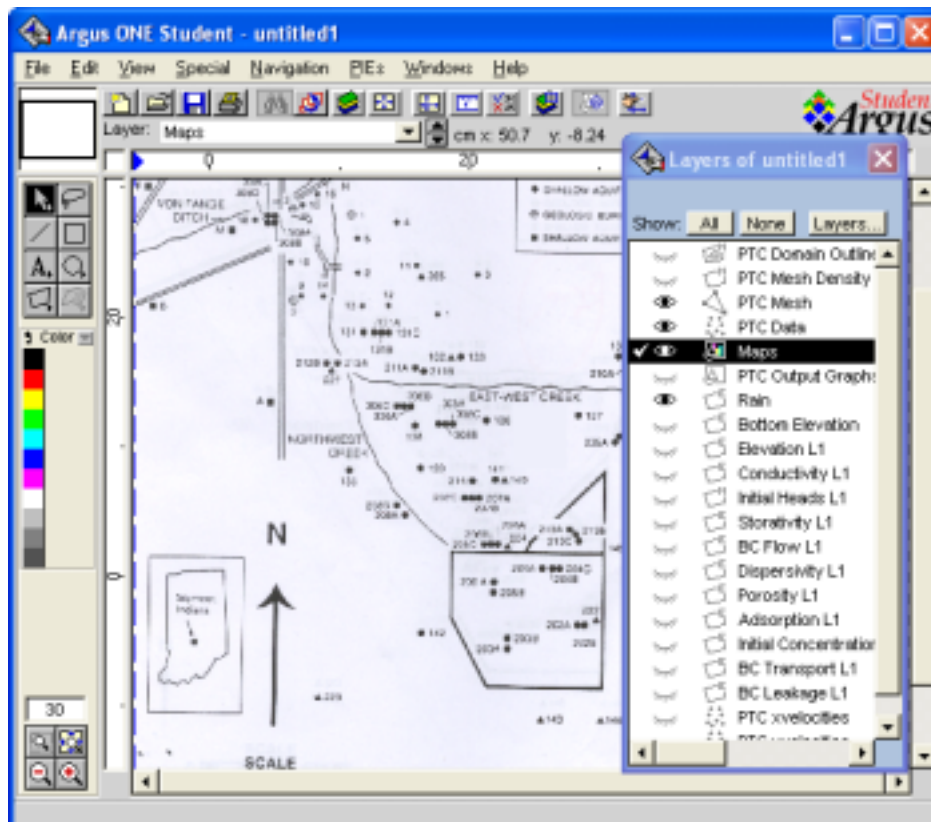


Εικόνα 12-4 Επίπεδο πληροφορίας ‘Layers’ - επιλογή ‘Maps’



Εικόνα 12-5 Εισαγωγή χάρτη περιοχής από αρχείο προέλευσης.

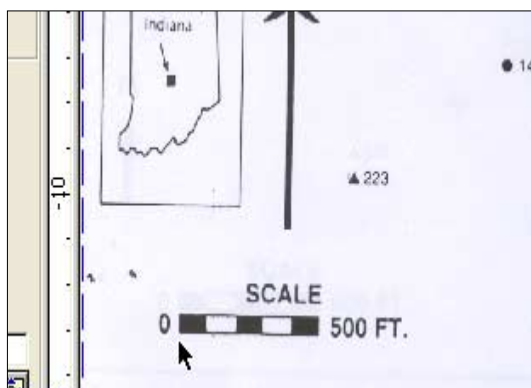
Αφού επιλέξουμε την εικόνα που θέλουμε να εισάγουμε και πατήσουμε **Άνοιγμα**, ο χάρτης έχει τοποθετηθεί στο **‘PTC Project’** όπως φαίνεται στην Εικόνα 12-6.



Εικόνα 12-6 Ο χάρτης της περιοχής στο **‘PTC Project’**

Απαραίτητο, βέβαια, είναι να καθορισθεί η μονάδα μήκους στην περιοχή σχεδίασης. Από το μενού **“Special / Scale and Units / Label unit as”** επιλέγεται ως μονάδα μήκους τα πόδια (ft). Οι υπόλοιπες επιλογές του παραθύρου αφήνονται ως έχουν.

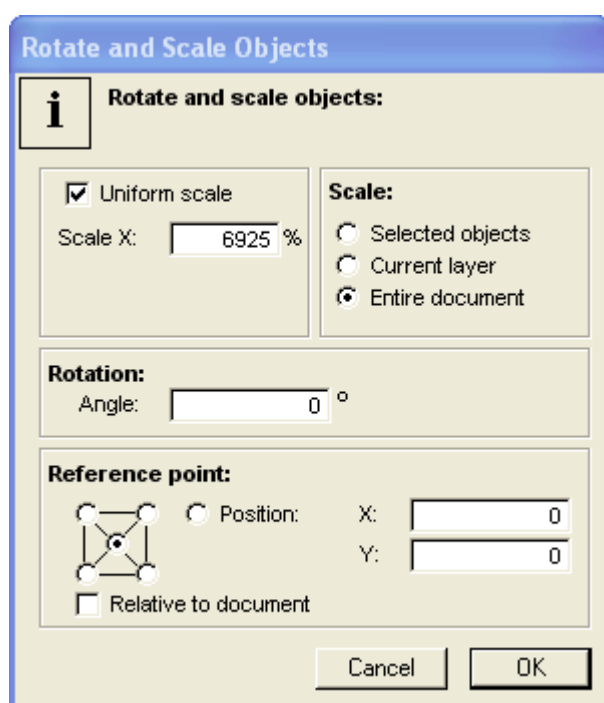
Επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός της κλίμακας της οθόνης ώστε να συμβαδίζει με αυτή του χάρτη. Στο κάτω αριστερό τμήμα του χάρτη υπάρχει γραφική κλίμακα, που δείχνει την αντιστοιχία 500 ποδιών της πραγματικότητας στο χάρτη. Τοποθετώντας τον κέρσορα στο αριστερό άκρο της κλίμακας παίρνουμε την ένδειξη -8,14 ft και -0,926 ft στο δεξί άκρο. Η διαφορά τους είναι 7,22 ft.



Εικόνα 12-7 Τοποθέτηση του κέρσορα στο αριστερό άκρο της κλίμακας

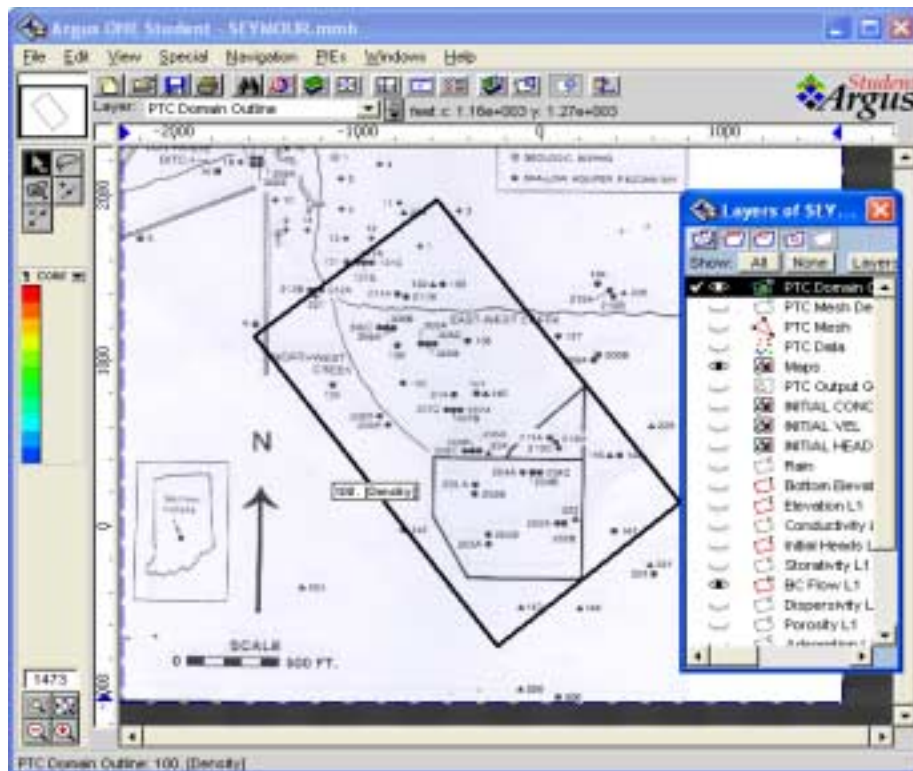
Άρα τα 7,22 ft στην οθόνη αντιστοιχούν σε 500 ft στην πραγματικότητα και για να αντιπροσωπεύει ο χάρτης της οθόνης πραγματικές συνθήκες πρέπει να πολλαπλασιαστεί με $\frac{500\text{ft}}{7.22\text{ft}} 100 = 6925 \%$.

Από το μενού “**Special / Rotate and Scale Objects**”, επιλέγεται ‘**Uniform scale**’ και ορίζεται η κλίμακα στον X άξονα ίση με 6925 % (Εικόνα 12-8).



Εικόνα 12-8 Ορισμός κλίμακας στον X άξονα

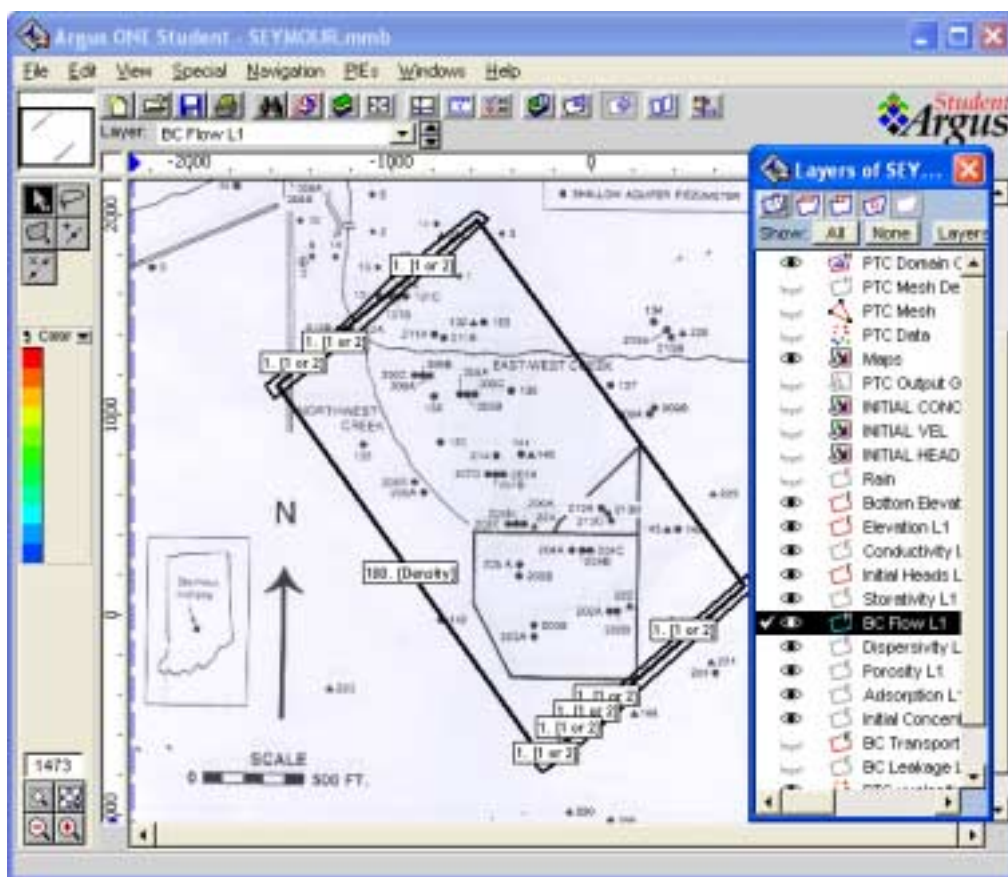
Στην συνέχεια για το σχεδιασμό της περιοχής της εφαρμογής ενεργοποιείται το **‘PTC Domain Outline layer’**. Από την αριστερή εργαλειοθήκη επιλέγεται το **‘Closed Geographic Tool’** και σχεδιάζεται η ορθογωνική περιοχή της προσομοίωσης (Εικόνα 12-9).



Εικόνα 12-9 Σχεδιασμός περιοχής προσομοίωσης

Μόλις κλείσει το ορθογώνιο εμφανίζεται το παράθυρο **‘Contour Information’** και εισάγεται η πυκνότητα του δικτύου ίση με 100.

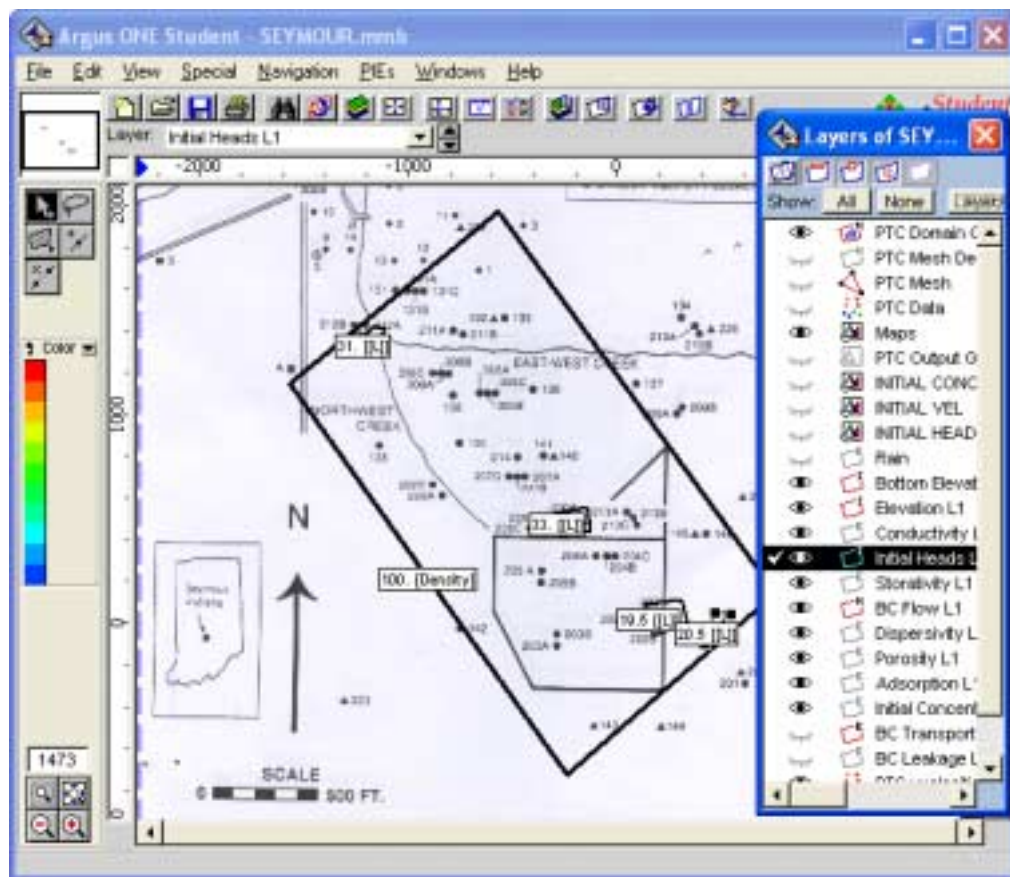
Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τον καθορισμό των οριακών συνθηκών ροής . Ενεργοποιείται από τη στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας **‘Layers’** το **“BC Flow L1 layer”**. Από την αριστερή εργαλειοθήκη επιλέγεται το **‘Closed Polygon Tool’** και περικλείονται οι περιοχές για τις οποίες θα ισχύουν οι αντίστοιχες οριακές συνθήκες. Μόλις κλείσει το ορθογώνιο που περικλείει τις περιοχές εμφανίζεται το παράθυρο **‘Contour Information’**. Στην παράμετρο **‘BC Type L1’** εισάγεται η τιμή 1 που αντιστοιχεί στο πρώτο είδος οριακών συνθηκών (σταθερό υδραυλικό ύψος). Στην παράμετρο **‘BC Stress1’** εισάγεται η τιμή του υδραυλικού ύψους.



Εικόνα 12-10 Εισαγωγή οριακών συνθηκών ροής

Από την εγκάρσια γεωλογική τομή της περιοχής προσομοίωσης Εικόνα 12-1 σελ.203, παίρνουμε τις τιμές των υδραυλικών υψών που θα εισαχθούν στο στάδιο αυτό ως οριακές συνθήκες ροής. Ως επίπεδο αναφοράς θεωρείται το οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στα πηγάδια 227 και 224. Σύμφωνα με αυτό, και με τα δεδομένα των υψών νερού στα ρηχά πηγάδια παρατήρησης οι οριακές συνθήκες που εισάγονται στο βόριο όριο της περιοχής προσομοίωσης είναι 32 ft στα δυο ακριανά τμήματα και 31ft στο μεσαίο τμήμα. Αντίστοιχα στο νότιο όριο τα ύψη είναι 34 , 35, 36, 37, 38 ft από νοτιοανατολικά προς νοτιοδυτικά.

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τον καθορισμό των αρχικών υδραυλικών υψών. Ενεργοποιείται από τη στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας ‘Layers’ το “Initial Heads L1”. Από την αριστερή εργαλειοθήκη επιλέγεται το ‘Closed Polygon Tool’ και περικλείονται οι περιοχές, γύρω από τα πηγάδια της τομής, για τις οποίες θα ισχύουν τα αντίστοιχα υδραυλικά ύψη (Εικόνα 12-11).

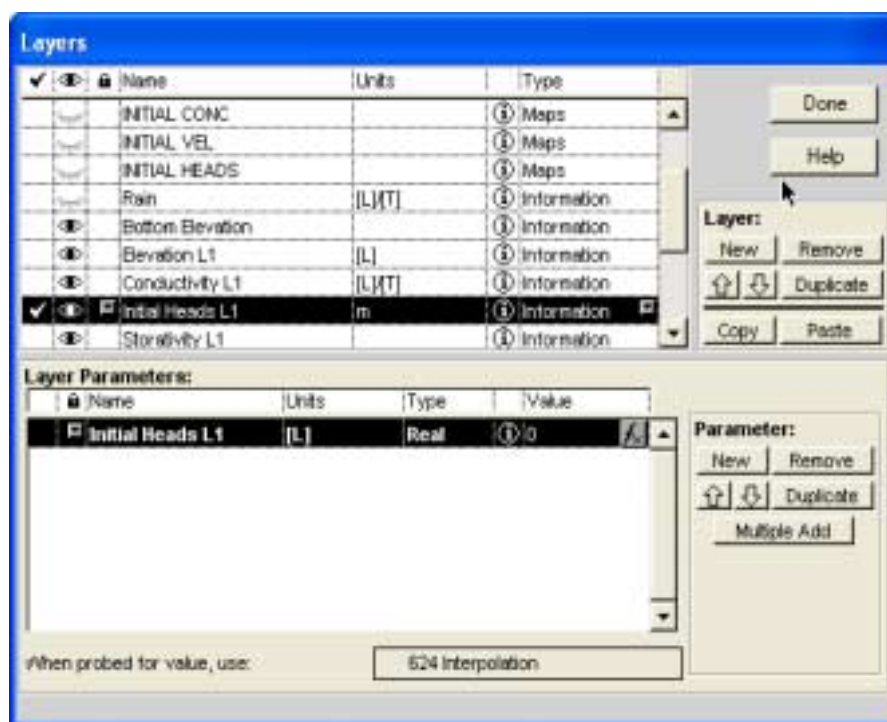


Εικόνα 12-11 Καθορισμός αρχικών υδραυλικών υψών

ΠΗΓΑΔΙ	ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΥΨΟΣ (ft)
227	31
224	33
222	19,5
147	20,5

Πίνακας 12-1 Δεδομένα πηγαδιών

Ενώ είναι ενεργοποιημένο από το ‘Layers’ το “Initial Heads L1”, επιλέγουμε από το ‘Show’ το Layers..., και εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο. Για να δοθούν τιμές αρχικών υδραυλικών υψών σε όλη την περιοχή από το μοντέλο επιλέγουμε από τις ‘Contour interpretation methods’ την ‘624 Interpolation’ (Εικόνα 12-12).

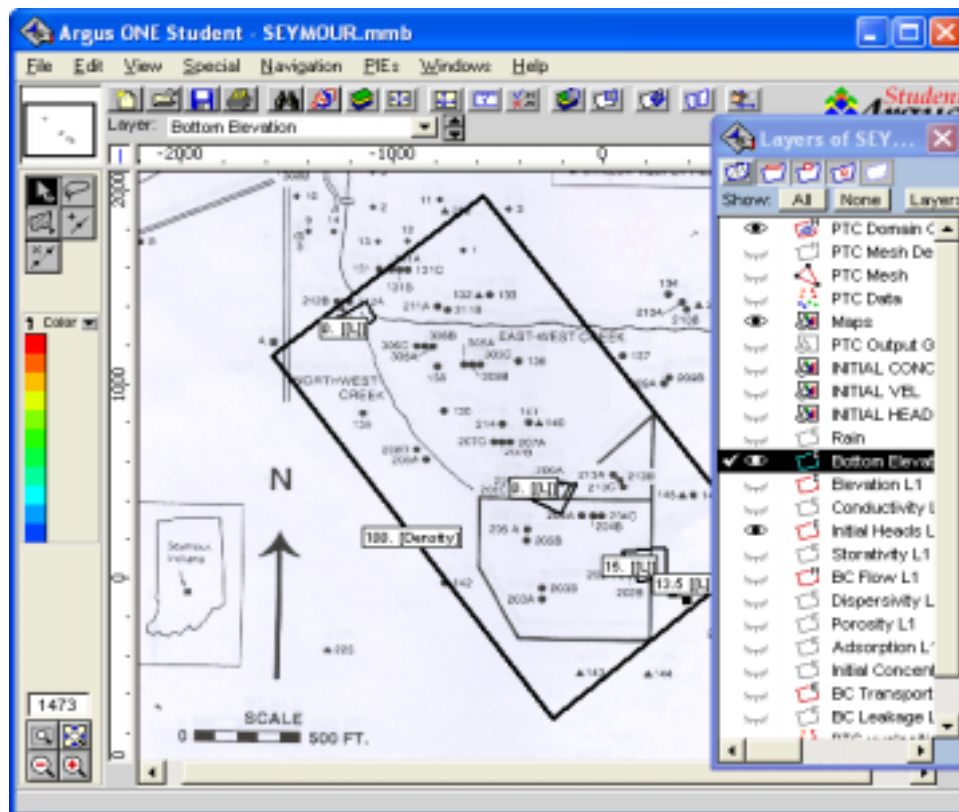


Εικόνα 12-12 Επιλογή από τις ‘**Contour interpretation methods**’ την ‘**624 Interpolation**’

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τον καθορισμό της ανύψωσης του πυθμένα της περιοχής. Ενεργοποιείται από τη στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας ‘**Layers**’ το “**Bottom Elevation L1**”. Από την αριστερή εργαλειοθήκη επιλέγεται το ‘**Closed Polygon Tool**’ και περικλείονται οι περιοχές, γύρω από τα πηγάδια της τομής, για τις οποίες θα ισχύουν τα αντίστοιχα δεδομένα (Εικόνα 12-13).

ΠΗΓΑΔΙ	ΑΝΥΨΩΣΗ ΠΥΘΜΕΝΑ (ft)
227	0
224	0
222	15
147	13,5

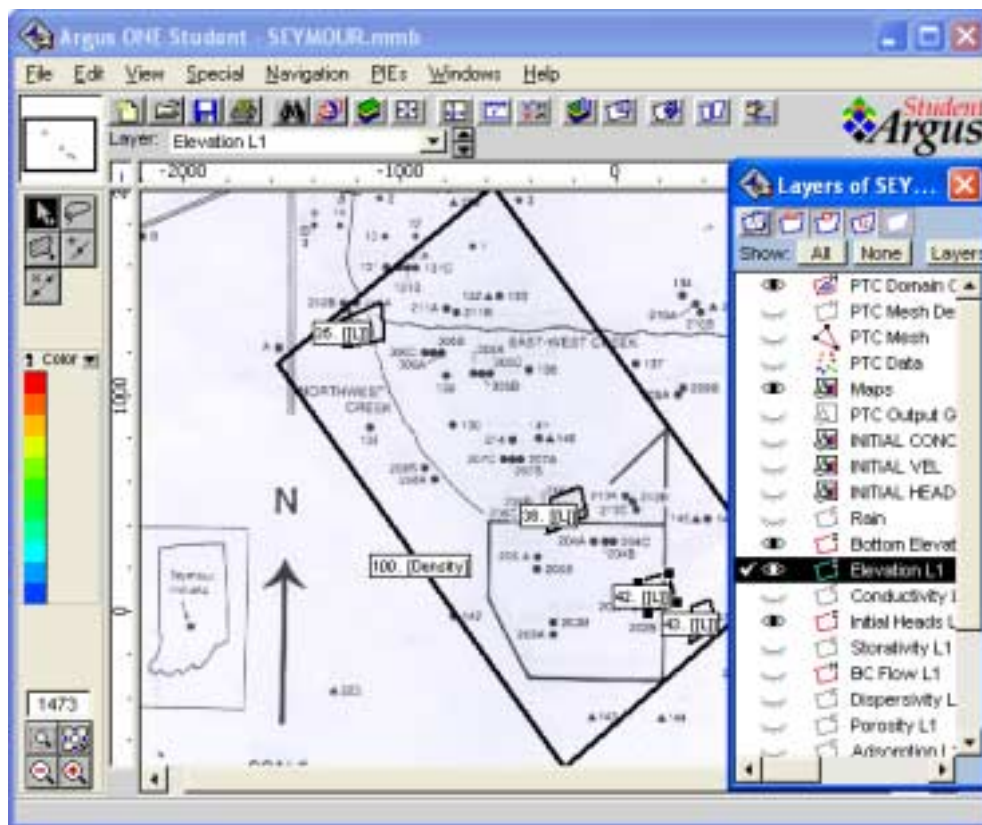
Πίνακας 12-2 Δεδομένα ανύψωσης πυθμένα



Εικόνα 12-13 Καθορισμός ανύψωσης πυθμένα

Ενώ είναι ενεργοποιημένο από το ‘Layers’ το “**Bottom Elevation L1**”, τσεκάρουμε από το ‘Show’ το Layers... και επιλέγουμε από τις ‘**Contour interpretation methods**’ την ‘**624 Interpolation**’ .

Για τον καθορισμό της ανύψωσης της επιφάνειας “ **Elevation L1**” του εδάφους ακολουθείται αντίστοιχη διαδικασία με αυτή περιγράφηκε για το “**Bottom Elevation L1**” Τα δεδομένα φαίνονται στην Εικόνα 12-14 και στον Πίνακα 12-3.

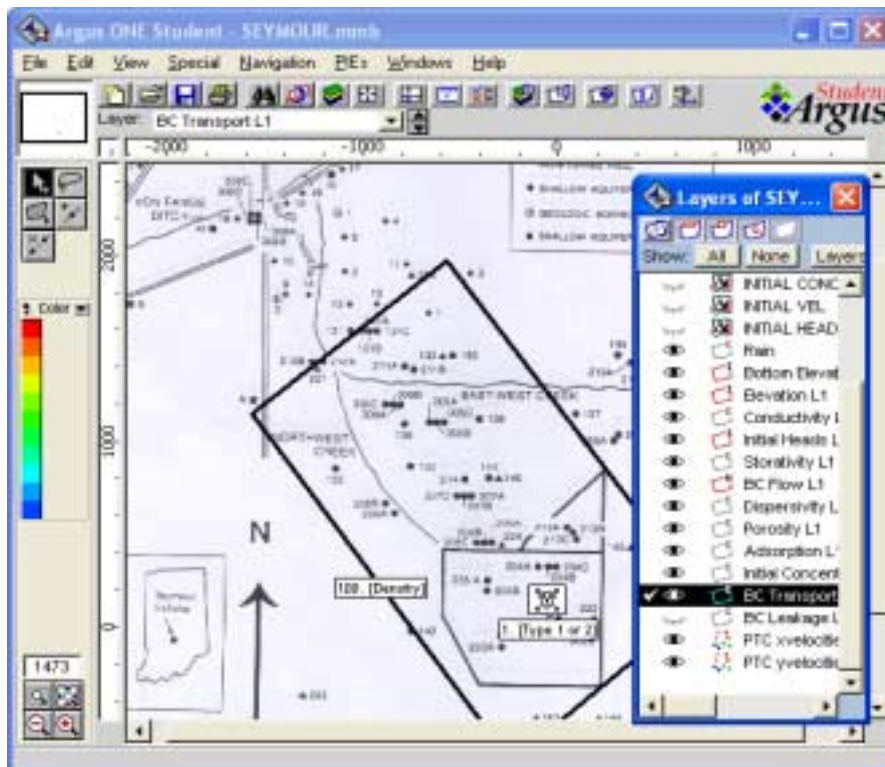


Εικόνα 12-14 Καθορισμός ανύψωσης επιφάνειας εδάφους

ΠΗΓΑΔΙ	ΑΝΥΨΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ (ft)
227	35
224	36
222	42
147	43

Πίνακας 12-3 Δεδομένα ανύψωσης επιφάνειας εδάφους.

Στη συνέχεια τοποθετείται η πηγή ρύπανσης στην περιοχή με την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε στα σενάρια του φανταστικού προβλήματος. Η θέση της πηγής φαίνεται στην Εικόνα 12-15. Στην παράμετρο **‘BC Type L1’** εισάγεται η τιμή 1 που αντιστοιχεί στο πρώτο είδος οριακών συνθηκών (σταθερή συγκέντρωση). Στην παράμετρο **‘BC Stress1’** εισάγεται η τιμή 1 που αντιστοιχεί σε συγκέντρωση ρυπαντή ίση με 1 gr / ft³.



Εικόνα 12-15 Τοποθέτηση πηγής ρύπανσης

Έπειτα θα εισαχθούν οι τιμές του πορώδους, την υδραυλικής αγωγιμότητας, της αποθηκευτικότητας, της βροχόπτωσης, της προσρόφησης και του συντελεστή διασποράς.

Επειδή ο υδροφορέας είναι ελεύθερος και αποτελείται από άμμο επιλέγονται οι παρακάτω τιμές.

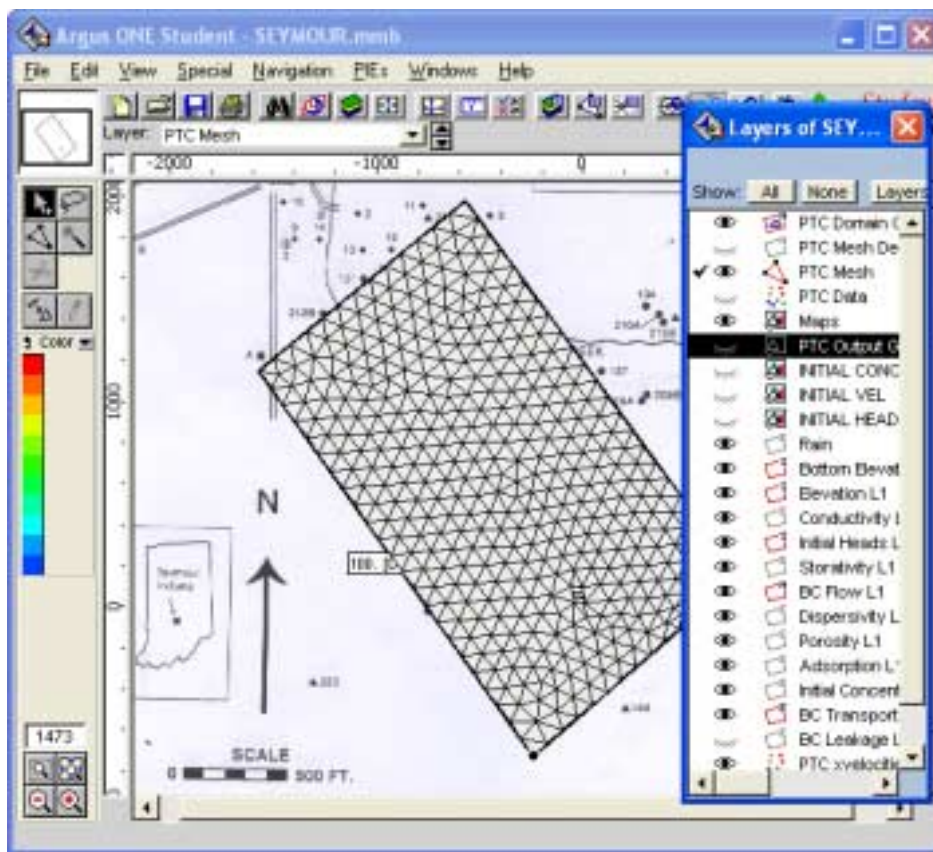
Porosity L1	0.35
Storativity L1	0.4
Initial Concentration L1 (gr / ft ³)	0
Rain * (ft / day)	0
Conductivity L1 x / y / z (ft / day)	283.5 / 283.5 / 28.35
Dispersivity L1 x / y / z (ft)	6.56 / 6.56 / 0.656
Adsorption L1 + x / y / z	0 / 0 / 0

Πίνακας 12-4 Χαρακτηριστικά του υδροφορέα
(Καρατζάς, 2002)

Στο επόμενο στάδιο δημιουργείται το δίκτυο των στοιχείων στην περιοχή της προσομοίωσης. Ενεργοποιείται από τη στήλη **‘Layers’** το **‘PTC Mesh’** και από την αριστερή εργαλειοθήκη διαλέγεται το **‘Magic wand tool’**. Πατώντας με το **‘Magic wand tool’** μέσα στην περιοχή μελέτης αυτόματα δημιουργείται το δίκτυο των στοιχείων (Εικόνα 12-16).

* Δεν υπάρχουν δεδομένα βροχόπτωσης στην περιοχή

+ Η προσρόφηση του BTEX σε αμμώδη εδάφη είναι μηδενική

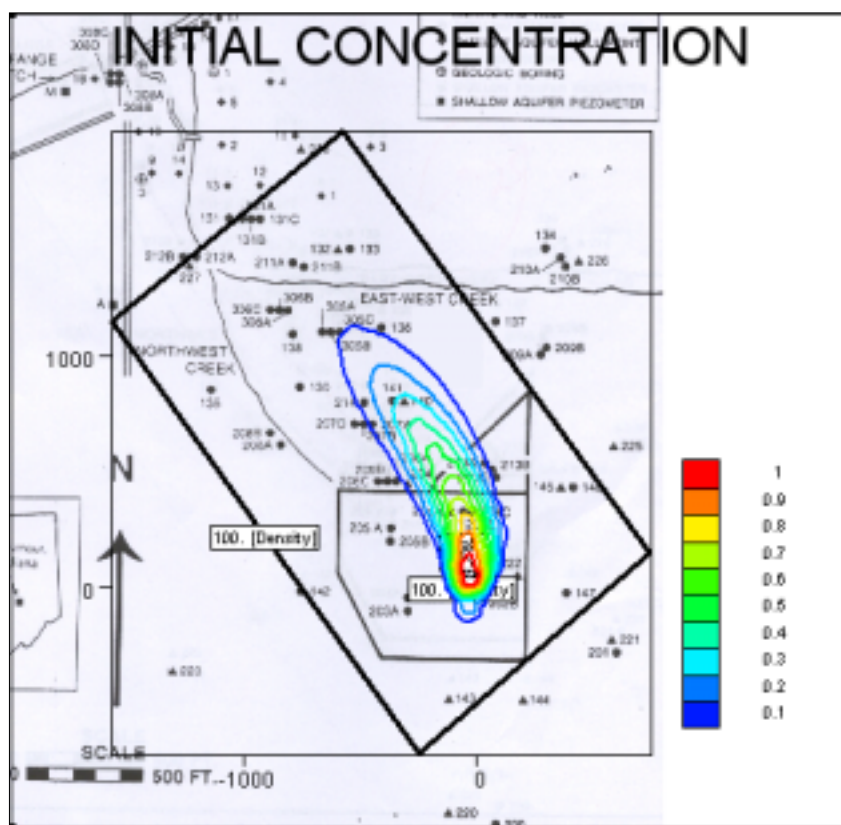


Εικόνα 12-16 Σχηματισμός δικτύου στοιχείων.

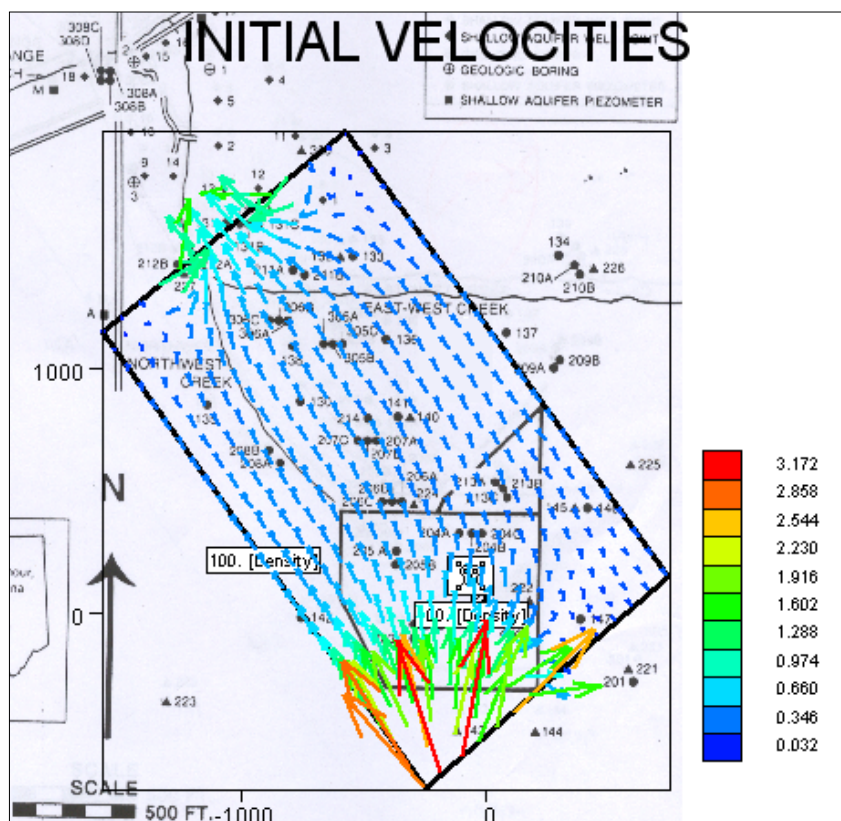
Μετά το σχηματισμό δικτύου στοιχείων, για την εξοικονόμηση μνήμης του ηλεκτρονικού υπολογιστή διαλέγεται από το μενού **‘Special’** το **‘Renumber’** και τσεκάρεται η επιλογή **‘Optimize Band Width’**

Τώρα είμαστε έτοιμοι να τρέξουμε το μοντέλο. Από το μενού **‘PIEs’** επιλέγεται το **‘Run PTC’** και ορίζεται η τοποθεσία αποθήκευσης και το όνομα των Output αρχείων.

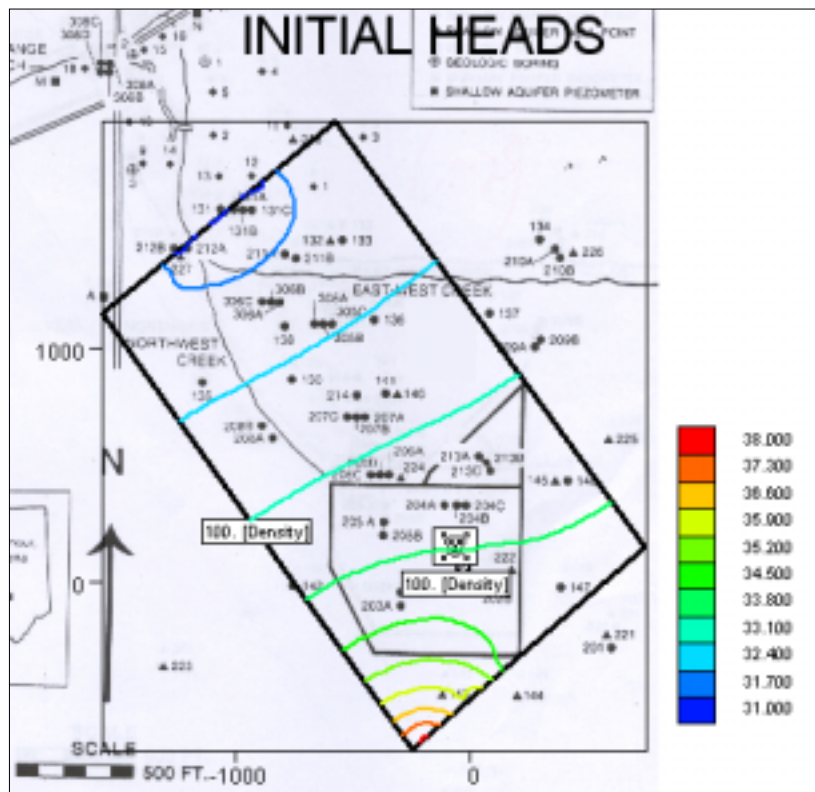
Αφού τρέξει επιτυχώς το μοντέλο θα απεικονιστούν γραφικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (υδραυλικά ύψη, συγκεντρώσεις , ταχύτητες). Τα γραφήματα που ακολουθούν δημιουργήθηκαν με την ίδια ακριβώς διαδικασία που περιγράφεται στο φανταστικό παράδειγμα.



Γράφημα 12-1 'Initial Concentrations' στην περιοχή Seymour



Γράφημα 12-2 'Initial Velocities' στην περιοχή Seymour



Γράφημα 12-3 'Initial Heads' στην περιοχή Seymour

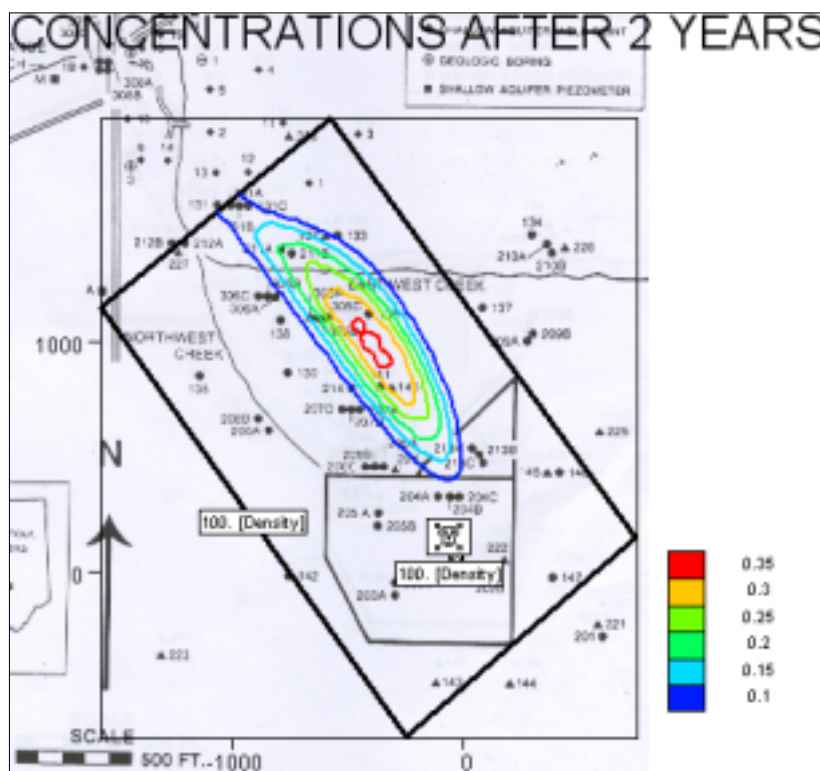
12.2.2 Προσομοίωση Κατάστασης Της Περιοχής Seymour Δυο Χρόνια Μετά Την Παύση Έκχυσης Ρύπων BTEX

Στο στάδιο αυτό, θα παρατηρηθεί η κατάσταση ρύπανσης της περιοχής δυο χρόνια μετά από την στιγμή που η πηγή σταμάτησε να ρυπαίνει την περιοχή χωρίς την εφαρμογή τεχνολογιών εξυγίανσης.

Ενεργοποιείται από τη στήλη των διάφορων επιπέδων πληροφορίας **'Layers'** το **"BC Transport L1 layer"**, τσεκάρεται η πηγή και εμφανίζεται το παράθυρο **'Contour Information'**. Στην παράμετρο **'BC Type L1'** εισάγεται η τιμή 2 που αντιστοιχεί στο δεύτερο είδος οριακών συνθηκών (σταθερός ρυθμός έκχυσης). Στην παράμετρο **'BC Stress1'** εισάγεται η τιμή 0 που αντιστοιχεί σε ρυθμό έκχυσης ρυπαντή ίση με 0 gr / ft³ ανά d.

Ως αρχικές συνθήκες υδραυλικών υψών **'Layers / Initial heads L1'** και συγκεντρώσεων **'Layers / Initial concentrations L1'** θα εισαχθούν τα αρχεία Output της πρώτης προσομοίωσης. Δηλαδή τα αρχεία **'SEYMOUR_heads_s1.fin'** και **'SEYMOUR_concs_s1.fin'**.

Σώζουμε το νέο σενάριο με διαφορετικό όνομα και αφού τρέξει, δημιουργούνται τα νέα αρχεία Output. Έπειτα δημιουργείται το διάγραμμα των συγκεντρώσεων με την μεθοδολογία που αναφέρθηκε παραπάνω

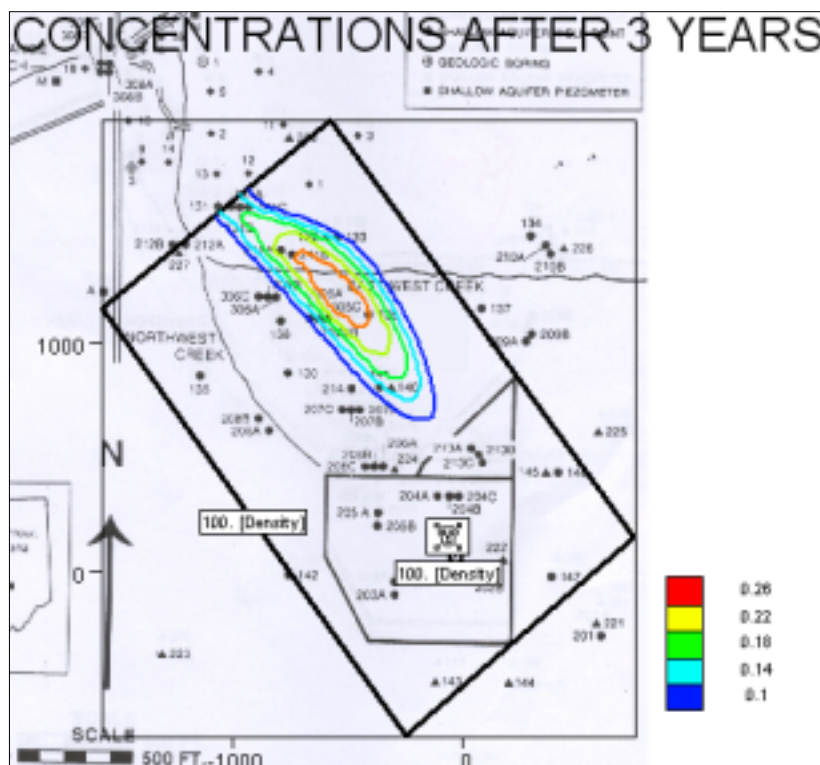


Γράφημα 12-4 ‘ Concentrations after 2 years’ στην περιοχή Seymour

12.2.3 Προσομοίωση Κατάστασης Της Περιοχής Seymour Τρία Χρόνια Μετά Την Παύση Έκχυσης Ρύπων BTEX

Στο σενάριο αυτό, θα παρατηρηθεί η κατάσταση ρύπανσης της περιοχής τρία χρόνια μετά από την στιγμή που η πηγή σταμάτησε να ρυπαίνει την περιοχή χωρίς την εφαρμογή τεχνολογιών εξυγίανσης.

Η μόνη αλλαγή στο σενάριο αυτό είναι ο χρόνος προσομοίωσης που γίνεται 1000 ημέρες ,τα χρονικά βήματα και οι τιμές των Output Graphs που γίνονται 1500.



Γράφημα 12-5 'Concentrations after 3 years' στην περιοχή Seymour

12.2.4 Κατάσταση Περιοχής Μετά Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή Με Την Εφαρμογή Της Τεχνολογίας Εξυγίανσης «Συγκλίνοντα Φράγματα Και Δίοδος» Σε Ευθεία Διάταξη

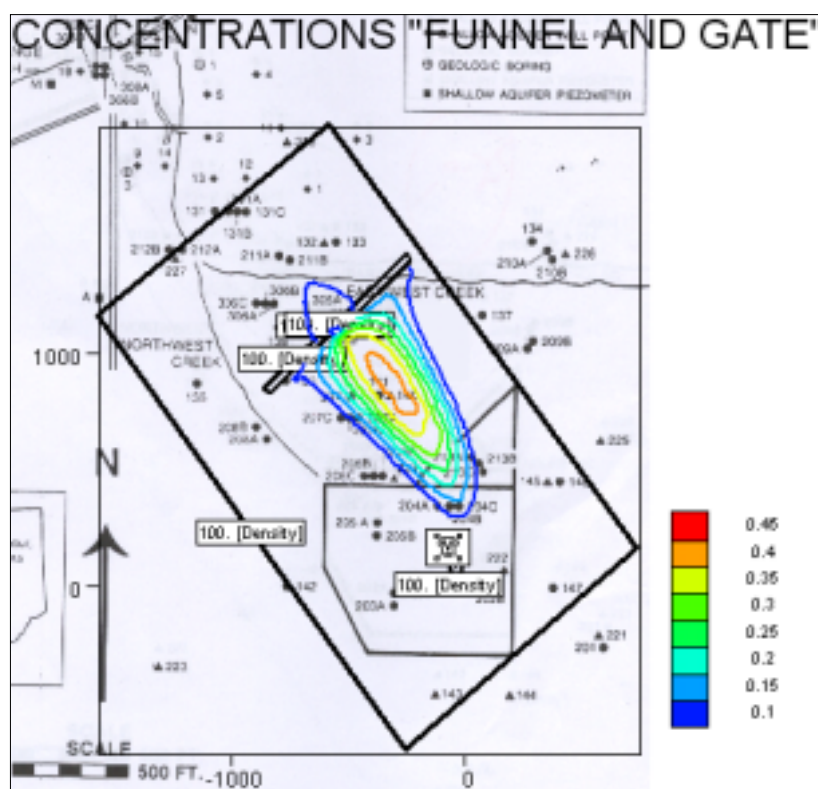
1. 'ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΣΕ ΕΥΘΕΙΑ ΚΑΙ ΔΙΟΔΟΣ' , ΔΥΟ ΧΡΟΝΙΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ

Στο στάδιο αυτό, θα παρατηρηθεί η κατάσταση ρύπανσης της περιοχής δυο χρόνια (700 ημέρες) μετά από την στιγμή που η πηγή σταμάτησε να ρυπαίνει την περιοχή με την εφαρμογή της τεχνολογίας εξυγίανσης «Συγκλίνοντα φράγματα και δίοδος».

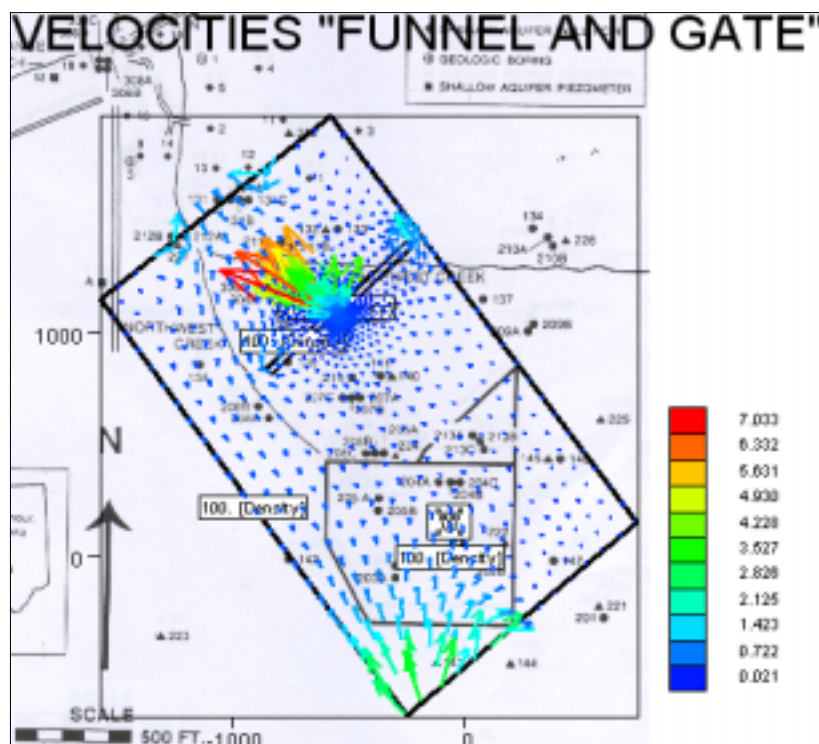
Η διαδικασία εισαγωγής των *Funnel and Gate* στο μοντέλο και δημιουργία των γραφημάτων είναι η ίδια με αυτή του φανταστικού παραδείγματος. Το σύστημα τοποθετείται στο πιο απομακρυσμένο σημείο όπου είχε φτά-

σει το πλούμιο του BTEX, δηλαδή στα ρηχά πηγάδια παρατήρησης 305 A,B,C. Γράφημα 12-1, σελ 220. Στην περίπτωση αυτή το μήκος των αδιαπέρατων τοίχων είναι περίπου 400 ft ο καθένας ,και η διάσταση της διόδου κάθετα στη ροή είναι περίπου 60 ft. Η απόδοση επεξεργασίας της διόδου ορίζεται 90%.

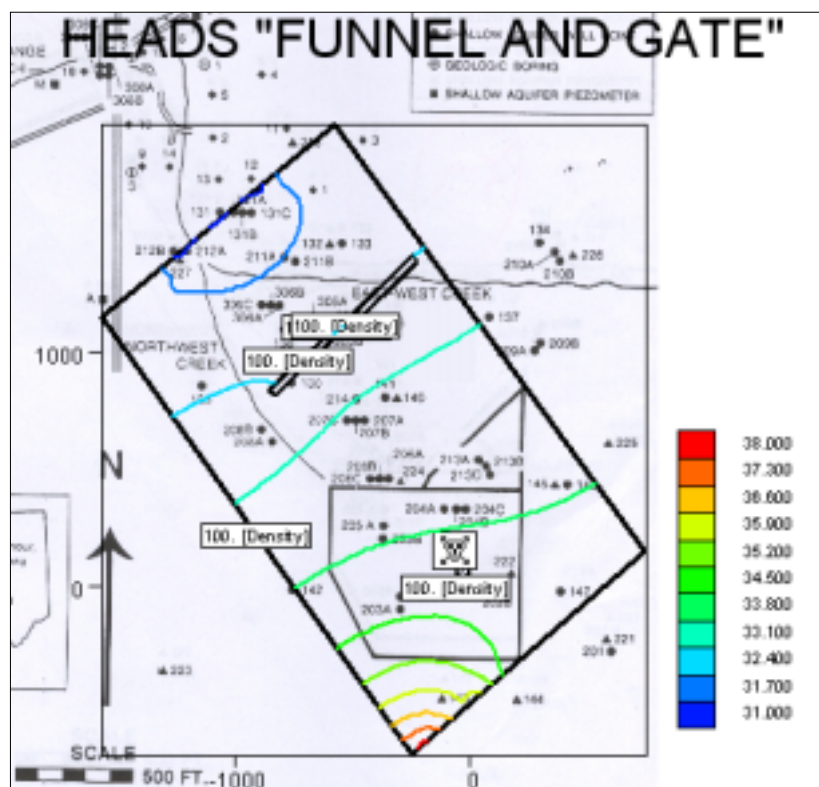
Στα γραφήματα που ακολουθούν φαίνονται οι αλλαγές που έχουν επέλθει στις συγκεντρώσεις, στις ταχύτητες και στα υδραυλικά ύψη της περιοχής λόγω της τεχνολογίας εξυγίανσης «Συγκλίνοντα Φράγματα και Δίοδος»



Γράφημα 12-6 ‘Concentrations ‘F & G’ μετά από 2 χρόνια’



Γράφημα 12-7 'Velocities 'F & G' μετά από 2 χρόνια'

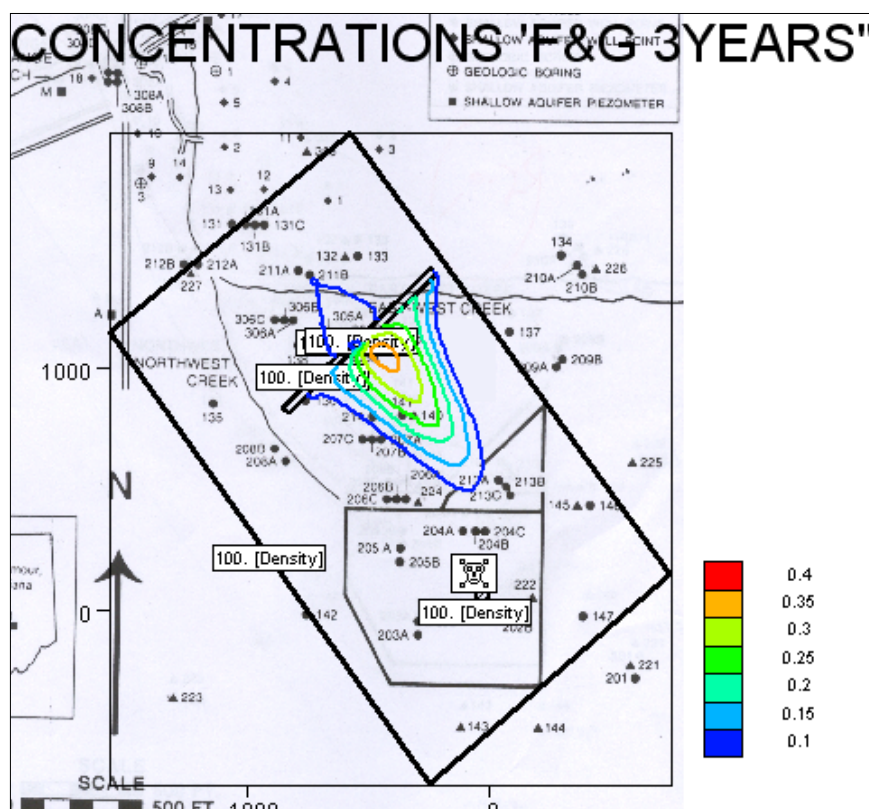


Γράφημα 12-8 'Heads 'F & G' μετά από 2 χρόνια'

2. 'ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΣΕ ΕΥΘΕΙΑ ΚΑΙ ΔΙΟΔΟΣ' , ΤΡΙΑ ΧΡΟΝΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Στο σενάριο αυτό, θα παρατηρηθεί η κατάσταση ρύπανσης της περιοχής τρία χρόνια (1000 ημέρες) μετά από την στιγμή που η πηγή σταμάτησε να ρυπαίνει την περιοχή με την εφαρμογή της τεχνολογίας εξυγίανσης «Συγκλίνοντα φράγματα και δίοδος».

Αυτό που αλλάζει στο παρόν σενάριο είναι ο χρόνος προσομοίωσης που γίνεται 1000 ημέρες, τα χρονικά βήματα και οι τιμές των Output Graphs που γίνονται 1500.

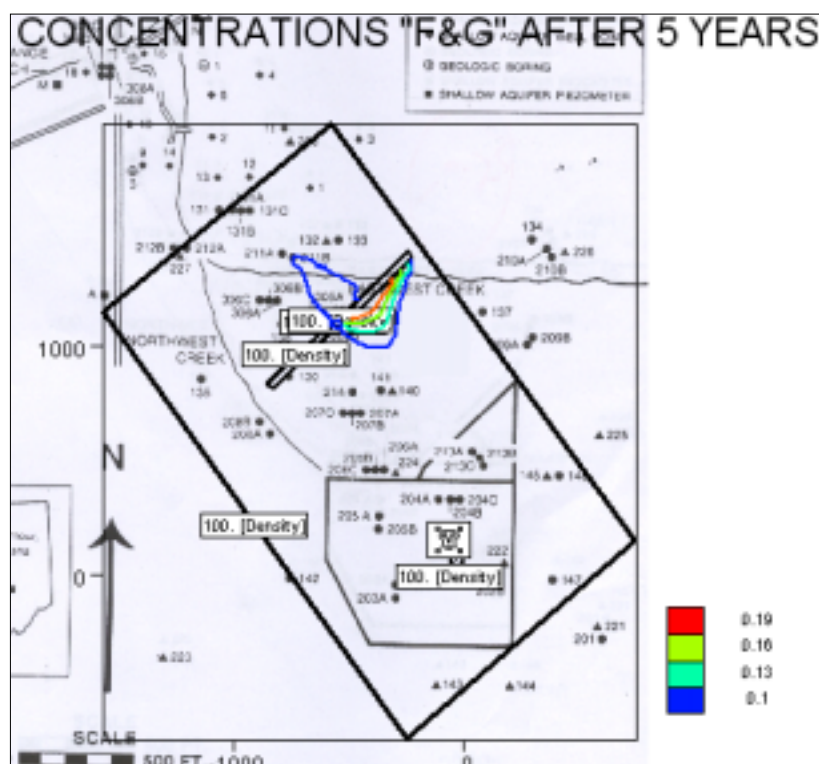


Γράφημα 12-9 'Concentrations 'F & G' μετά από 3 χρόνια'

3. 'ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΣΕ ΕΥΘΕΙΑ ΚΑΙ ΔΙΟΔΟΣ' , ΠΕΝΤΕ ΧΡΟΝΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Το σενάριο αυτό γίνεται για να παρατηρηθεί η κατανομή των ρύπων BTEX πέντε χρόνια (1700 ημέρες) μετά από την στιγμή που η πηγή σταμάτησε να ρυπαίνει την περιοχή, με την εφαρμογή της τεχνολογίας εξυγίανσης «Συγκλίνοντα φράγματα και δίοδος».

Ο χρόνος προσομοίωσης γίνεται 1700 ημέρες ,τα χρονικά βήματα και οι τιμές των Output Graphs 2000.



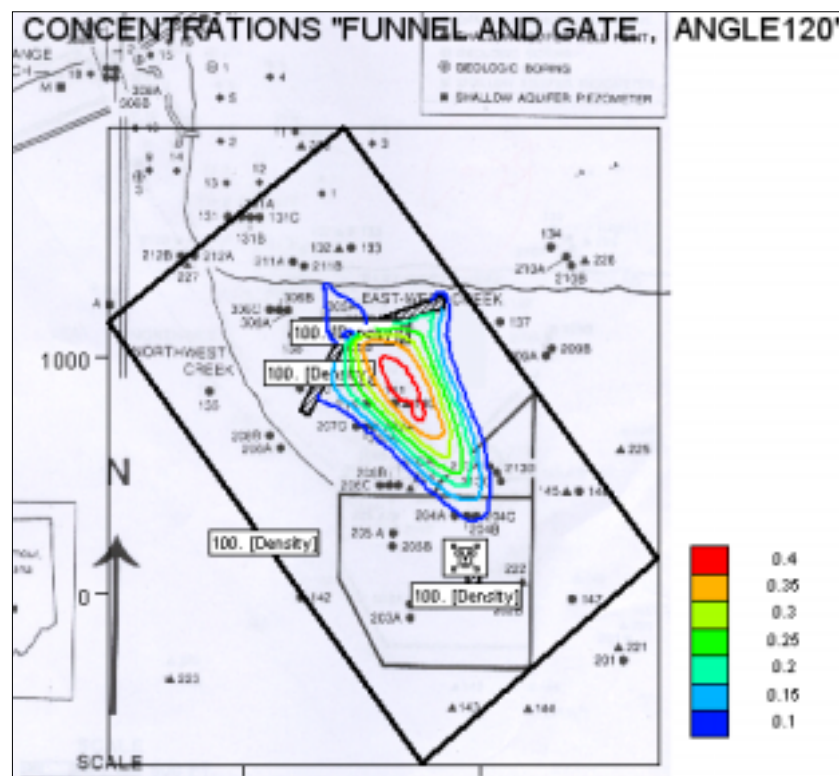
Γράφημα 12-10 'Concentrations 'F & G' μετά από 5 χρόνια'

4. 'ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΣΕ ΕΥΘΕΙΑ ΚΑΙ ΔΙΟΔΟΣ' , ΕΠΤΑ ΧΡΟΝΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

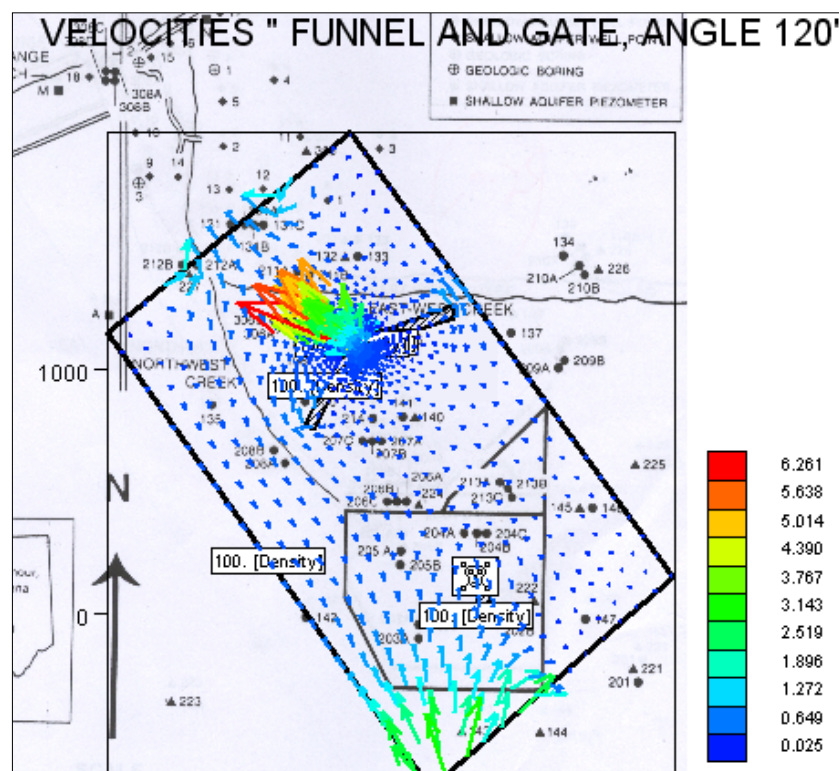
Τέλος θα παρατηρηθεί η κατανομή του ρυπασμένου πλουμίου επτά χρόνια (2400 ημέρες) μετά από την στιγμή που η πηγή σταμάτησε την έκχυση ρύπων στην περιοχή, με την εφαρμογή της τεχνολογίας εξυγίανσης «Συγκλίνοντα φράγματα και δίοδος».

Ο χρόνος προσομοίωσης γίνεται 2400 ημέρες ,τα χρονικά βήματα και οι τιμές των Output Graphs 2500.

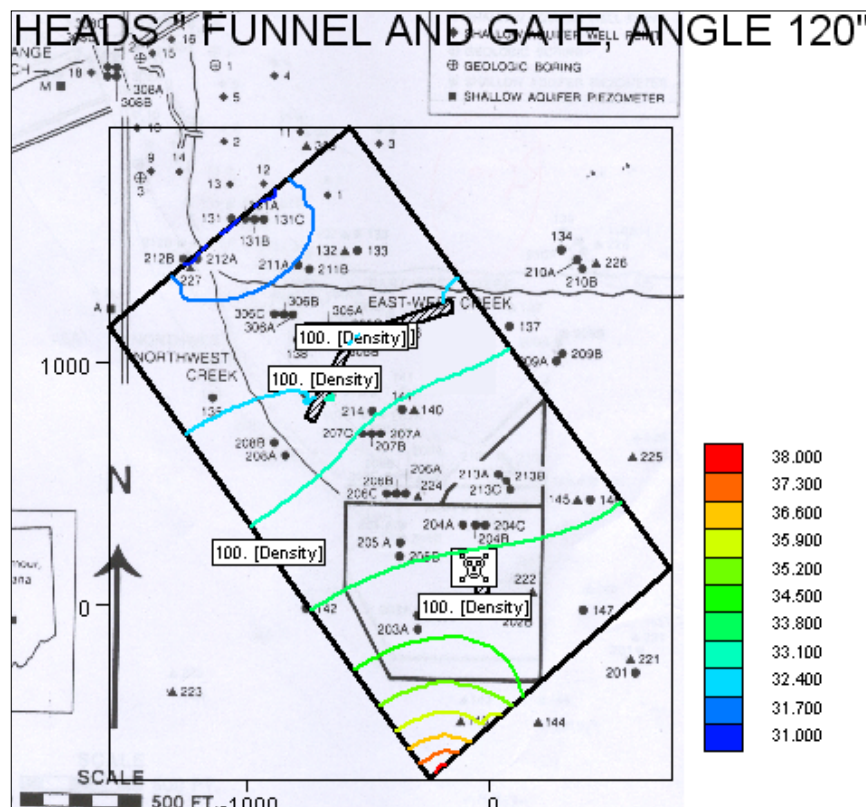
Τα γραφήματα που ακολουθούν δείχνουν τις συγκεντρώσεις, τις ταχύτητες και τα υδραυλικά ύψη της περιοχής στη νέα κατάσταση.



Γράφημα 12-12 'Concentrations 'F & G' με γωνία μετά από 2 χρόνια'



Γράφημα 12-13 'Velocities 'F & G' με γωνία μετά από 2 χρόνια'

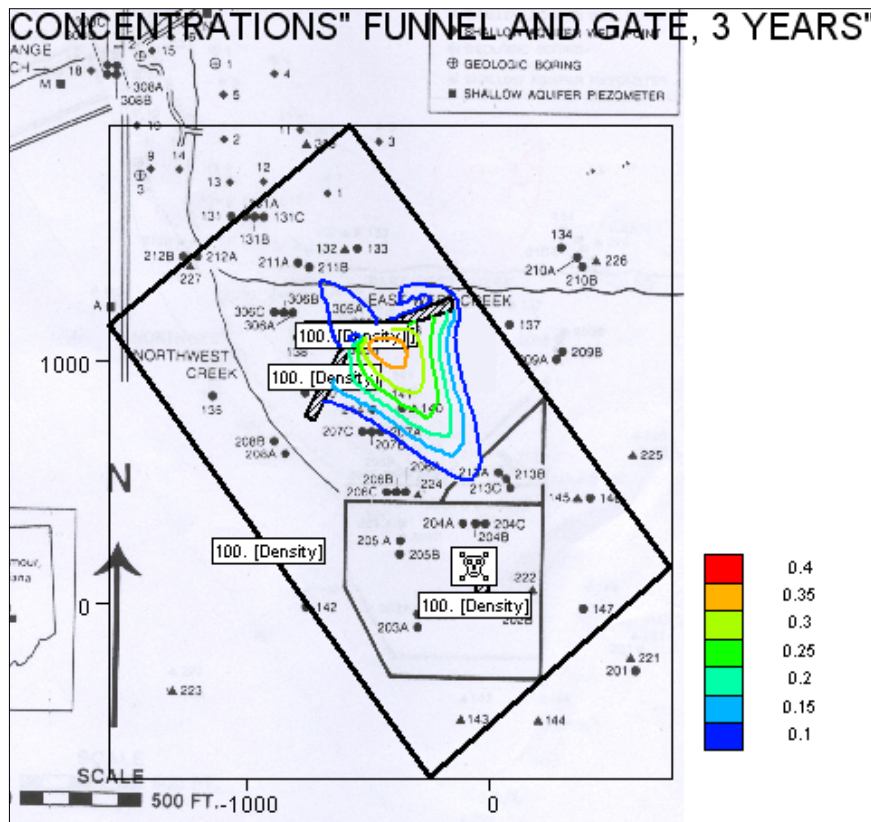


Γράφημα 12-14 'Heads 'F & G' με γωνία μετά από 2 χρόνια'

2. 'ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΜΕ ΓΩΝΙΑ ΚΑΙ ΔΙΟΔΟ', ΤΡΙΑ ΧΡΟΝΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Στην περίπτωση αυτή, θα παρατηρηθεί η κατάσταση ρύπανσης της περιοχής τρία χρόνια (1000 ημέρες) μετά από την στιγμή που η πηγή σταμάτησε να ρυπαίνει την περιοχή με την εφαρμογή της τεχνολογίας εξυγίανσης «Συγκλίνοντα φράγματα και δίοδος» σε γωνία 120 μοιρών.

Αυτό που αλλάζει στο παρόν σενάριο είναι ο χρόνος προσομοίωσης που γίνεται 1000 ημέρες, τα χρονικά βήματα και οι τιμές των Output Graphs που γίνονται 1500.

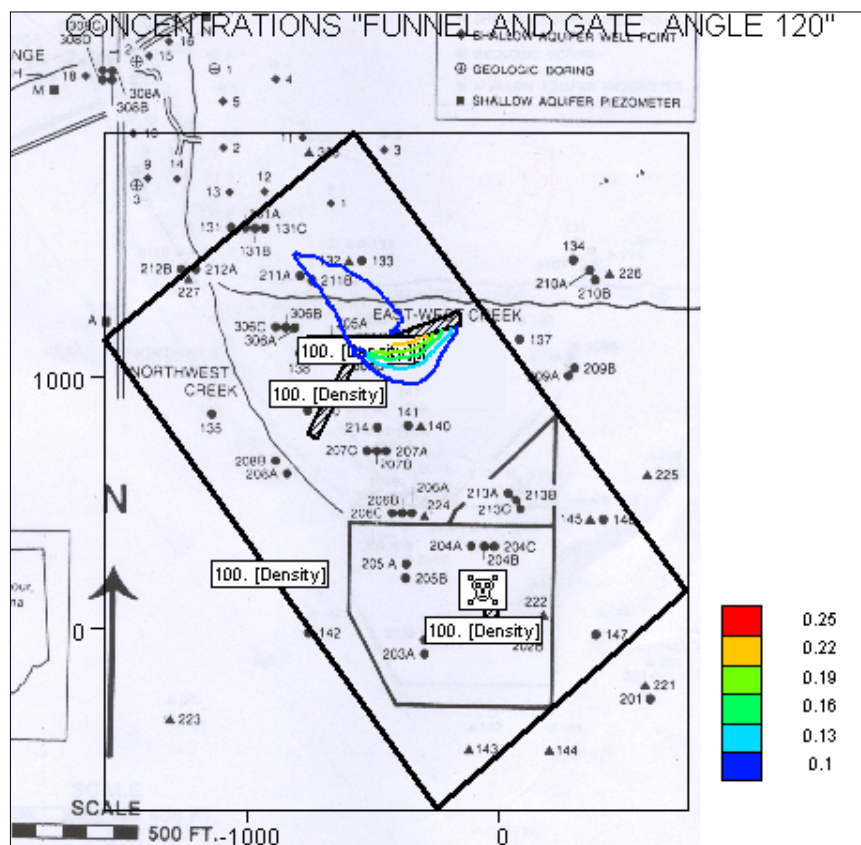


Γράφημα 12-15 'Concentrations 'F & G' με γωνία μετά από 3 χρόνια'

3. 'ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΜΕ ΓΩΝΙΑ ΚΑΙ ΔΙΟΔΟ', ΠΕΝΤΕ ΧΡΟΝΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Τέλος θα παρατηρηθεί η κατανομή του ρυπασμένου πλουμίου πέντε χρόνια (1700 ημέρες) μετά από την στιγμή που η πηγή σταμάτησε την έκχυση ρύπων στην περιοχή, με την εφαρμογή της τεχνολογίας εξυγίανσης «Συγκλίνοντα φράγματα και δίοδος».

Ο χρόνος προσομοίωσης γίνεται 1700 ημέρες ,τα χρονικά βήματα και οι τιμές των Output Graphs 2000.



Γράφημα 12-16 'Concentrations 'F & G' με γωνία μετά από 5 χρόνια'

12.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΔΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ SEYMOUR.

Στο **Σενάριο 12.2.1** προσομοιώθηκε η ροή του υπογείου νερού και η ρύπανση στην περιοχή Seymour εξαιτίας της έκχυσης υδρογονανθράκων πετρελαίου BTEX για διάστημα δυο χρόνων.

Από τα γραφήματα που δημιουργήθηκαν από το μοντέλο Argus One παρατηρούμε πως οι ταχύτητες ροής του υπογείου ύδατος (Γράφημα 12-2, σελ 219) κυμαίνονται από 0,032 – 3.172 ft/d , αλλά στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής επικρατούν ταχύτητες της τάξεως 0,5 ft/d. Από το Γράφημα 12-3, σελ 220 των υδραυλικών υψών φαίνεται ότι αυτά κυμαίνονται από 38 ft στο νοτιο-δυτικό τμήμα της περιοχής μέχρι 31 ft στο βόριο τμήμα. Οι ταχύτητες του ύδατος στην περιοχή εμφανίζουν σχετικά μικρές τιμές εξαιτίας αυτής της μικρής διαφοράς των υδραυλικών υψών. Όσον αφορά την κατανομή του BTEX στην περιοχή (Γράφημα 12-1, σελ 219) παρατηρείται πως το ρυπασμένο πλούμιο στο διάστημα αυτό έχει φτάσει μέχρι τα ρηχά πηγάδια παρατήρησης 305 A,B,C με συγκέντρωση το 10% της αρχικής. Η περιοχή ανάμεσα στην πηγή και το σημείο αυτό έχει συγκεντρώσεις BTEX από 10% έως 100% της αρχικής συγκέντρωσης. Η μέγιστη τιμή εμφανίζεται μόνο στην πηγή.

Στα **Σενάρια 12.2.2 και 12.2.3** προσομοιώθηκε η κατάσταση ρύπανσης στην περιοχή δύο και τρία χρόνια αντίστοιχα , από τη στιγμή που σταμάτησε η έκχυση BTEX από την πηγή ρύπανσης. Από το Γράφημα 12-4, σελ 221 και Γράφημα 12-5, σελ 222 παρατηρούμε πως το πλούμιο του BTEX μετακινείται προς το Βορρά ρυπαίνοντας έτσι το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μέγιστες συγκεντρώσεις είναι μικρότερες της αρχικής λόγω της υδροδυναμικής διασποράς και της συμμεταφοράς, φαινόμενα που κατανέμουν τους ρύπους σε μεγαλύτερη επιφάνεια.

Στο **Σενάριο 12.2.4** προσομοιώθηκε η ροή του υπογείου νερού και η ρύπανση στην περιοχή Seymour μετά από την στιγμή που η πηγή σταμάτησε

να ρυπαίνει την περιοχή και με την εφαρμογή της τεχνολογίας εξυγίανσης «Συγκλίνοντα φράγματα και δίοδος». Στην νέα κατάσταση αυτή εμφανίζονται ελάχιστες διαφορές στα υδραυλικά ύψη του υδροφορέα. Οι ταχύτητες της γενικότερης περιοχής αλλάζουν ελάχιστα. Σημαντική αύξηση όμως στην ταχύτητα του υπογείου νερού σημειώνεται στη Δίοδο επεξεργασίας. Στο σημείο αυτό οι ταχύτητες κυμαίνονται από 2 έως 7 ft/d με επικρατούσες αυτές των 5 ft/d. Γράφημα 12-7, σελ 224.

Το σενάριο αυτό, περιλαμβάνει τέσσερα υποσενάρια στα οποία εξετάζεται η κατάσταση της περιοχής μετά από 2, 3, 5 και 7 χρόνια μετά από τη στιγμή που σταμάτησε η έκχυση των ρυπαντών.

Με την εγκατάσταση αυτού του συστήματος εξυγίανσης, εξαναγκάζεται όλο το ρυπασμένο πλούμιο να διέλθει από τη Δίοδο και να υποστεί επεξεργασία. Έτσι εμποδίζεται η μετανάστευση του πλουμίου του BTEX κατάντη του συστήματος και ταυτόχρονα εξυγιαίνεται σταδιακά η περιοχή στα ανάντη. Σε διάστημα επτά χρόνων (Γράφημα 12-11, σελ 227), η περιοχή στα ανάντη του Φράγματος έχει εξυγιανθεί πλήρως και στα κατάντη εντοπίζονται συγκεντρώσεις BTEX μικρότερες από το 10 % της αρχικής. Επιβεβαιώνονται με αυτό τον τρόπο τα συμπεράσματα που είχαν εξαχθεί από τη μελέτη του φανταστικού παραδείγματος δηλαδή η επιλογή της διάταξης σε ευθεία ως βέλτιστη λύση για τις συνθήκες που επικρατούν στη περιοχή.

Στο **Σενάριο 12.2.5** προσομοιώθηκε η ροή του υπογείου νερού και η ρύπανση στην περιοχή Seymour με την εγκατάσταση αδιαπέρατων φραγμάτων γωνίας 120 μοιρών και δίοδου. Το σημείο εγκατάστασης και οι διαστάσεις του συστήματος είναι ίδια με την περίπτωση της διάταξης σε ευθεία.

Τα υδραυλικά ύψη στον υδροφορέα δεν αλλάζουν όπως και στα προηγούμενα σενάρια (Γράφημα 12-14, σελ 229). Οι ταχύτητες στη περιοχή έχουν σχεδόν τις ίδιες τιμές με αυτές πριν από την εγκατάσταση του συστήματος (Γράφημα 12-13, σελ 228). Αν συγκριθούν οι ταχύτητες στα δύο είδη διατάξεων παρατηρούμε ότι οι ταχύτητες στη δίοδο στα φράγματα με γωνία είναι λίγο μικρότερες γιατί η ζώνη εγκλεισμού του φράγματος είναι μικρότερη και υπάρχει σημαντική ροή του ύδατος από τα άκρα του φράγματος και ιδιαίτερα από

το βορειοανατολικό. Έτσι εξηγείται και η κίνηση τμήματος του ρυπασμένου πλουμίου γύρω από το φράγμα (Γράφημα 12-12, σελ 228).

Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση που αφορούν τις συγκεντρώσεις του BTEX δείχνουν ότι η διάταξη αυτή δεν είναι κατάλληλη για την εξυγίανση της συγκεκριμένης περιοχής. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν διέρχεται όλο το ρυπασμένο πλούμιο μέσα από τη δίοδο. Όπως είχε φανεί και από τη μελέτη του φανταστικού παραδείγματος, ίδια αποτελέσματα εξυγίανσης (με τη διάταξη σε ευθεία) επιτυγχάνονται με την εγκατάσταση αδιαπέρατων τοίχων, σε γωνία 120 μοιρών, μεγαλύτερου μήκους. Μεγαλύτερο μήκος συνεπάγεται όμως με μεγαλύτερο κόστος του συστήματος.

13. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ SEYMOUR

13.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΡΥΠΑΣΜΕΝΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗ ΔΙΟΔΟ (ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟ BOWLES M.W 1997)

Ο χρόνος συγκράτησης θα υπολογιστεί από τη σχέση:

$$Q = \frac{V_{Gate}}{\tau}$$

Αρχικά θα πρέπει να εκτιμηθεί η παροχή που αναμένεται να περάσει μέσα από τη δίοδο. Η παροχή αυτή δίνεται ως το γινόμενο που ακολουθεί:

$$Q = K i A$$

όπου:

- A: το εμβαδόν που αντιστοιχεί στην κάθετη διατομή του φράγματος και υπολογίζεται από το πλάτος του φράγματος πολλαπλασιαζόμενο με το βάθος του υδροφορέα στο σημείο αυτό.
- K: η υδραυλική αγωγιμότητα της περιοχής
- i: η μέση οριζόντια υδραυλική κλίση της περιοχής
- V_{Gate} : ο όγκος της διόδου
- τ : ο χρόνος συγκράτησης

Η τιμή του i θα προκύψει από τον τύπο της ταχύτητας:

$$v = \frac{K \cdot i}{n_e} \quad \text{όπου}$$

- v : την ταχύτητα του υπογείου νερού στη δίοδο όπως υπολογίζεται από τη προσομοίωση της περιοχής και

n_e : το ενεργό πορώδες του εδάφους του υδροφορέα. Στην περιοχή προσομοίωσης το έδαφος είναι αμμώδες και δεν θα ήταν λάθος αν θεωρηθεί το ενεργό πορώδες ίσο με το πορώδες της άμμου.

Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων είναι:

- $n_e = 0,35$
- $K = 283,5 \text{ ft/d}$
- $\nu = 0.5 \text{ ft/d}$ (Γράφημα 12-2, σελ 220)
- $i = 6,17 \times 10^{-4}$
- $A = (\text{μῆκος αδιαπέρατων τοίχων} + \text{πλάτος διόδου}) \times \text{Βάθος υδροφορέα}$
 $A = (2 \times 400 + 60) \text{ ft} \times 32 \text{ ft} \rightarrow A = 27520 \text{ ft}^2$
- $Q = 4815 \text{ ft}^3/\text{d}$
- $V_{Gate} = 32 \times 60 \times 10 = 19200 \text{ ft}^3$

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει ότι ο χρόνος παραμονής των ρύπων στη διόδο θα είναι περίπου τέσσερις μέρες. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι ο χρόνος αυτός είναι αρκετός για να εξυγιανθεί το πλούμιο.

13.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ SEYMOUR

Το συνολικό κόστος του συστήματος “Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων” που εγκαταστάθηκε για την εξυγίανση του υδροφορέα του Seymour, περιλαμβάνει το κόστος των τοίχων μικρής διαπερατότητας (funnel walls) και το κόστος της διόδου.

Μεταξύ των τύπων των αδιαπέρατων τοίχων (Λασπώδεις τοίχοι, Τοίχοι από ενωμένα φύλλα ατσαλιού, και Σύνθετοι τοίχοι με μεμβράνες HDPE), προτείνεται η επιλογή των Λασπωδών τοίχων (Slurry Walls). Ο τύπος αυτός αδιαπέρατου τοίχου είναι οικονομικότερος σε σύγκριση με τους άλλους (Πίνακας

9-4, σελ 134) και η εγκατάσταση του δεν απαιτεί ειδικό εξοπλισμό. Από τα είδη των λασπωδών τοίχων (S-B, C-B, S-C-B), θα προτιμούνταν αυτοί που χρησιμοποιούν και το υλικό εκσκαφής, αν το έδαφος της περιοχής είναι κατάλληλο για την πλήρωση των φραγμάτων. Στην περιοχή Seymour προτείνεται η εγκατάσταση τοίχων από μείγμα Τσιμέντου- Μπετονίτη (C-B) για την επίτευξη μεγαλύτερης σταθερότητας του φράγματος στην περίπτωση που η ανάμειξη εδάφους δεν είναι δυνατή ή το έδαφος δεν είναι κατάλληλο.

Από τις μεθόδους εγκατάστασης των λασπωδών τοίχων επιλέγεται η τροποποιημένη εκσκαφή με χρήση τσάπας (Modified Backhoe Excavation). Η μέθοδος αυτή είναι πιο οικονομική από αυτές που εφαρμόζονται για εκσκαφές μεγαλύτερες των 30 ποδιών. Το κόστος της είναι \$4-20/ft².

Για την εκτίμηση του κόστους των αδιαπέρατων τοίχων πρέπει να υπολογιστεί η επιφάνειά τους, A, όπου:

$$A_{\text{ΤΟΙΧΩΝ}} = (\text{Βάθος} + 5\text{ft}^*) \times \text{Μήκος}$$

$$A_{\text{ΤΟΙΧΩΝ}} = (32+5) \text{ ft} \times 800 \text{ ft}$$

$$A_{\text{ΤΟΙΧΩΝ}} = 29.600 \text{ ft}^2$$

Άρα το κόστος κυμαίνεται από \$118.400 έως \$592.000 ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της περιοχής.

Το κόστος της διόδου περιλαμβάνει το κόστος του πληρωτικού υλικού και το κόστος εγκατάστασης του κελιού. Για την εγκατάσταση του αντιδρώ-ντος κελιού προτείνεται η μέθοδος βασισμένη σε ‘Caisson’ επειδή είναι σχετι-κά φτηνή (\$7/ft²) και απλή.

Για την εκτίμηση του κόστους εγκατάστασης του κελιού πρέπει να υπολογιστεί η επιφάνειά του, A, όπου:

$$A_{\text{ΔΙΟΔΟΥ}} = (\text{Βάθος} + 3\text{ft}^{\diamond}) \times \text{Μήκος}$$

$$A_{\text{ΔΙΟΔΟΥ}} = (32+3)\text{ft} \times 60 \text{ ft}$$

$$A_{\text{ΔΙΟΔΟΥ}} = 2.100 \text{ ft}^2$$

* Οι αδιαπέρατοι τοίχοι εγκαθίστανται 5 ft μέσα στο αδιαπέρατο υποκείμενο στρώμα του υδροφορέα

◊ Η διόδος εγκαθίστανται 1 ft μέσα στο αδιαπέρατο υποκείμενο στρώμα του υδροφορέα και εκτείνεται 2ft πάνω από το επίπεδο του υπογείου νερού.

Άρα το κόστος εγκατάστασης του κελιού είναι \$14.700.

Για την εκτίμηση του κόστους του πληρωτικού υλικού πρέπει να υπολογιστεί ο όγκος της διόδου, V_{GATE} , όπου,

$$V_{\text{GATE}} = 32 \times 60 \times 10 = 19200 \text{ ft}^3$$

Το κόστος του ORC είναι \$12 /Kg (www.regenesis.com)

Το κόστος του συστήματος κυμαίνεται από:

$$\$118.400 + \$14.700 = \$ \mathbf{133.100}$$

έως

$$\$592.000 + \$14.700 = \$ \mathbf{606.700} \quad \text{χωρίς το κόστος του ORC.}$$

14. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΑΓΓΛΟΦΩΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anderson, M.P. and W.W. Woessner, 1992. "Applied Groundwater Modeling, Simulation of Flow and Advective Transport". Academic Press Inc., San Diego, California
- Babu, D.K., G.F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfeld, S.A. Stothoff, June 1997. "Chemical Transport by three-dimensional groundwater flows".
- Bardos, R.P., P. Morgan, R.P.J., Swannell, 2000. "Application of In Situ Remediation Technologies – 1. Contextual Framework". Land Contamination and Reclamations Volume 8, Number 4, pp 1-22.
- Barker, J.F., M. Morkin, J.F. Devlin. "Permeable Reactive Walls- An Example for Treating a Mixed Plume". Department of Earth Sciences University of Waterloo.
- Beitinger, E., 1998. "Permeable Treatment Walls- Design, Construction, and Cost" NATO/CCMS Pilot Study.
- Birke, V., and E.K. Roehl, 2001. "An Introduction To Permeable Reactive Barriers (PRB)". University of applied Sciences Fachhochschule Nordostniedersachsen, University of Karlsruhe Applied Geosciences Karlsruhe.
- Bowles, M.W., November 1997. "East Garrington Gas Plant Looking Northeast Towards the Trench and Gate Research Site". Post Graduate Thesis, Calgary, Alberta.
- Bradley, P.M and F.H Chapelle, 1998. "Effect of contaminant concentrations on aerobic microbial mineralization of DCE and VC in stream-bed sediments." Environ.Sci.Technol.Vol 32, No 5, pp. 553-557.
- Burmeier H., May 1998. "General Overview. NATO/ CCMS Pilot Study Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment of Contaminated Land and Groundwater (Phase III), SPECIAL SESSION Treatment Walls and Permeable Reactive Barriers" North Atlantic Treaty Organization.
- Burris, D.R., T.J. Campbell, and V.S.Manoranjan, 1995. "Sorption of trichloroethylene and tetrachloroethylene in a batch reactive metallic iron-water system." Environ.Sci.Technol.Vol 29, No 11, pp. 2850-2855.
- Devlin, J.F., J. Klausen, and R.P. Schwarzenbach, 1998. "Kinetics of nitroaromatic reduction on granular iron in recirculating batch experiments." Environ.Sci.Technol., Vol 32, No 13, pp.1941-1947.
- Devlin, J.F., Fall 2000. "Characterizing Sites for Permeable Reactive Barriers".

- Focht, R., J. Vogan and S.F. O'Hannesin, 1996. "Field applications of reactive iron walls for in-situ degradation of volatile organic compounds in groundwater." *Remediation*, Vol 6, No 3, pp.81-94.
- Gillham, R.W. and S.F. O'Hannesin, 1994. "Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zero-valent iron." *Ground Water*, Vol 32, No 6, pp.958-966.
- Johnson, T.L., M.M. Scherer, and P.G. Tratnyek, 1996. "Kinetics of halogenated organic compound degradation by iron metal." *Environ.Sci.Technol.*, Vol 30, No 8, pp.2634-2640.
- Koenigsberg, S. "The Use of Oxygen Release Compound and Hydrogen Release Compound for Enhanced bioremediation."
- Matheson, L.J. and P.G., Tratnyek, 1994. "Reductive dehalogenation of chlorinated methanes by iron metal." *Environ.Sci.Technol.*, Vol 28, No 12, pp. 2045-2053.
- Nadim, F., R.J. Carley, C. Perkins, G.E. Hoag, A.M. Dahmani, S.Liu, 1996, "Remediation options for sites contaminated with petroleum products in the United States : Historical overview and best applicable technologies."
- NATO/CCMS Pilot Study, 1998. "Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment of Contaminated Land and Groundwater (Phase III), SPECIAL SESSION 'Treatment Walls and Permeable Reactive Barriers'"
- Noris, R.D., R.E. Hinchey, R. Brown, P.L. McCarty, J.T. Wilson, D.H. Campbell, M. Reinhard, E.J. Bouwer, R.C. Borden, T.M. Vogel, J.M. Thomas, and C.H. Ward, 1994. "Handbook of Bioremediation, Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Olivares, J.L. "Argus ONE-PTC interface, v. 2.2 User's guide". PTC User's Manual.
- Palmer, P.L., 2000. Reactive walls In E. K. Nyer, et al (Eds.), "In situ treatment technology pp. 271-288)." CRC Press.
- Pinder, G.F., September 2000. "Groundwater systems using geographical information systems". PTC User's Manual.
- Pinder, G.F., August 2001. "Groundwater modeling using geographical information systems". PTC User's Manual.
- Powell, R.M. 2000. "Powell & Associates Science Services website, www.powellassociates.com"
- Rogut, J., 2000. "Implementation of decision support tools (multi-criteria assessment) for groundwater management". Central Mining Institute (GIG) Katowice, Poland

- Sanjay, H. G., Srivastava K. C , Walia, D. S , September 1997. "Mixed Waste Remediation Using HUMASORB-CS -an TM Adsorbent to Remove Organic And Inorganic Contaminants". ARCTECH, Inc. 14100 Park Meadow Drive Suite 210 Chantilly, Virginia 20151
- Starr, R.C. and J.A. Cherry, 1994. "In Situ Remediation of Contaminated Ground Water: The Funnel-and-Gate System". Ground Water, Vol. 32, No.3, pp. 465-476
- Striegel, J., D. A. Sanders, J. N. Veestra, 2001. "Treatment of Contaminated Ground Water Using Permeable Reactive Barriers". Environmental Geosciences, Volume 8, Number 4, 2001, pp 258-256
- Suthersan, S.S., 1999. "IN SITU REACTIVE WALLS Remediation engineering: design concepts". CRC Press.
- Testa, S.M., and Winegardner, D.L. 2000. "Restoration of petroleum contaminated aquifers: Petroleum hydrocarbons and organic compounds (2nd ed., pp212-214)." CRC Press.
- Teutsch, G., P. Grathwohl, H. Schad, P. Werner, 1996. "In situ Reaktionswände-ein neuer Ansatz zur Passiven Sanierung von Boden- und Grundwasserverunreinigungen. Grunwasser, 1, 12-20".
- Trischer and Partner 1996. "Sanierung ehemaliges Gaswerk-ost in Karlshuh-unpublished report".
- USEPA , 1995. "In situ remediation technology status report: Treatment walls. EPA/542/K-94004."Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, Technology Innovation Office.
- USA EPA 1997a. "Permeable reactive subsurface barriers for the interception and remediation of chlorinated hydrocarbon and chromium (VI) plumes in groundwater"EPA/600/F-97/008.Washington, DC: Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory.
- USEPA, February 2001. "Cost Analyses for Selected Groundwater Cleanup Projects: Pump and Treat Systems and Permeable Reactive Barriers"
- Vidumsky, J.E., June 2000. "Permeable Reactive Barriers Update"
- Weber, E.J., 1995."Iron-mediated reductive transformations : investigations of reaction mechanism." In 209th National Meeting, American Chemistry Society, Division of Environmental Chemistry, Anaheim, CA ,Vol 35, No 1, pp. 702-705.

ΕΛΛΗΝΟΦΩΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Καλογεράκης, Ν., 2002. “Βιολογική εξυγίανση περιβάλλοντος- Σημειώσεις”

Καρατζάς, Γ.Π., 2002. “Ροή υπογείων υδάτων και μεταφορά μάζας- Σημειώσεις”

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[www.argusint.com/Ground Water.html](http://www.argusint.com/Ground%20Water.html)

www.envirotools.org/factsheets/btex.html

www.epa.gov/seahome/groundwater/src/voc2.htm

www.groundwater.com

www.inquip.com/brochure.html

www.mhle.com/engcs/civil/lagrega/Instructor/ppt/chapter16/chapter16.ppt

www.michigan.gov

www.ngwa.org/publicaction/gwmr/winter02gwmrdo.html_1

www.oce.nsw.gov.au/ecology/detail.cmf

www.oceta.on.ca/profiles/wbi/barrier.html

www.regenesis.com

www.rtdf.org/public/permbarr/prbsumms/profile.cfm?mid

www.r3-bardos.demon.co.uk/regenesis2/pagetwo.html

www.usace.army.mil/inet/usace-docs/design-guides/dg1110-345-117/c-9.pdf

www.water.hut.fi/wr/kurssit/Yhd-12126/oppimateriaali/deg1_e.htm

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

IN- SITU ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ

Technology	Description	Type
Bioremediation	Remediation by altering <i>in situ</i> conditions, typically by <i>in situ</i> flushing (see below) to optimise biodegradation rate. Examples include the addition of nutrients, oxygen, etc.	Bio
Biosparging / Air sparging	Injecting air (or other gases) into the saturated zone to strip volatile contaminants and/or stimulate biodegradation. The latter process is often termed “biosparging”.	Bio/ Phys-chem
Bioslurping	Multiphase extraction of groundwater, free-phase contamination and soil gas to achieve bulk contaminant removal and supply oxygen for enhanced biodegradation.	Bio & phys
Bioventing	Movement of air or other gas through soil to stimulate biological destruction of contaminants, possibly in combination with their removal in the gas phase (c.f., soil vapour extraction)	Bio & phys

Technology	Description	Type
Chemical destruction	Use of highly reactive reagents to convert contamination to environmentally acceptable end-products <i>in situ</i> . An example is the use of Fenton’s reagent (iron-catalysed hydrogen peroxide).	Chem
Electro-remediation	Use of electric fields to move or contain contaminants.	Phys-chem
Flushing	Enhanced pump and treat to remove contaminants, for example addition of surfactants or solvents to re-circulated water.	Phys-chem
Hydrofracture	Hydraulic or pneumatic techniques to induce fracturing of subsurface zones to increase permeability for other remediation treatments.	Phys
<i>In situ</i> heating	Use of steam or microwaves (radio-frequency heating) to heat the soil, for example to increase the range of contaminants recoverable by soil vapour extraction.	Thermal
Landfarming	Cultivation of surface soils (typically the top 50cm) to stimulate biodegradation. Usually includes the addition of various amendments (e.g., fertiliser) - unlikely to easily find regulatory approval under current circumstances.	Bio
Natural attenuation	Monitored use of naturally occurring <i>in situ</i> processes to remediate contamination without enhancement. Often, and more accurately, called monitored natural attenuation (MNA).	Bio, Phys & Chem
Permeable reactive barriers	A single or combination of biological, chemical or physical process(es) in a specific portion of the subsurface that treats a carrier as it passes through but does not unacceptably impede flow.	Bio / Chem / Phys
Phyto-remediation	Use of plants to recover contaminants and/or stimulate <i>in situ</i> biodegradation/stabilisation.	Bio
Pump and treat	Treatment mediated by the pumping of groundwater. The term “Pump and Treat” is sometimes specifically used to mean technologies where groundwater treatment is undertaken above ground. However, in practice the term is also used to refer to true <i>in situ</i> processes involving groundwater pumping.	Phys
Soil vapour extraction (SVE)	Movement of air or other gas through unsaturated soil to remove contaminants through enhanced volatilisation. Sometimes called “venting” or “stripping”.	Phys

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ PRBs

Chlorinated Solvents							
Target Contaminants	Maximum Concentration (mg/L)	Reactive Media	Construction	Installation Cost	Installation Date	Location	Full Scale (F) Pilot (P)
TCE	0.50	Fe ⁰	Funnel and Gate	\$600,000	March 1998	Aircraft Maintenance Facility, OR	F
TCE	6.0-8.0	Fe ⁰	Hydraulic Fracturing	\$1,120,000	March 1998	Caldwell Trucking, NJ	F
TCA 1,1-DCE TCE cDCE	0.70 0.70	Fe ⁰	Funnel and Multiple Gate	\$1,000,000	October 1996	Federal Highway Administration (FHA) Facility, Lakewood, CO	F
1,1,1-TCA PCE TCE DNAPL	1.2 0.019 0.11	Fe ⁰	Continuous Trench	\$725,000	September 1998	Former Manufacturing Site, Fairfield, NJ	F
TCE 1,2-cDCE	390	Fe ⁰	Slurry Wall Funnel, <i>In Situ</i> Reaction Vessel	\$375,000	December 1995	Industrial Site, Belfast, Northern Ireland	F

PCE, 1,2-DCE	20 0.5	Fe ⁰ iron sponge	Continuous Wall	\$93,000	June 1998	Former Drycleaning Site, Rheine, Westphalia, Germany	F
TCE 1,1,1-TCA	0.4 0.1	Fe ⁰	Funnel and Gate	\$400,000	January 1996	Industrial Site, Coffeyville, KS	F
TCE cDCE VC	1.3 1.8 0.026-0.053	Fe ⁰	Continuous Trench	\$797,000	December 1997	Industrial Site, NY	F
TCE cDCE VC	25 3.5 0.90	Fe ⁰	Continuous Trench	\$350,000	November 1997	Industrial Site, SC	F
TCE cDCE VC Freon113®	0.050-0.20 0.45-1.0 0.10-0.50 0.020-0.060	Fe ⁰	Funnel and Gate	\$1,000,000	February 1995	Intersil Semiconductor Site, Sunnyvale, CA	F
1,2-DCE VC	1.4 0.30	Fe ⁰	Continuous Trench	\$1,300,000	April 1998	Kansas City Plant, Kansas City, MO	F
TCE	1.4	Fe ⁰	Funnel and Gate	\$530,000	December 1995	Lowry Air Force Base, CO	F
Cr ⁺⁶ TCE	3.4 4.3	Fe ⁰	Continuous Trench	\$500,000	June 1996	U.S. Coast Guard Support Center, Elizabeth City, NC	F

PCE TCE cDCE, tDCE VC	1.1 1.5 4.2 0.011 1.7	Concrete, sand, and iron	Excavate and Fill	\$257,000	October 1998	Watervliet Arsenal, Watervliet, NY	P
PCE TCE DCE	5.6 0.55 0.53	Fe ⁰	Funnel and Gate	\$800,000	January 1998	Area 5, Dover Air Force Base (AFB), DE	P
TCE PCE	250 43	Fe ⁰	Continuous Trench	\$30,000 (not including Fe ⁰ & labor)	1991	Borden Aquifer, Ontario, Canada	P
TCE DCE VC	90 170 7.0	Fe ⁰	Continuous Walls with overlapping Panels	\$809,000	October- November 1997	Cape Canaveral Air Station, FL	P
PCE 1,2-DCE	20 0.50	Fe ⁰ , iron sponge	Continuous Wall	\$93,000	June 1998	Former Drycleaning Site, Rheine, Westphalia, Germany	P
TCE cDCE VC	0.30 0.50 0.080	Fe ⁰	Funnel and Gate	\$250,000	May 1995	Industrial Site, NY	P
Cr ⁺⁶ PCE	22 2.0	SMZ	Hanging Barrier in Perforated Metal Frame	\$100,000	October 1997	LEAP Permeable Barrier Demonstration Facility, Portland, OR	P

PCE TCE	0.30 0.015	Fe ⁰	Hydraulic Fracturing	\$160,000	June 1998	Massachusetts Military Reservation CS-10 Plume, Falmouth, MA	P
PCE TCE	0.30 0.015	Fe ⁰	Hydraulic Fracturing	\$160,000	June 1998	Moffett Federal Airfield, Mountain View, CA	P
TCE, 1,2-DCE PCE	3.0 0.28 0.026	Fe ⁰	Funnel and Gate	\$365,000	April 1996	Savannah River Site TNX Area, Aiken, SC	P
TCE cDCE CT NO3	0.25 0.050 0.045 0.070	Fe ⁰	GeoSiphon Cell	\$120,000	July 1997	Savannah River Site TNX Area, Aiken, SC	P
TCE PCE cDCE	0.59 13 1.6	Fe	Reaction Vessel	\$48,000	November 1994	SGL Printed Circuits, Wayne, NJ	P
TCE VC	0.37 1.9	Fe ⁰	Funnel and Gate	To be determined	1994	Somersworth Sanitary Landfill, NH	P
cDCE VC TCE BTEX	VOCs >100 toluene 10	Fe ⁰ , O	Funnel and Sequenced Treatment Gate	\$400,000	December 1996	U.S. Naval Air Station, Alameda, CA	P

TCE	0.15	Fe ⁰	Horizontal Well	\$4,000,000	March 1996	X-625 Groundwater Treatment Facility, Portsmouth Gaseous Diffusion Plant, Piketon, OH	P
Metals and Inorganics							
Target Contaminants	Maximum Concentration (mg/L)	Reactive Media	Construction	Installation Cost	Installation Date	Location	Full Scale (F) Pilot (P)
U	21	Fe ⁰ , AFO, PO ₄	Funnel and Gate	\$140,000	August 1997	Fry Canyon Site, UT	F
Ni Fe Sulfate	10 1000 3800	Organic Carbon	Cut and Fill	\$30,000	August 1995	Nickel Rim Mine Site, Sudbury, Ontario, Canada	F
Pb Cd As Zn Cu	0.33 0.077 0.31 1.1 0.14	Limestone	Continuous Trench	To be determined	August 1998	Tonolli Superfund Site, Nesquehoning, PA	F
Cr ⁺⁶ TCE	3.4 4.3	Fe ⁰	Continuous Trench	\$500,000	June 1996	U.S. Coast Guard Support Center, Elizabeth City, NC	F
Cr ⁺⁶	2.0	Sodium dithionite	Injection	\$480,000	September 1997	100D Area, Hanford Site, WA	P
Cr ⁺⁶ PCE	22 2.0	SMZ	Hanging Barrier in Perforated Metal Frame	\$100,000	October 1997	LEAP Pemeable Barrier Demonstration Facility, Portland, OR	P
TCE cDCE CT NO ₃	0.25 0.050 0.045 70	Fe ⁰	GeoSiphon Cell	\$120,000	July 1997	Savannah River Site TNX Area, Aiken, SC	P
U Te HNO ₃		Fe ⁰	Funnel and Gate Continuous Trench	\$1,000,000	November 1997 December, 1997	Y-12 Site, National Laboratory, TN	F
PO ₄ NO ₃		Fe/Ca oxides, high-Ca limestone, organic carbon	Funnel and Gate	\$5,000	August 1993	Public School, Langton, Ontario, Canada	P
U	21	Fe ⁰ , AFO, PO ₄	Funnel and Gate	\$140,000	August 1997	Fry Canyon Site, UT	F
U Te HNO ₃		Fe ⁰ Fe0	Funnel and Gate Continuous Trench	\$1,000,000	November 1997 December, 1997	Y-12 Site, Oak Ridge National Laboratory, TN	F

Other							
Target Contaminants	Maximum Concentration (mg/L)	Reactive Media	Construction	Installation Cost	Installation Date	Location	Full Scale (F) Pilot (P)
BTEX	12	O ₂	Trench and Gate	\$67,200	September 1995	East Garrington, (Near Olds), Alberta, Canada	P
cDCE VC TCE BTEX	VOCs >100 toluene 10	Fe ⁰	Funnel and Sequenced Treatment Gate	\$400,000	December 1996	U.S. Naval Air Station, Alameda, CA	P
BHC beta-BHC DDD DDT xylene ethylbenzene lindane methyl parathion	60 7.6 99 9.3 94,000 6,100 55 47	Activated carbon	Funnel and Gate	\$520,000	August 1998	Marzone Inc./Chevron Chemical Company, Tifton, GA	F

Προσομοίωση Υπόγειας Ροής και Μεταφοράς Μάζας .
Εξυγίανση Υπογείων Υδάτων εφαρμόζοντας την
Τεχνολογία των Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων -
Εφαρμογή Πεδίου σε Περίπτωση Ρύπανσης με
Υδρογονάνθρακες Πετρελαίου (ΒΤΕΧ)

ΓΑΡΜΠΗ ΣΟΦΙΑ

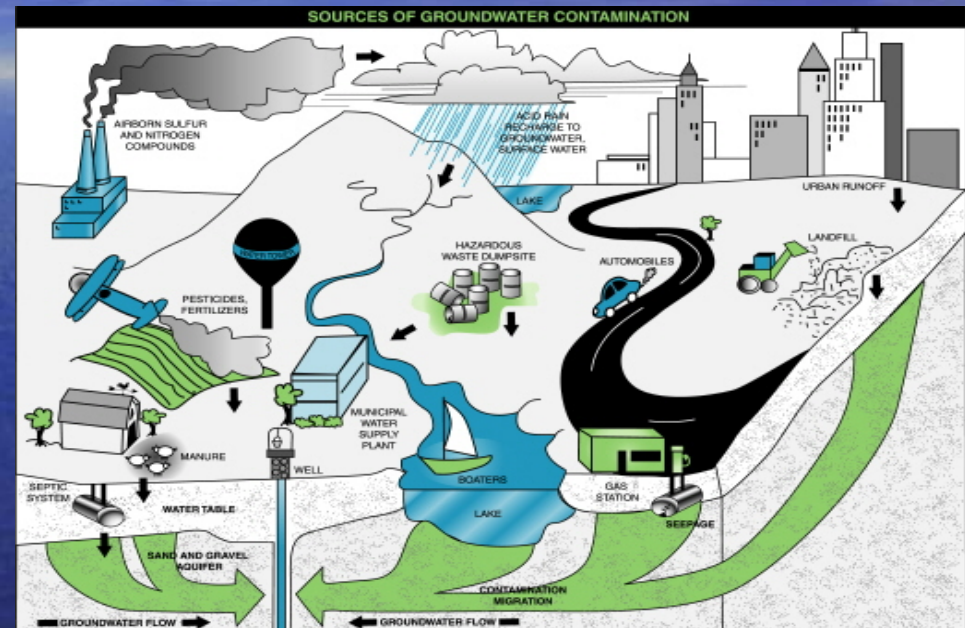
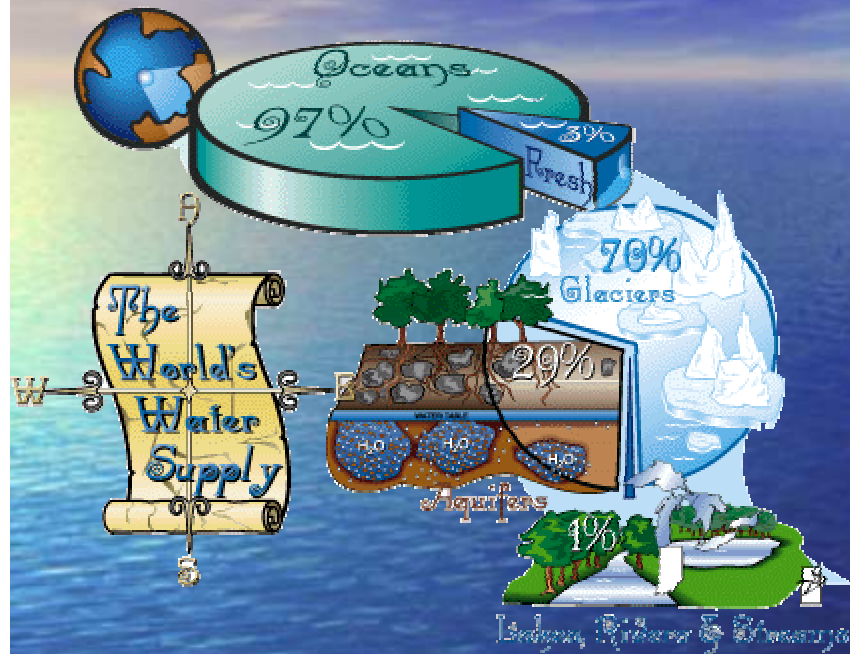
ΓΕΝΕΙΑΤΑΚΗΣ ΜΑΝΟΛΗΣ

ΙΟΥΛΗΣ 2003

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

- * ΔΙΑΠΠΕΡΑΤΑ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ (PRBs)
- * ΡΥΤΤΟΙ ΒΤΕΧ
- * ARGUS ONE - PTC
- * ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ "FUNNEL AND GATE"
- * ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

ΤΟ ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ ΚΑΙ Η ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΟΥ



- * ΣΤΡΑΓΓΙΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΧΥΤΑ
- * ΔΙΑΡΡΟΕΣ ΑΠΟ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ
- * ΦΥΤΟΦΑΡΜΑΚΑ - ΕΝΤΟΜΟΚΤΟΝΑ
- * ΤΟΞΙΚΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

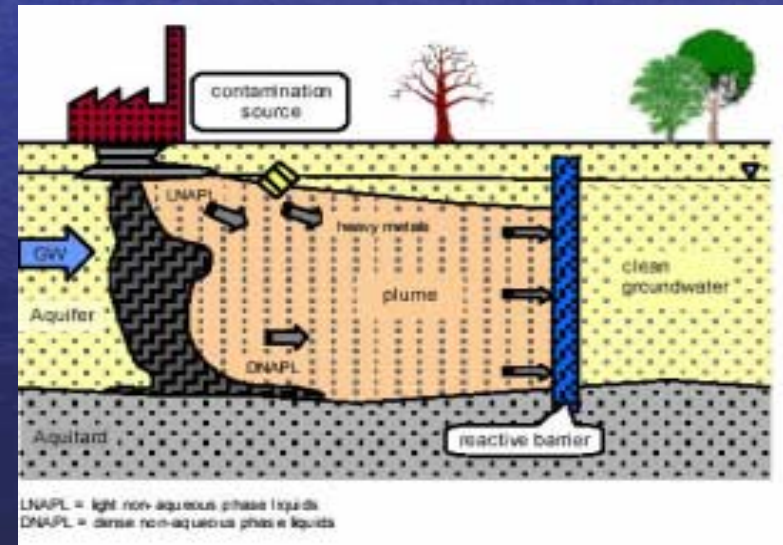
PRBs

ΟΡΙΣΜΟΣ

Τα υπόγεια διαπερατά φράγματα (PRBs) είναι μια νέα τεχνολογία εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπογείου νερού. Αποτελούν μια *in situ* παθητική ζώνη επεξεργασίας που περιέχει αντιδρών υλικό, το οποίο αποδομεί, μετατρέπει, προσροφά ή ακινητοποιεί τους ρυπαντές καθώς το υπόγειο νερό ρέει δια μέσου της.

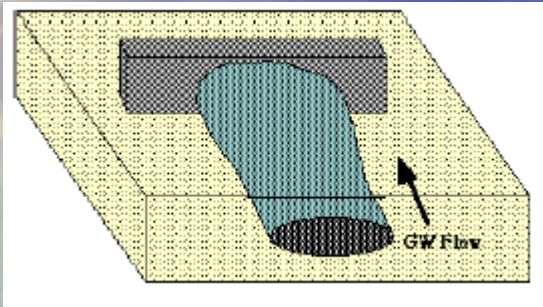
ΣΚΟΠΟΣ

Περιορισμός και Απορρύπανση του πλουμίου (όχι της πηγής!), χωρίς άντληση του υπογείου ύδατος και με χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης του συστήματος μετά την εγκατάσταση.

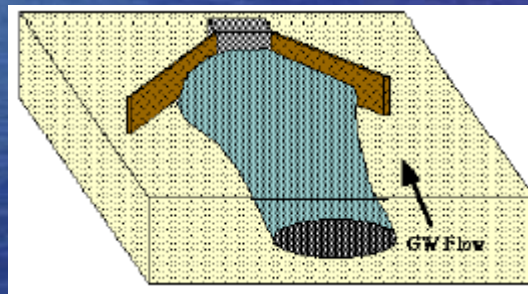


ΕΙΔΗ PRBs

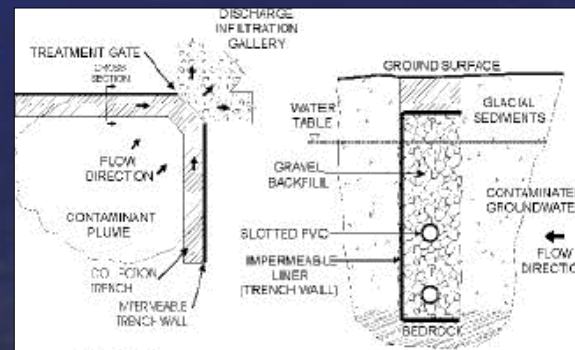
- * Ενεργή Τάφρος Υψηλής Διαπερατότητας (Permeable reactive trench)



- * Συστήματα Συγκλινόντων Ψαγμάτων και Διόδων (Funnel and Gate)



- * Συστήματα Τάφρου και Διόδου (Trench and Gate)



Βήματα σχεδιασμού PRBs

Χαρακτηρισμός περιοχής

* Χαρακτηριστικά Υδροφορέα

Διαπερατότητα
Ταχύτητα υπογείου νερού
Βάθος αδιαπέρατου στρώματος
Διαστάσεις του πλουμίου
Εποχιακές διακυμάνσεις
Υλικό υδροφορέα

* Οργανική σύνθεση υπογείου νερού

* Ανόργανη σύνθεση υπογείου νερού

Επιλογή αντιδρώντος μέσου



Θέση, σχήμα και διαστάσεις φράγματος

ΑΝΤΙΔΡΩΝ ΚΕΛΙ - Η ΚΑΡΔΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

ΟΡΙΣΜΟΣ

Το αντιδρών κελί είναι το τμήμα του υδροφορέα που τροποποιείται ώστε να περιέχει το αντιδρών υλικό, διαμέσου του οποίου θα κινηθεί το πλούμιο των ρυπαντών και θα επεξεργαστεί.

ΑΝΟΡΓΑΝΟΙ ΡΥΠΑΝΤΕΣ

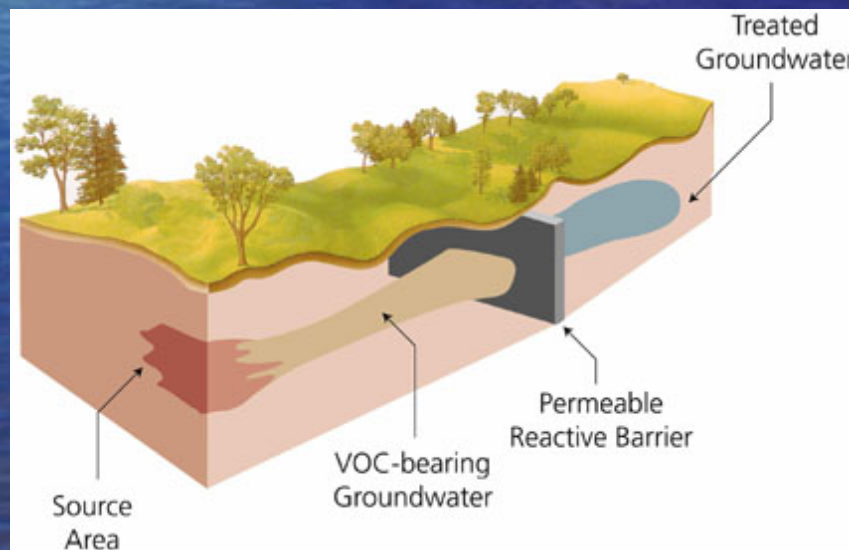
ΠΛΗΡΩΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	ΡΥΠΟΣ	ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ
Fe^0	CrO_4^{2-}	Αναγωγή/ Κατακρήμνιση	Πιλοτική
Fe^0	NO_3^-	Αναγωγή	Εργαστήριο
Αοβεστόλιθος	UO_2^{2+}	Κατακρήμνιση	Εργαστήριο

ΟΡΓΑΝΙΚΟΙ ΡΥΠΑΝΤΕΣ

ΠΛΗΡΩΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	ΡΥΠΟΣ	ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ
ORC	BTEX	Οξείδωση – (Μικροβιακή)	Δοκιμές πεδίου
Ενεργός Άνθρακας	PAH	Προσρόφηση	Εργαστήριο
Fe^0	TCE, PCE	Αναγωγική Αφαλογόνωση	Εμπορική!!
Ζεόλιθος	MTBE	Προσρόφηση	Εργαστήριο

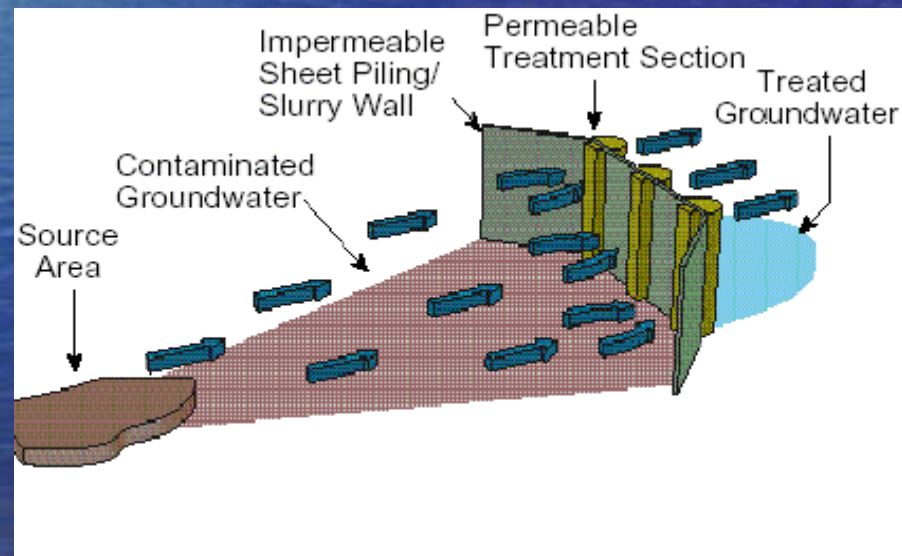
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΝΤΔΡΩΝΤΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

- Υψηλή μείωση των συγκεντρώσεων των ρύπων
- Γρήγορους ρυθμούς αντίδρασης
- Υψηλή υδραυλική διαπερατότητα
- Χημική σταθερότητα για μεγάλο χρονικό διάστημα
- Περιβαλλοντική συμβατότητα
- Σχετικά φτηνό



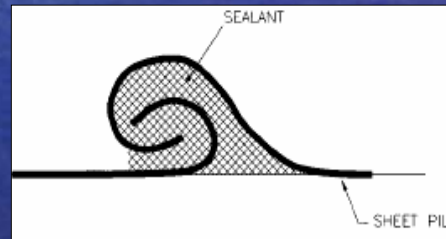
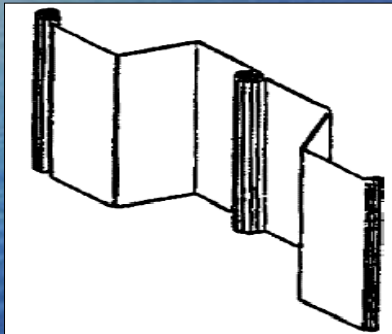
Σύστημα Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων "Funnel and Gate"

Μέθοδος παθητικής εξυγίανσης που χρησιμοποιεί τοίχους μικρής διαπερατότητας για την τροποποίηση της ροής του ρυπασμένου υπογείου νερού ,έτσι ώστε αυτό να ρέει διαμέσου κενών υψηλής διαπερατότητας, δηλαδή των διόδων, όπου γίνεται η επεξεργασία των ρύπων (Starr and Cherry,1994).



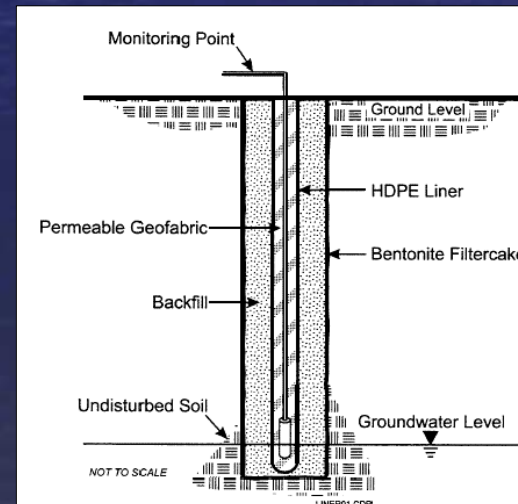
ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΙ ΤΟΙΧΟΙ (Funnel Walls)

- **Τοίχοι από λάσπη (slurry walls)**
 1. Τοίχοι από Έδαφος-Μπετονίτη (S-B) $k = 10^{-7} \text{ cm/s}$
 2. Τοίχοι από Έδαφος -Τσιμέντο-Μπετονίτη (S-C-B) $k = 10^{-6} \text{ cm/s}$
 3. Τοίχοι από Τσιμέντο-Μπετονίτη (C-B) $k = 10^{-6} \text{ cm/s}$
- **Τοίχοι από ενωμένα φύλλα ατσαλιού (Sheet Pile Walls)**



$$k = 10^{-8} \text{ cm/s}$$

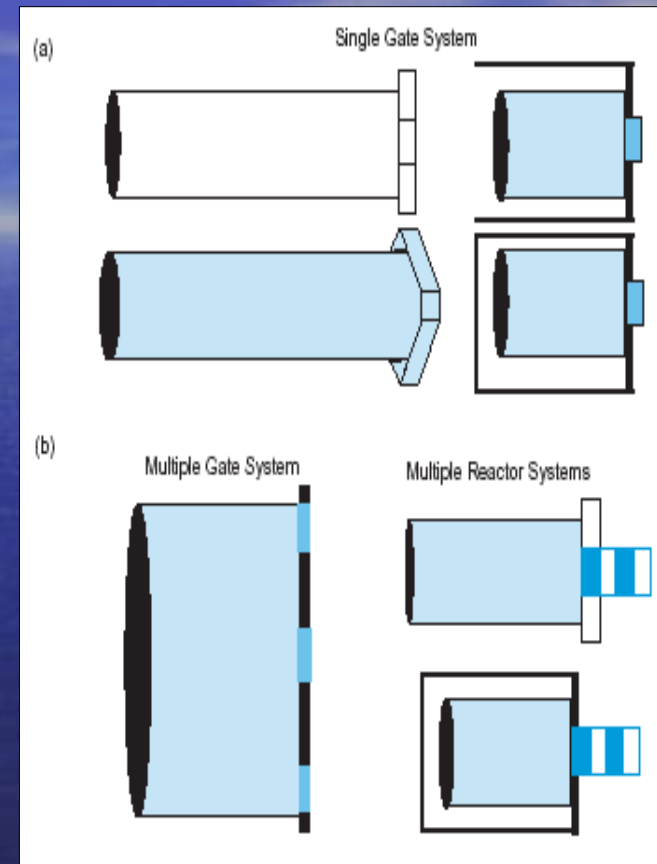
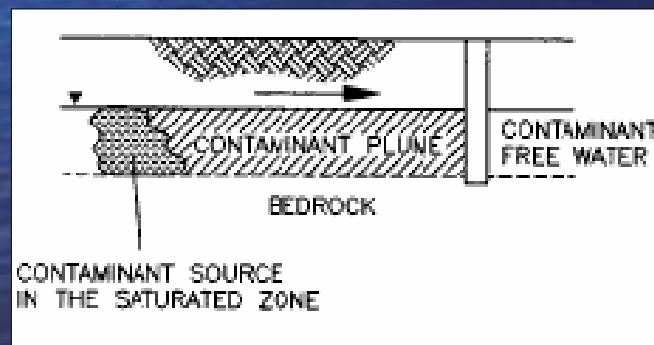
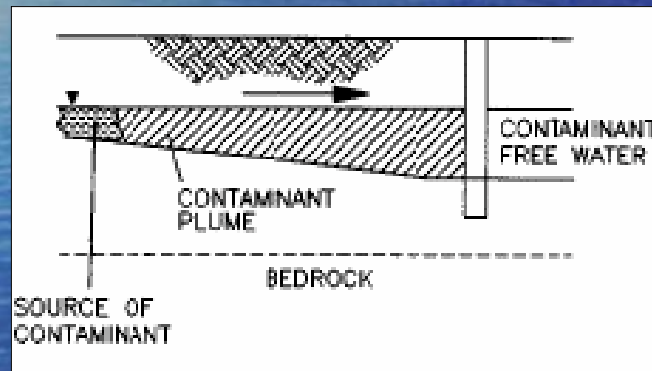
- **Σύνθετα λασπώδη φράγματα**
 $k = 10^{-12} \text{ cm/s}$



ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΩΝ "FUNNEL AND GATE"

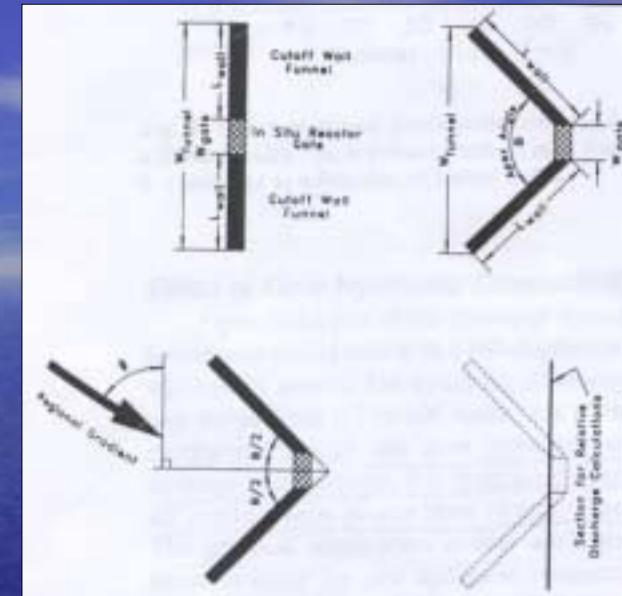
ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ

1. Μέγεθος πλουμίου ρυπαντών
2. Είδος ρυπαντών
3. Χρόνος συγκράτησης
4. Κόστος



ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΩΝ "FUNNEL AND GATE"

- Μήκος και πλάτος Διόδου
- Πλάτος φράγματος
- Γωνία κορυφής του φράγματος
- Προσανατολισμός ως προς την υδραυλική κλίση της περιοχής
- Συμμετρία των τοίχων



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΔΙΑΤΑΞΗ - ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

...για ένα δοσμένο μήκος αδιαπέρατων τοίχων, η πιο αποτελεσματική διαμόρφωση σε ένα ισοτροπικό υδροφορέα είναι το φράγμα με πλευρές σε γωνία 180 μοιρών και προσανατολισμένες κάθετα στην υδραυλική κλίση της περιοχής (Starr and Cherry, 1994).

ΧΡΟΝΟΣ ΖΩΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

- Διατήρηση ικανότητας απομάκρυνσης ρυπαντών

Μείωση της αντιδραστικότητας

- Διατήρηση αρχικής υδραυλικής ιδιότητας

Εισροή και κατακάθιση λεπτόκοκκων εδαφικών σωματιδίων, τα οποία θα φράξουν τους πόρους του φράγματος.

Κατακρήμνιση ανθρακικών όπως ανθρακικό ασβέστιο ή μαγνήσιο, οξείδια ή υδροξείδια του σιδήρου στο αντιδρών μέσο.

Ανεξέλεγκτη ανάπτυξη μικροοργανισμών (bio-clogging).

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ "MONITORING"

ΕΛΕΓΧΟΣ

- Επίτευξη στόχων
- Κίνηση ρύπων γύρω από τον τοίχο
- Εξέταση του αντιδρώντος υλικού
- Υδραυλικός έλεγχος
- Έλεγχος της χημείας του υπόγειου ύδατος

ΘΕΣΗ ΠΗΓΑΔΙΩΝ

- Αμέσως κατάντη της εκροής από την ζώνη των αντιδραστηρίων.
- Σε κάθε άκρο του τοίχου.
- Κάτω από τον τοίχο
- Στα ανάντη του τοίχου.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ PRBs

- ☺ In - situ εξυγίανση με τις φυσικές ιδιότητες ροής της περιοχής.
- ☺ Δεν απαιτείται εξωτερική ενέργεια.
- ☺ Δεν απαιτείται ακριβής προσδιορισμός της πηγής ρύπανσης.
- ☺ Το σχέδιο ροής του υπογείου νερού στην περιοχή αλλάζει ελάχιστα
- ☺ Το κόστος επεξεργασίας του υπόγειου νερού είναι σχεδόν το $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$ του κόστους επεξεργασίας των συστημάτων pump-and-treat.
- ☺ Είναι σχεδιασμένα για πολυετή λειτουργία χωρίς συντήρηση και λειτουργικά έξοδα

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- ☹ Βάθος μέχρι τα 12 ή 15 m (Αντιοικονομικά σε μεγαλύτερα βάθη)
- ☹ Μπορεί να μειωθεί η διαπερατότητα τους εξαιτίας βιολογικής ή χημικής καθίζησης
- ☹ Απαιτείται λεπτομερής χαρακτηρισμός του πλουμίου των ρυπαντών.
- ☹ Αντιοικονομικά σε περιπτώσεις πλουμίων μεγάλου πλάτους (πάνω από 300 m).
- ☹ Δεν είναι αποδοτικά για πολύ μικρές ή πολύ μεγάλες ταχύτητες υπογείου νερού.
- ☹ Εμπόδιο η υπόγεια λιθολογία και οι επίγειες κατασκευές

BTEX

Βενζόλιο, Τολουόλιο, Αιθυλοβενζόλιο, και Ξυλόλια

Μονοκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, LNAPL, υδατοδιαλυτοί, πτητικοί και παρουσιάζουν μεγάλη κινητικότητα.

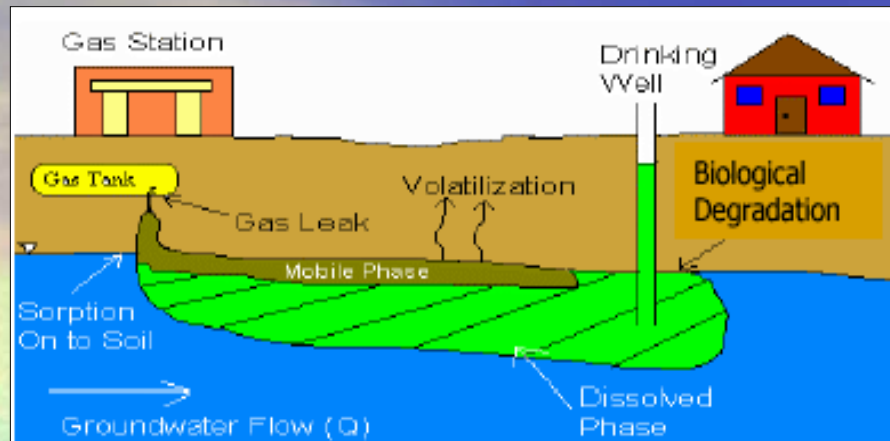
Βρίσκονται στα προϊόντα πετρελαίου, και σε πολλές βιομηχανικές δραστηριότητες, όπως στην παραγωγή πλαστικών, εντομοκτόνων, εκρηκτικών και στη φαρμακοβιομηχανία.

ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ

- Ερεθισμοί σε δέρμα και αισθητήρια όργανα
- Νευρικό σύστημα
- Αναπνευστικό σύστημα
- Κυκλοφοριακό σύστημα
- Συκώτι, νεφρά
- Λευχαιμία, καρκίνος (Βενζόλιο)

ΧΗΜΙΚΟ	MCL (mg/l = ppm)
Βενζόλιο	0.005
Τολουόλιο	1
Αιθυλοβενζόλιο	0.7
Ξυλόλιο	10

ΤΥΧΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ



- Διάχυση, Διασπορά, Συμμεταφορά
- Διάλυση
- Εξάτμιση
- Προσρόφηση
- Βιοαποικοδόμηση

ΒΙΟΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΒΤΕΧ

Αντίδραση οξείδωσης του ρύπου με την παρουσία αυτόχθονων μικροοργανισμών

Electron Acceptor	Type of Reaction	Metabolic By-Product	Redox Potential	Reaction Preference
Oxygen	Aerobic	CO ₂	820	Most Preferred
Nitrate	Anaerobic	N ₂ , CO ₂	740	
Ferric Iron(solid)	Anaerobic	Ferrous Iron	-50	
Sulfate	Anaerobic	H ₂ S	-220	
Carbon Dioxide	Anaerobic	Methane	-240	Least Preferred

ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΑ ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΒΤΕΧ

- ORC (Oxygen Releasing Compound) – Αερόβια Βιοαποικοδόμηση



- Ενεργός Άνθρακας – Προσρόφηση

$$R = 1 + \frac{\rho}{n} \cdot \frac{\partial F(c)}{\partial c} = \frac{v_a}{v_s}$$

$F(c)$

η ισόθερμη προσρόφηση

v_a

η ταχύτητα ροής του υπόγειου ύδατος

v_s

η ταχύτητα μεταφοράς ρύπων

$$R_d = 1 + K_d \cdot \frac{\rho}{n}$$

ρ

η αντιπροσωπευτική πυκνότητα

n

το πορώδες

R_d

ο παράγων καθυστέρησης

K_d

ο λόγος των συγκεντρώσεων των ρύπων που έχουν ροφηθεί προς αυτές της υδατικής φάσης.

- Χουμικά Υλικά – Προσρόφηση

Σύλληψη των ιόντων των μετάλλων - Προσρόφηση των οργανικών

ΚΟΣΤΟΣ ΤΩΝ PRBs

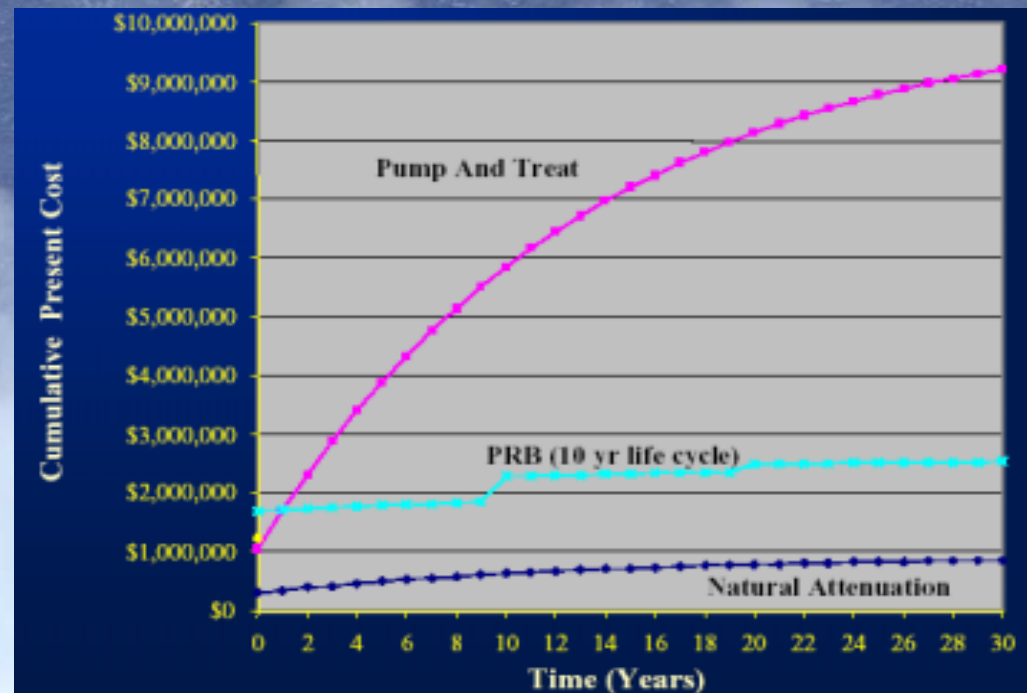
ΚΟΣΤΟΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

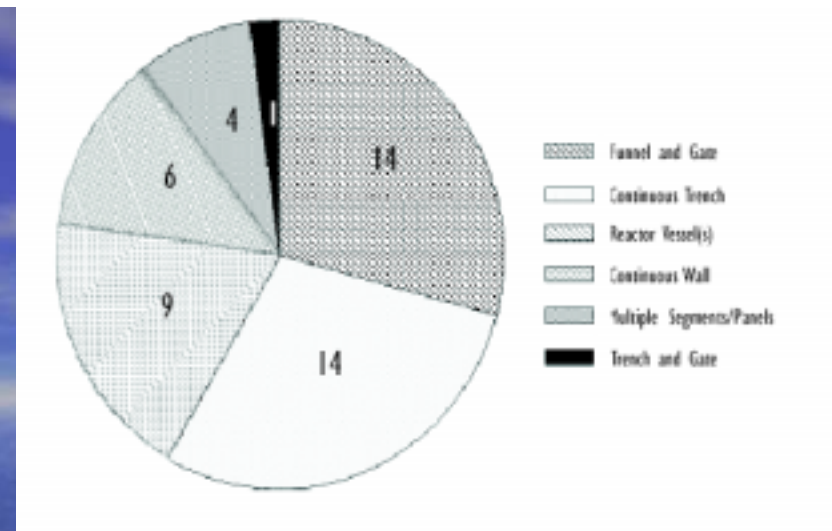
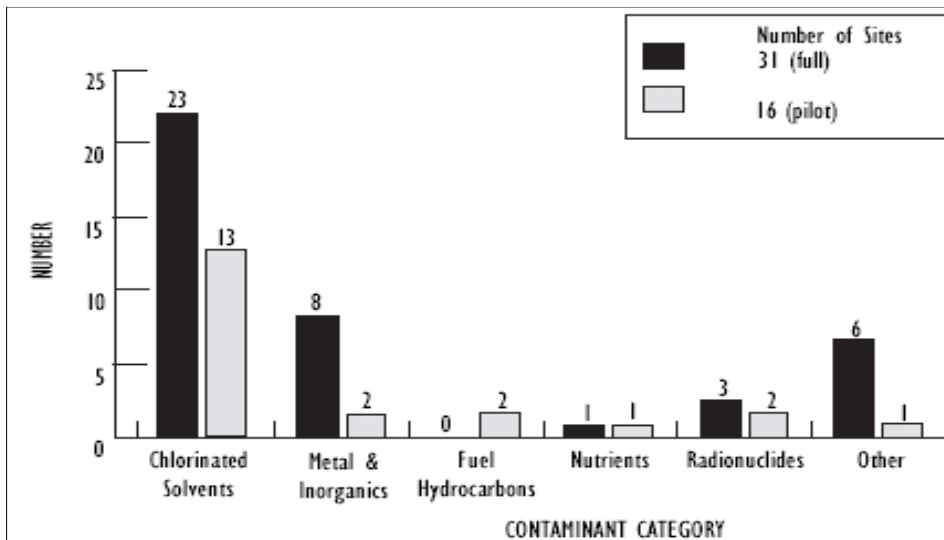
- Κόστος του αντιδρώντος μέσου
- Κόστος εγκατάστασης
- Κόστος δικαιωμάτων τεχνολογικής άδειας
- Κόστος διάθεσης και αποκατάστασης της εδαφικής επιφάνειας

+

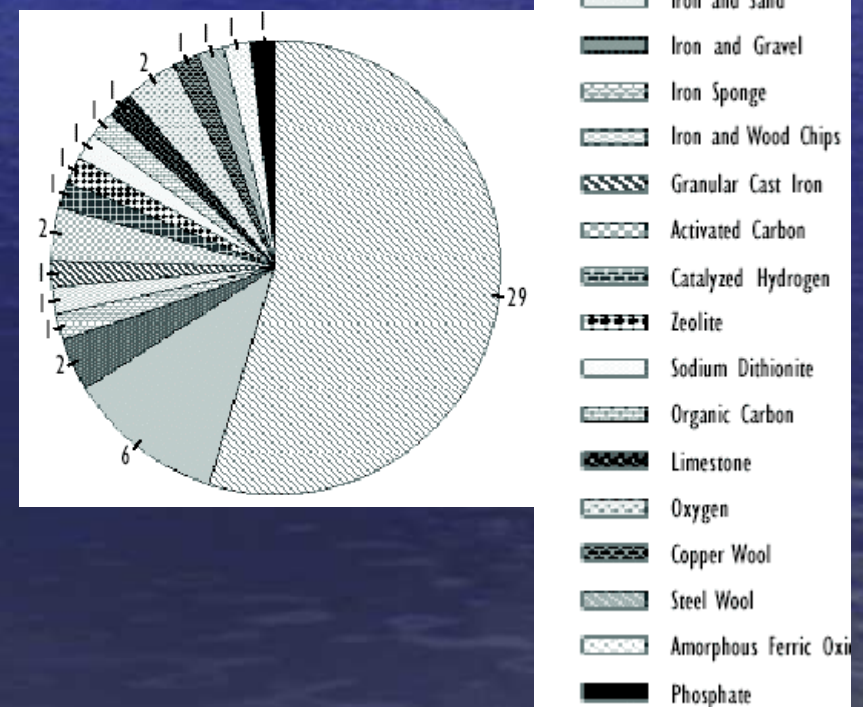
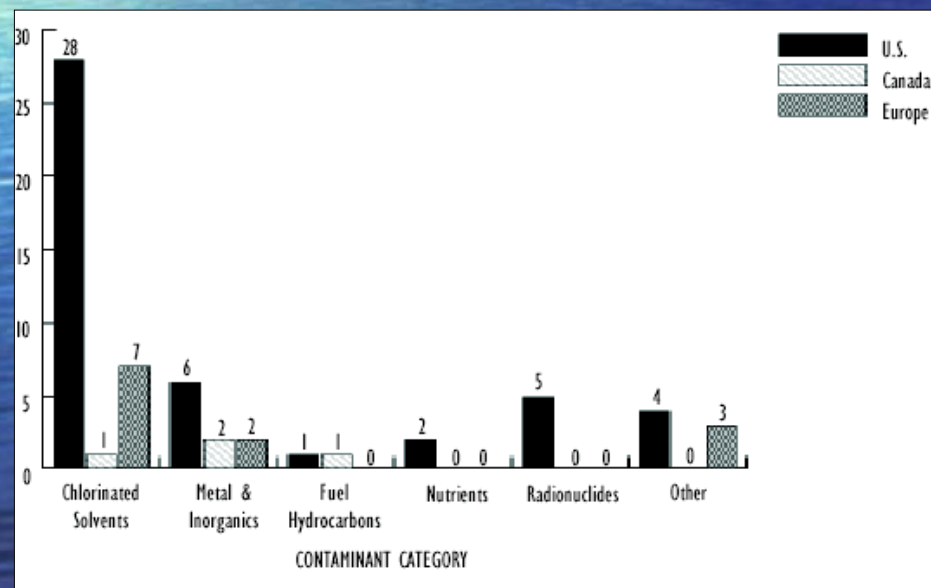
ΚΟΣΤΟΣ Λ & Σ

- Κόστος παρακολούθησης
- Κόστος συμπληρωματικής παρακολούθησης
- Κόστος περιοδικής συντήρησης





ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ PRBs



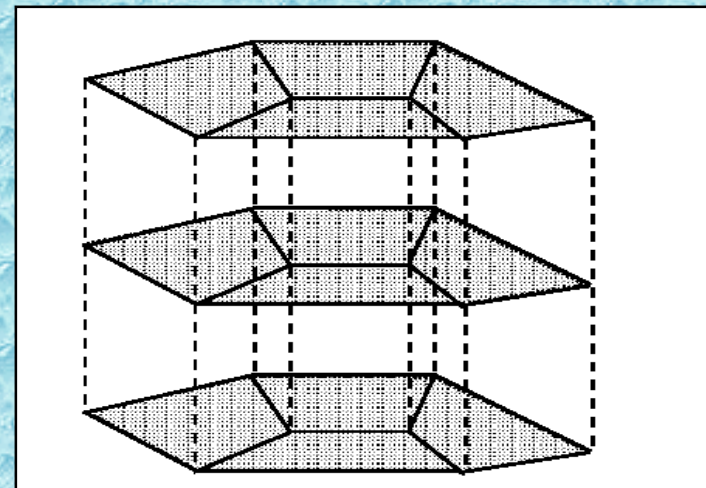
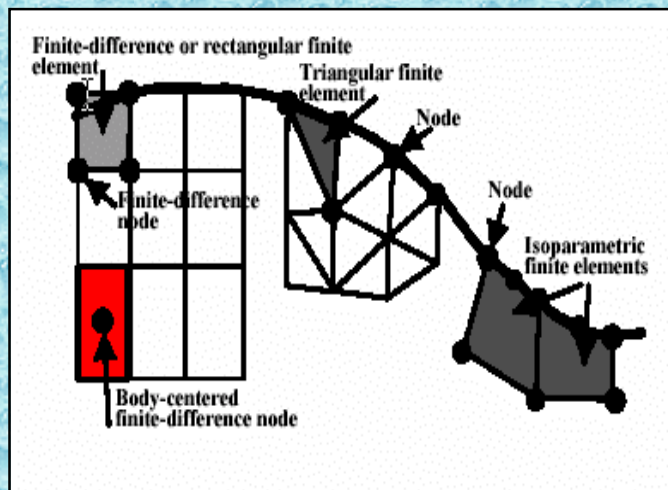
ARGUS ONE Student – ΚΩΔΙΚΑΣ PTC

PTC – (Princeton Transport Code) Τρισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και διαφορών για τη μοντελοποίηση ροής και μεταφοράς μάζας .

ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ
ΚΩΔΙΚΑΣ

Οριζόντιο πρόβλημα (Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων)

Κάθετο πρόβλημα (Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών)



ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΡΤΣ

Εξίσωση Ροής

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

Νόμος του Darcy

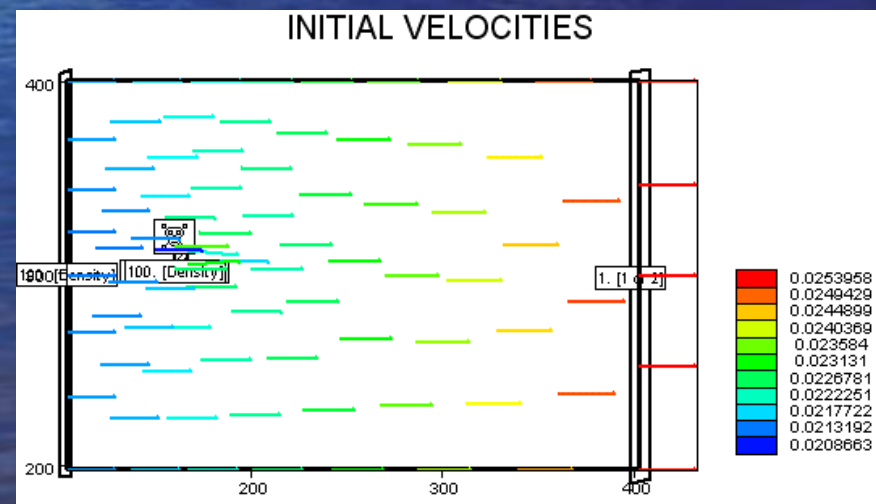
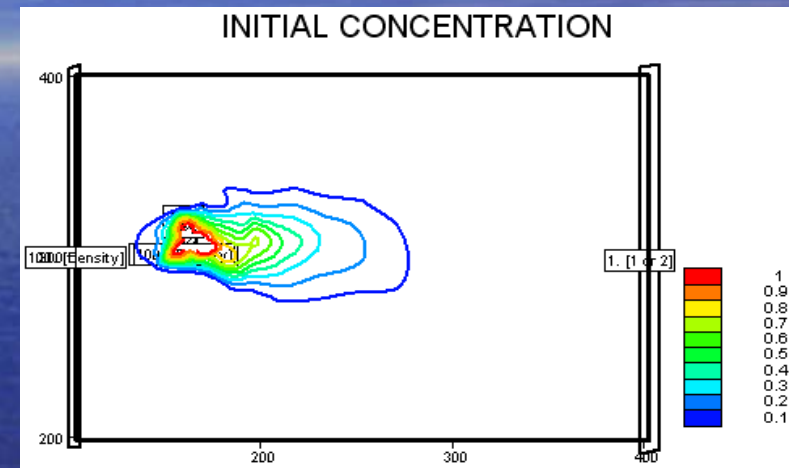
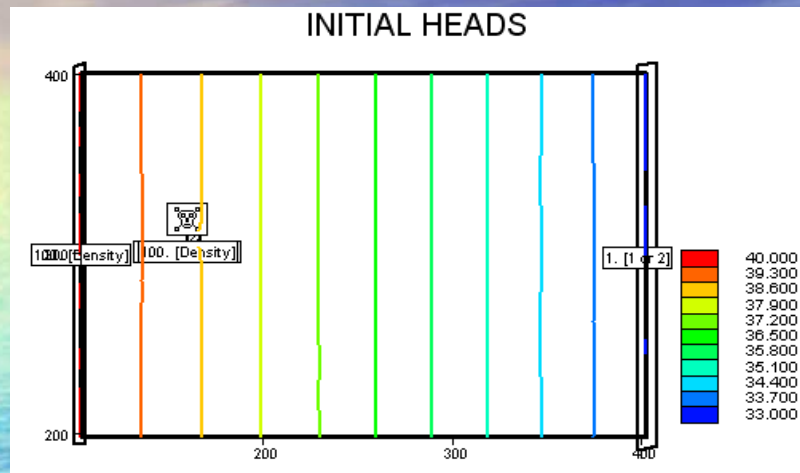
$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

Εξίσωση Μεταφοράς Μάζας

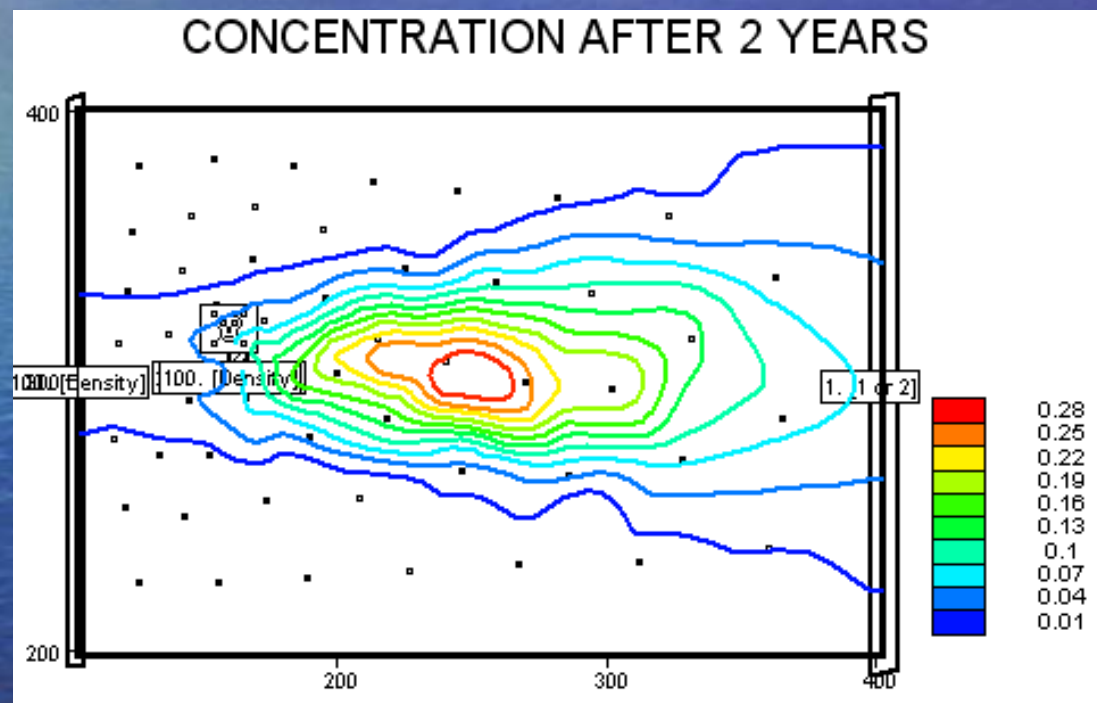
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ + Q(c^w - c) - \theta[1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned}$$

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ 'FUNNEL & GATE' ΣΕ ΦΑΝΤΑΣΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΡΥΤΑΣΜΕΝΟΥ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

Αρχική Κατάσταση Περιοχή



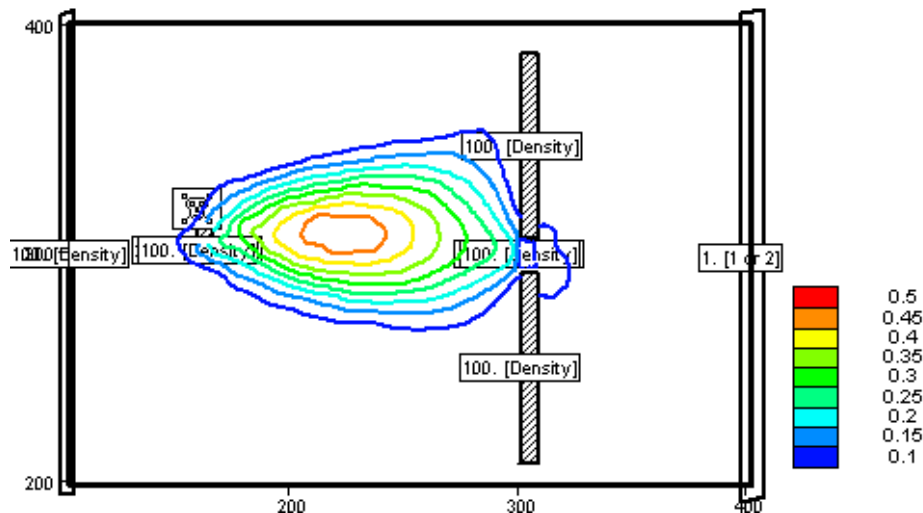
Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετα Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή



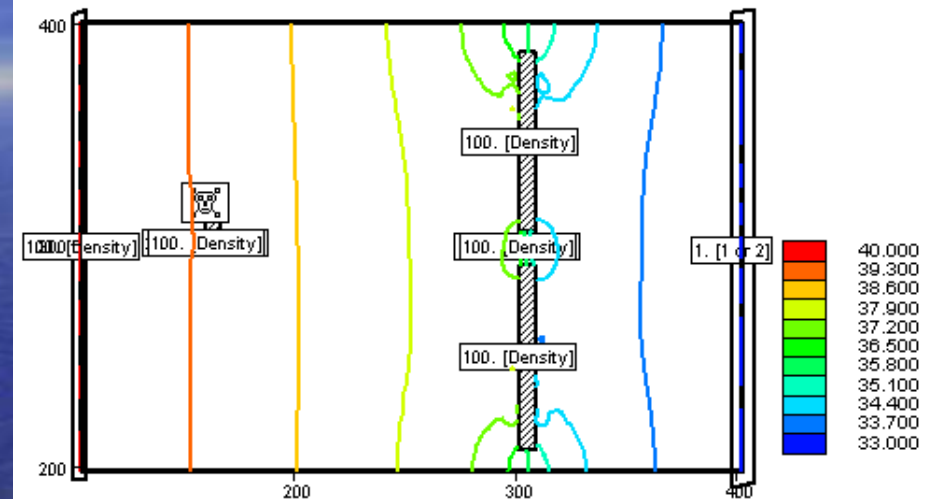
Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετα Από Την Στιγή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή- Εφαρμογή 'Funnel & Gate'

ΔΙΟΔΟΣ 14 m

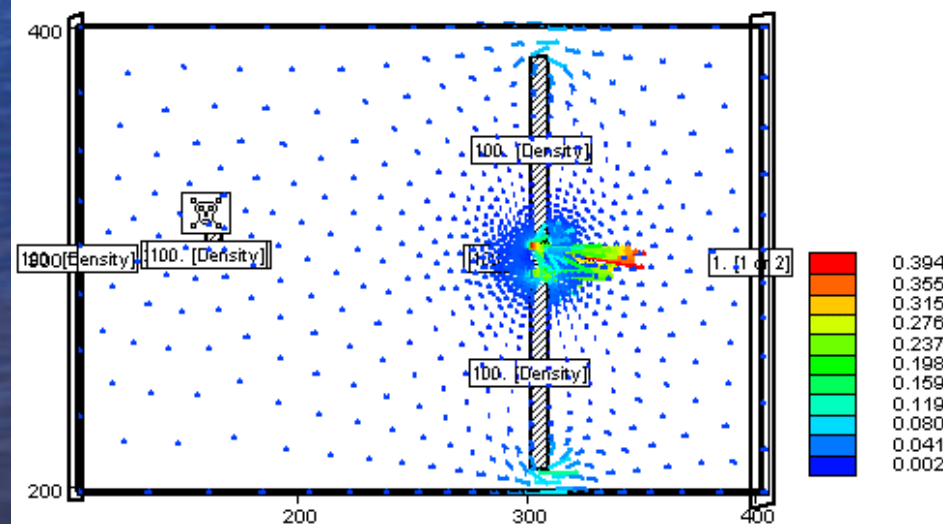
CONCENTRATIONS " FUNNEL AND GATE "



HEADS " FUNNEL AND GATE "



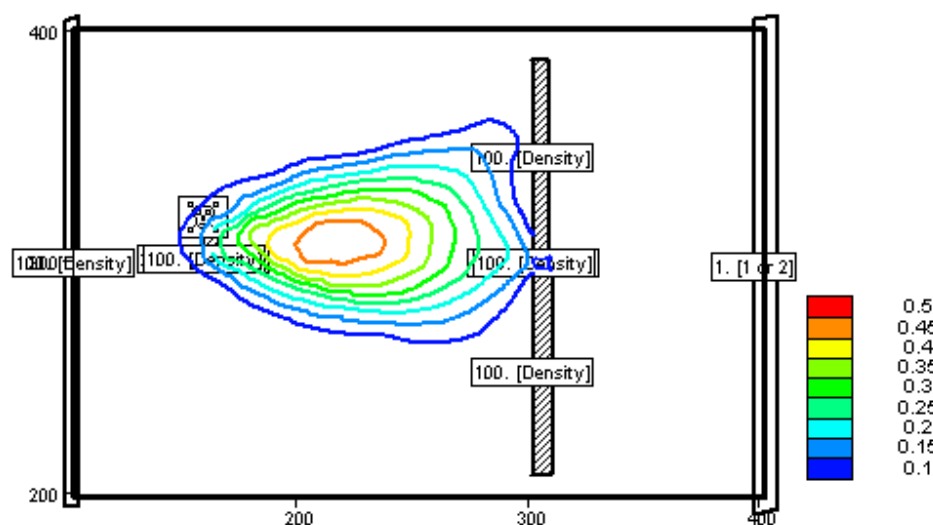
VELOCITIES " FUNNEL AND GATE "



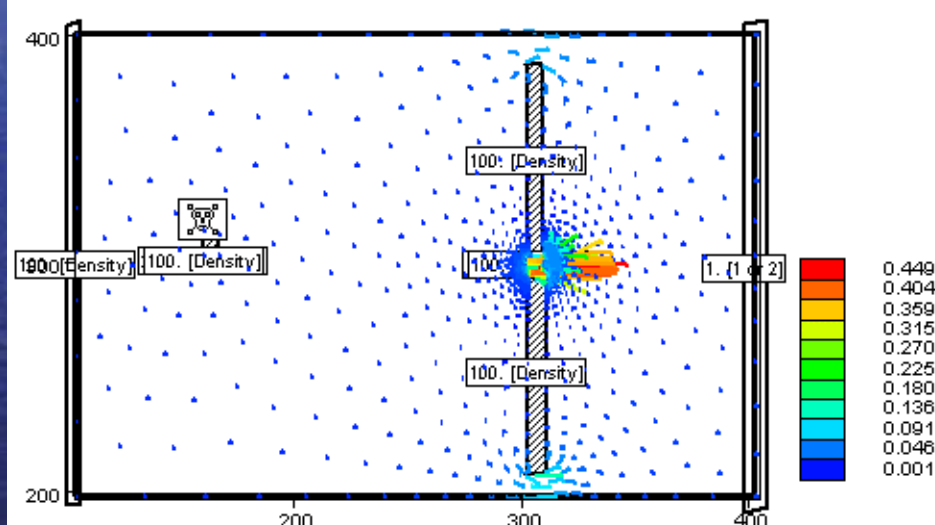
Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετα Από Την Στιγή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή- Εφαρμογή 'Funnel & Gate'

ΔΙΟΔΟΣ 5 m

CONCENTRATIONS " FUNNEL AND GATE "



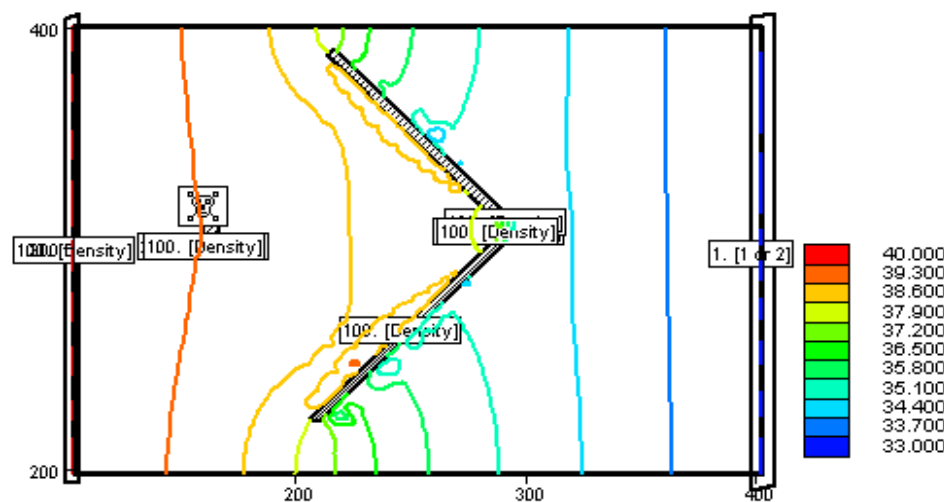
VELOCITIES "FUNNEL AND GATE "



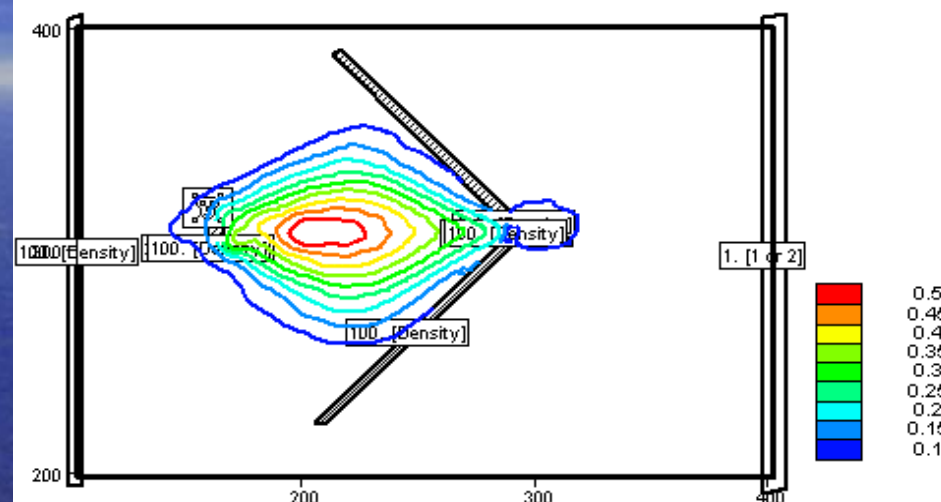
Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετά Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή- Εφαρμογή 'Funnel & Gate'

ΦΡΑΓΜΑ ΣΕ ΓΩΝΙΑ & ΔΙΟΔΟΣ 10 m

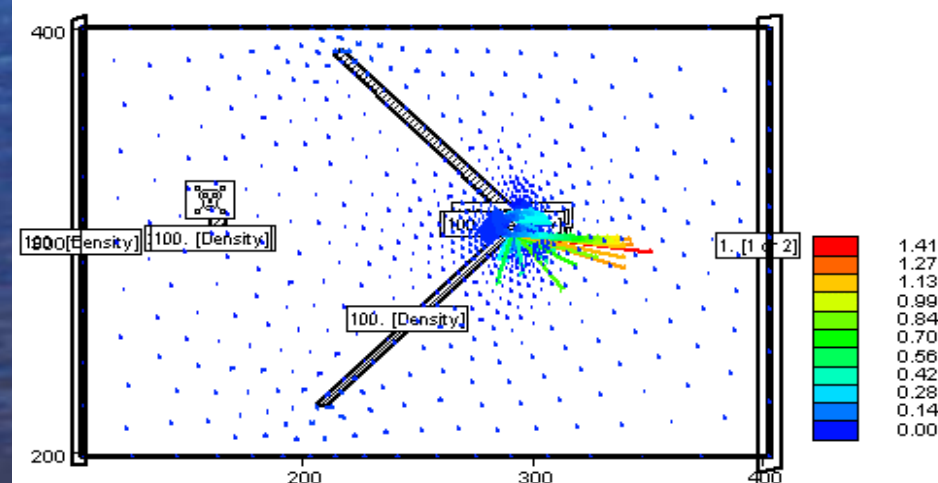
HEADS " FUNNEL & GATE "



CONCENTRATIONS " FUNNEL & GATE "



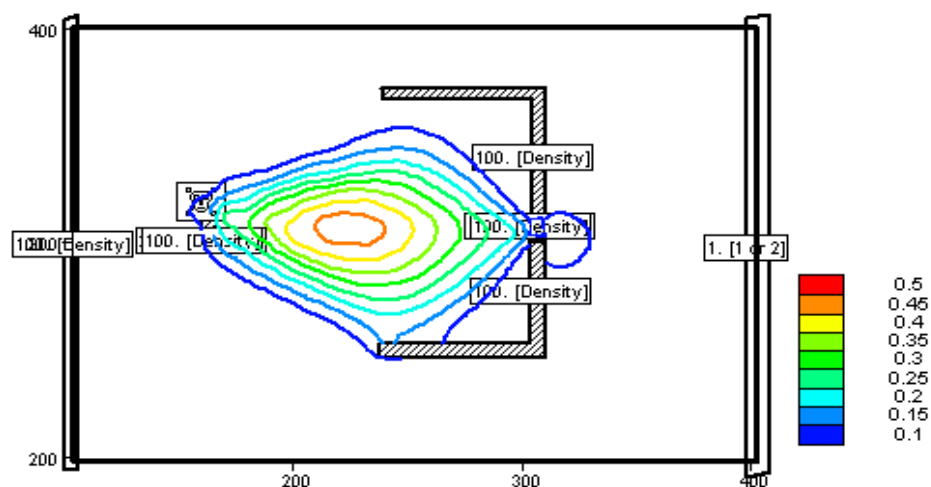
VELOCITIES " FUNNEL & GATE "



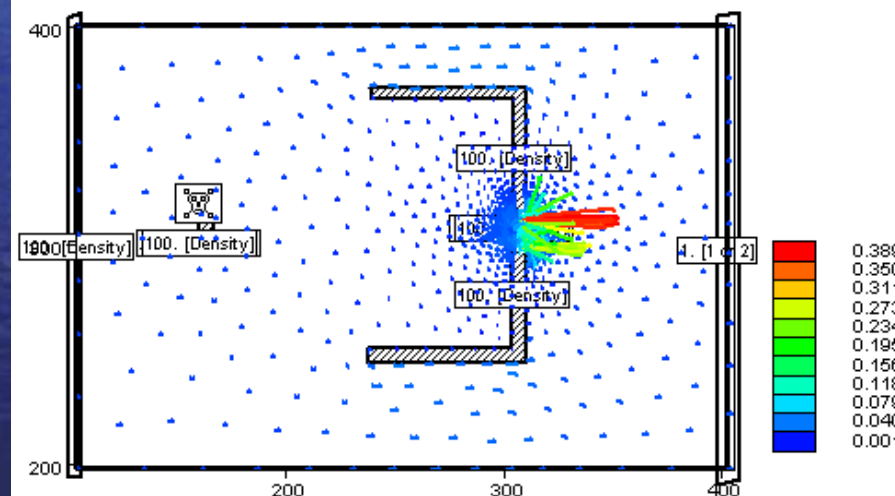
Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετα Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή- Εφαρμογή 'Funnel & Gate'

ΦΡΑΓΜΑ 'U' & ΔΙΟΔΟΣ 10 m

CONCENTRATIONS " U- FUNNEL AND GATE "



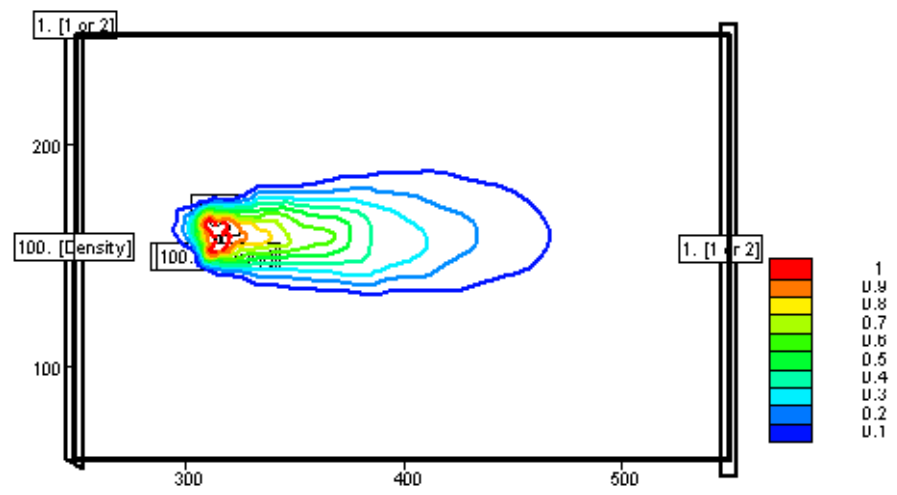
VELOCITIES " U-FUNNEL AND GATE "



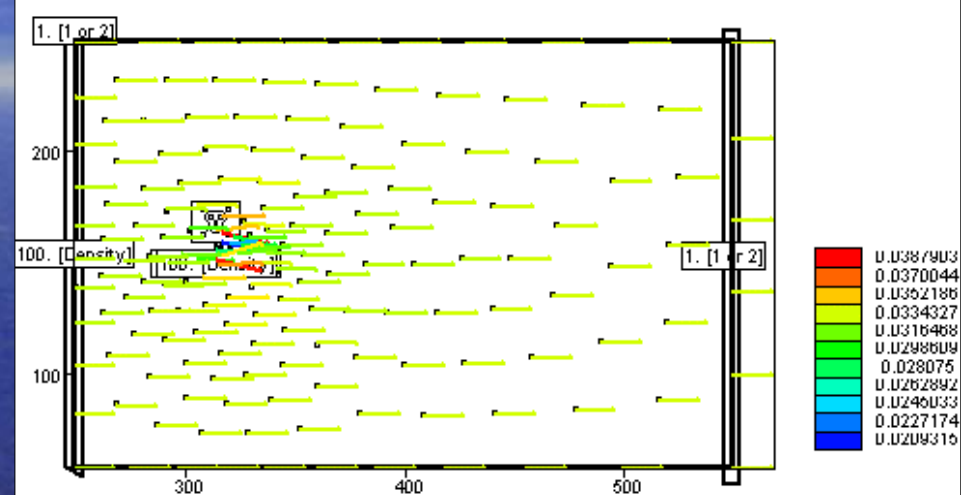
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ 'FUNNEL & GATE' ΣΕ ΦΑΝΤΑΣΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΡΥΤΤΑΣΜΕΝΟΥ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

Αρχική Κατάσταση Περιοχή

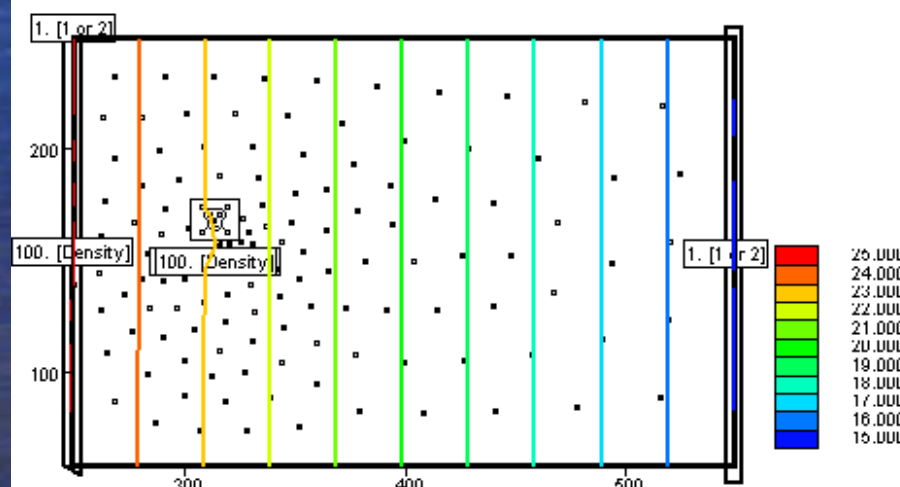
INITIAL CONCENTRATIONS



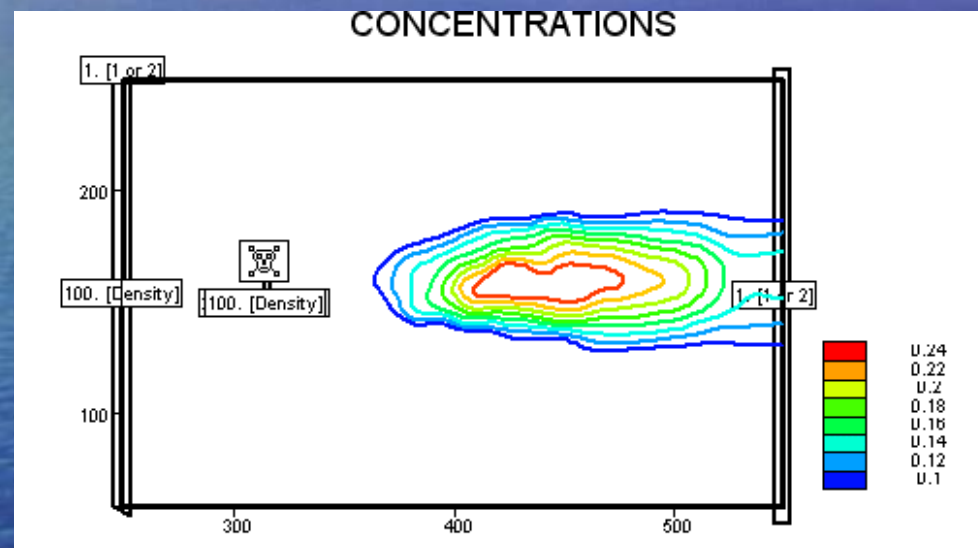
INITIAL VEL



INITIAL HEADS

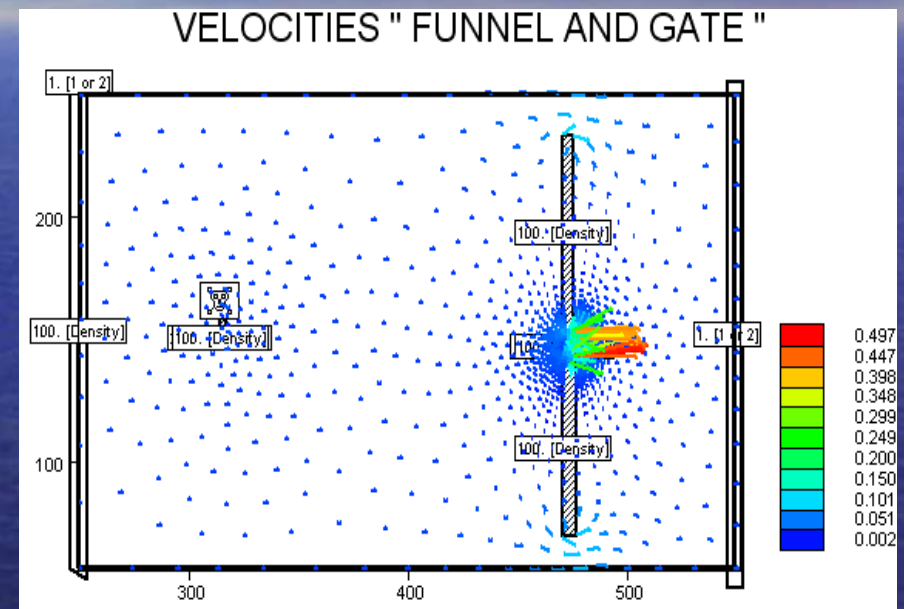
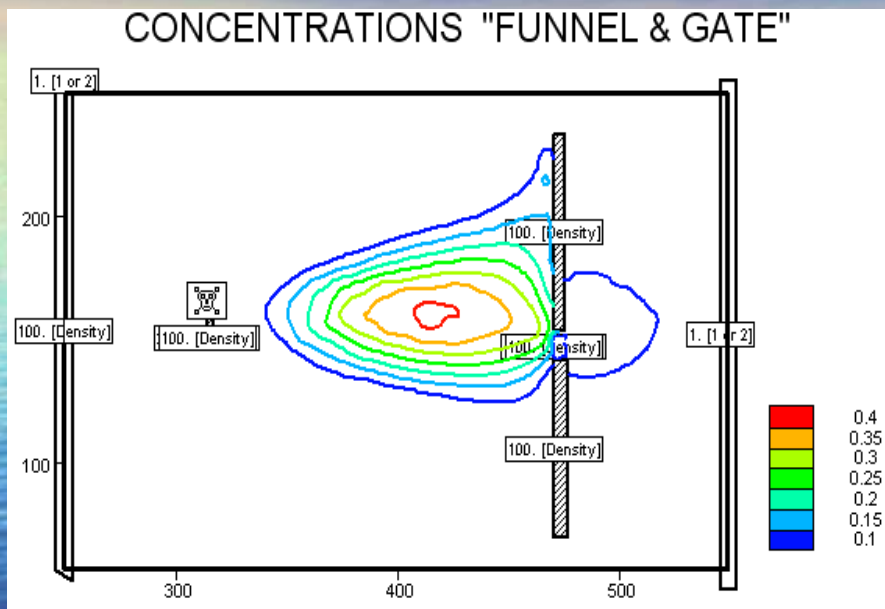


Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετά Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή



Κατάσταση Περιοχής 2 Χρόνια Μετα Από Την Στιγμή Που Η Πηγή Σταμάτησε Να Ρυπαίνει Την Περιοχή

'Funnel & Gate'



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΤΟΥ ΦΑΝΤΑΣΤΙΚΟΥ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

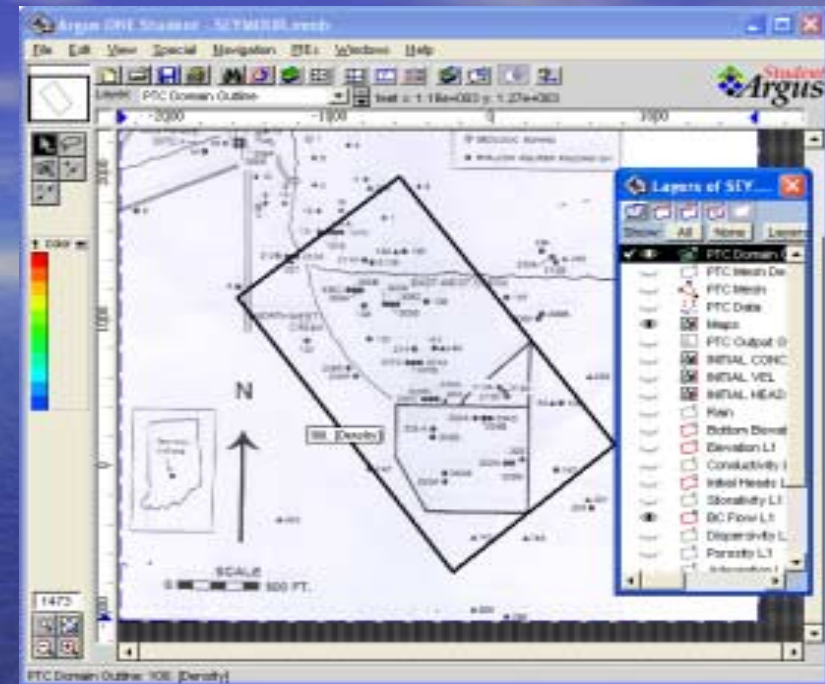
- ✓ Τα αποτελέσματα του ελεύθερου υδροφορέα είναι όμοια με αυτά του περιορισμένου
- ✓ Τα συστήματα επιτυγχάνουν τους στόχους εξυγίανσης :
 - Περιορισμός του ρυπασμένου πλουμίου
 - Σταδιακή εξυγίανση της περιοχής
- ✓ Τα υδραυλικά ύψη της περιοχής δεν αλλάζουν σημαντικά
- ✓ Οι ταχύτητες του υπόγειου νερού δεν αλλάζουν σημαντικά, εκτός από τις Διόδους
- ✓ Για δοσμένο μήκος αδιαπέρατων τοίχων η βέλτιστη διάταξη είναι τα φράγματα σε ευθεία (Μικρότερο κόστος - Καλύτερα αποτελέσματα εξυγίανσης)

ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΤΟΥ ΡΥΠΑΣΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΒΤΕΧ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΕΥΜΟΥΡ



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

- Ελεύθερος Υδροφόρας
- Αμμώδης
- Έκχυση ρύπων για δύο χρόνια
- Συγκέντρωση BTEX 50 $\mu\text{g/l}$ (Βενζόλιο)

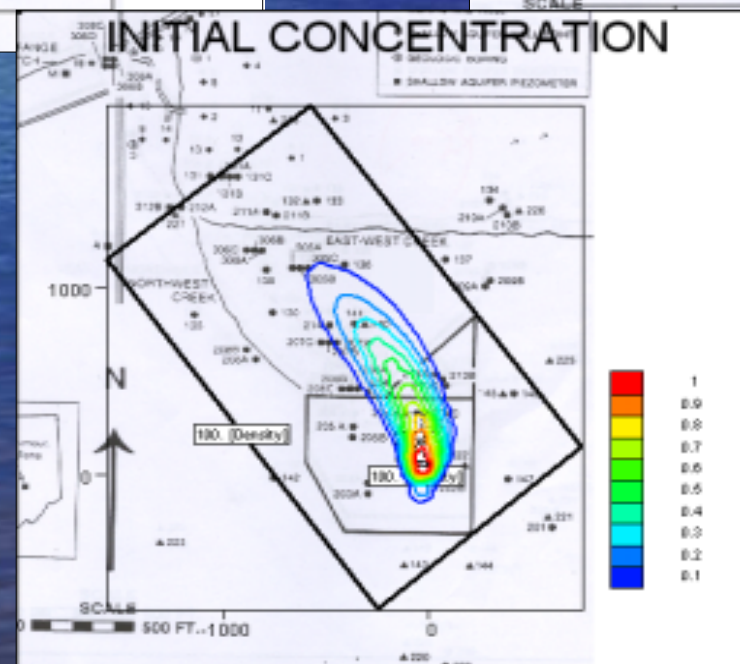
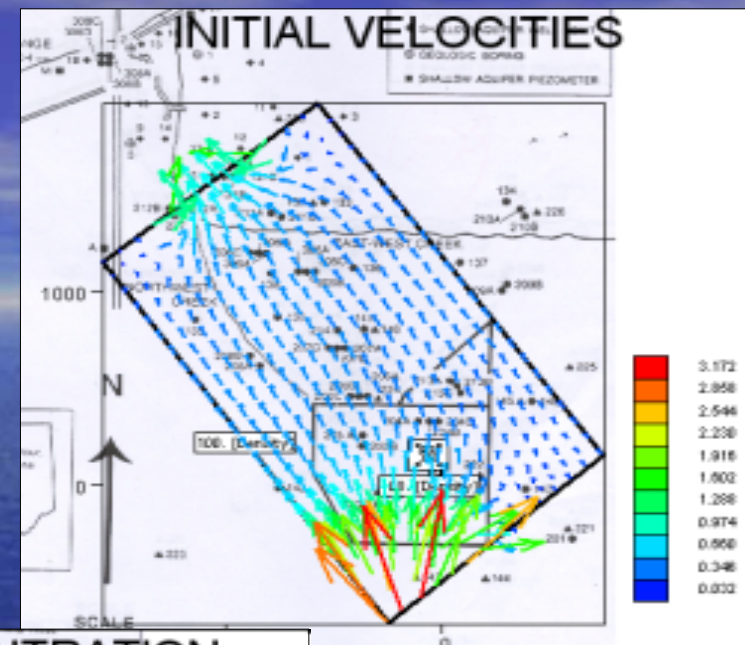
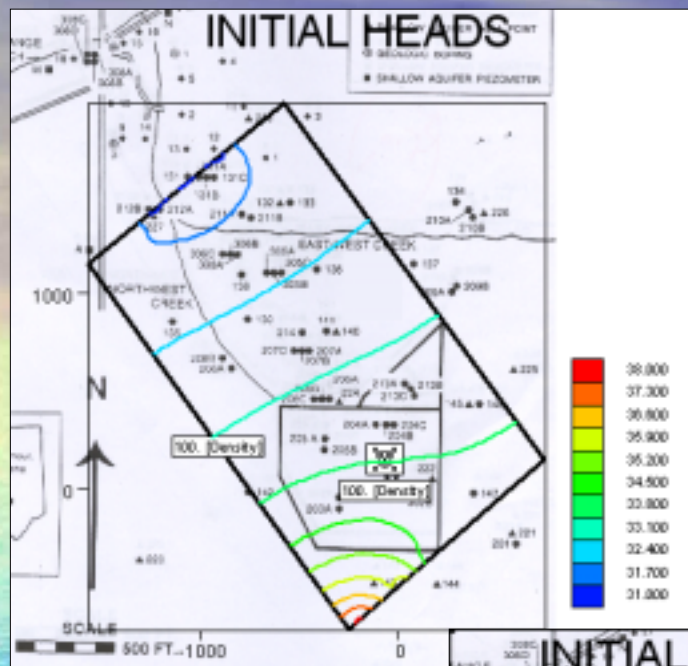


Porosity L1	0.35
Storativity L1	0.4
Initial Concentration L1 (gr / ft ³)	0
Rain (ft / day)	0
Conductivity L1 x / y / z (ft / day)	283.5 / 283.5 / 28.35
Dispersivity L1 x / y / z (ft)	6.56 / 6.56 / 0.656
Adsorption L1 x / y / z	0 / 0 / 0

Από δεδομένα ρηχών πηγαδιών

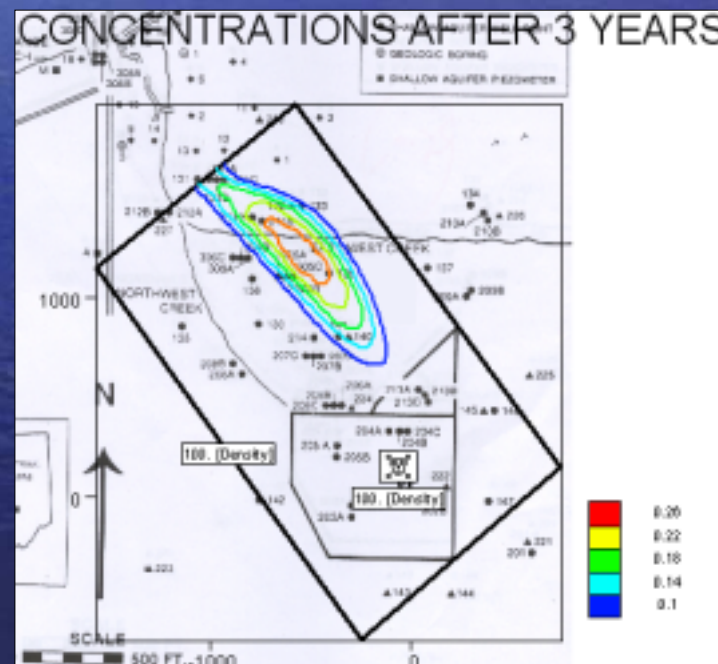
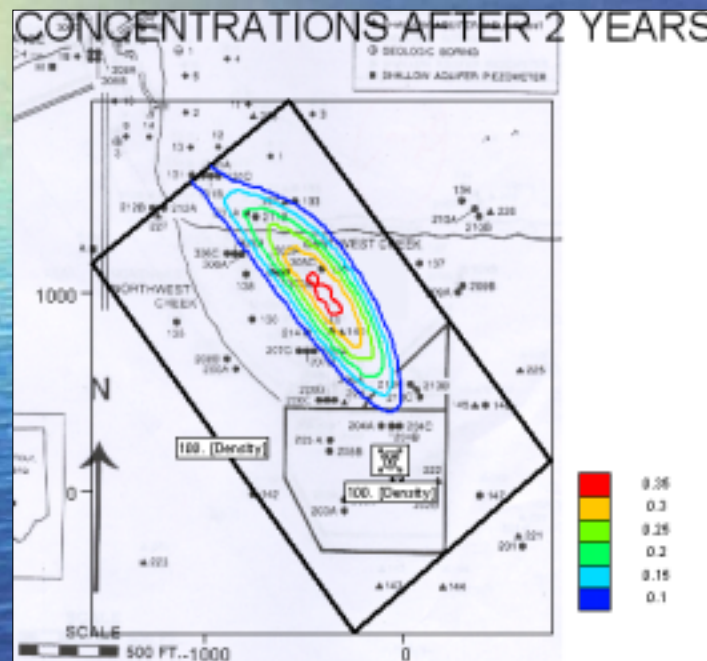
- Ανύψωση πυθμένα
- Επιφάνεια εδάφους
- Αρχικά υδραυλικά ύψη

ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

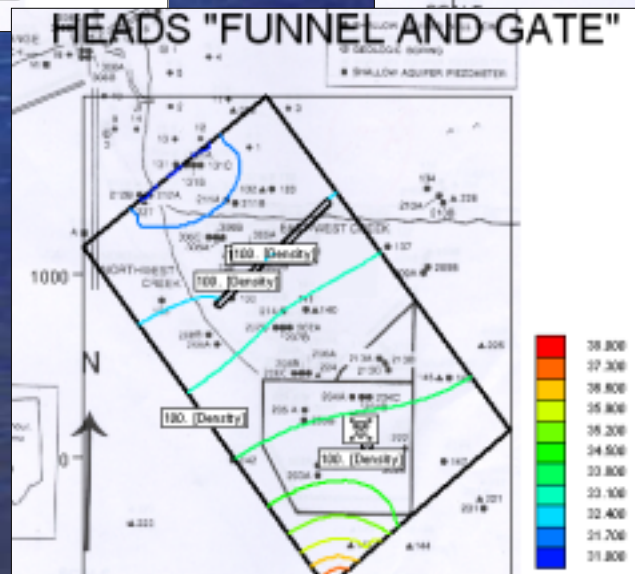
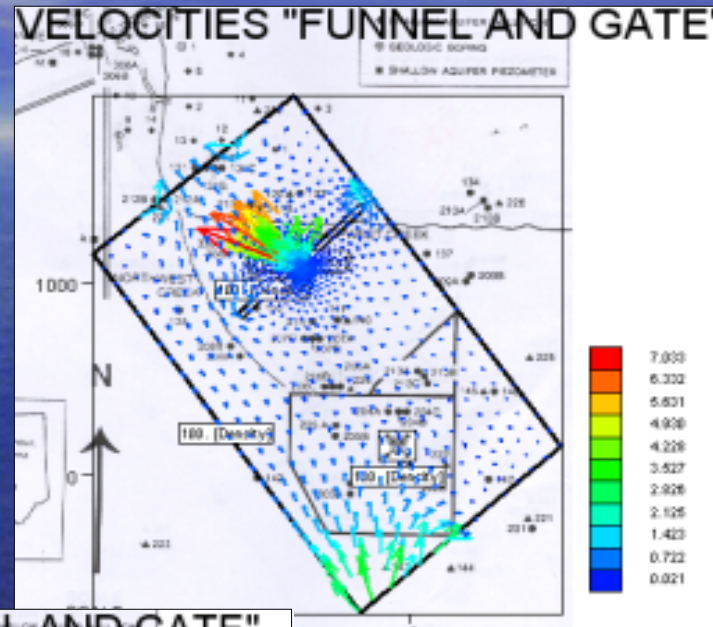
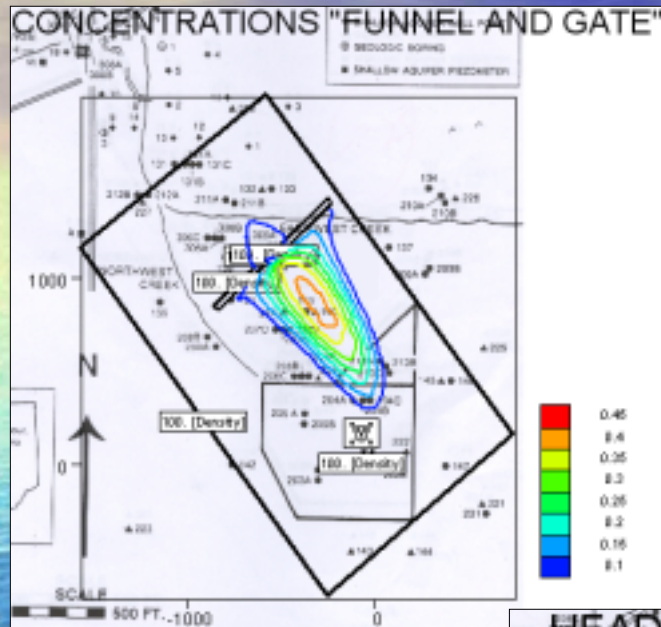


ΡΥΠΑΝΣΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ 2 ΚΑΙ 3 ΧΡΟΝΙΑ ΜΕΤΑ ΤΟ ΤΕΛΟΣ ΕΚΧΥΣΗΣ ΡΥΠΩΝ

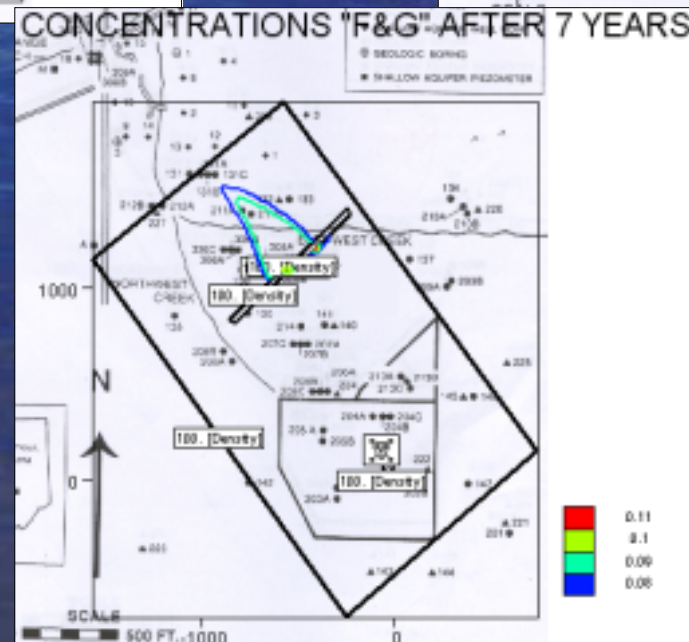
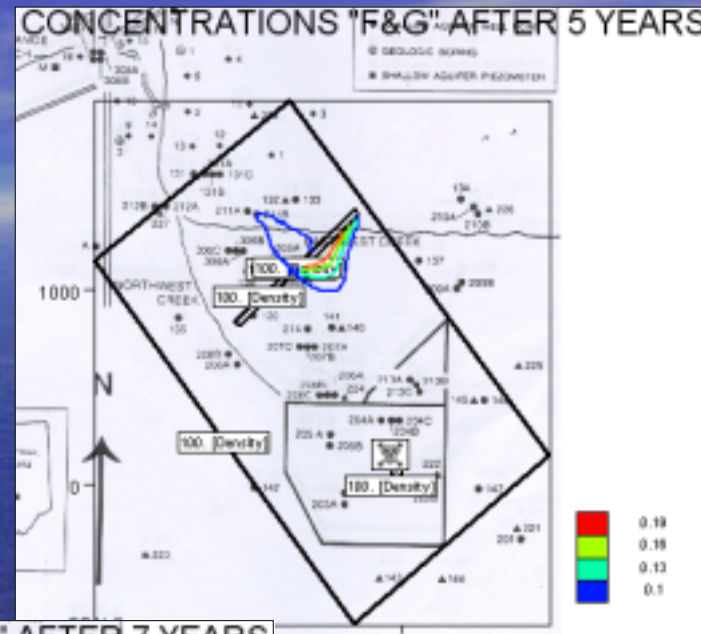
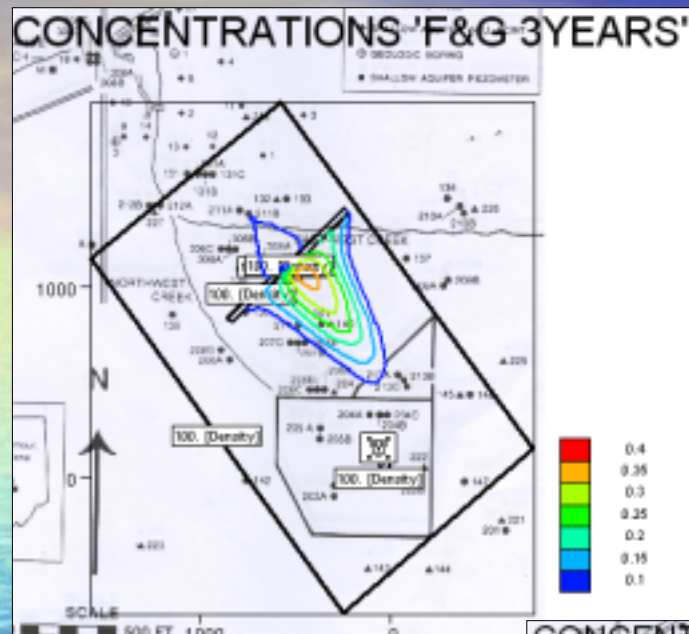
ΚΑΝΕΝΑ ΜΕΤΡΟ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ



ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ 2 ΧΡΟΝΙΑ ΜΕΤΑ ΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΗΣ ΕΚΧΥΣΗΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΚΑΙ ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ "FUNNEL AND GATE"



ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ 3, 5 ΚΑΙ 7 ΧΡΟΝΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ



ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΣΤΗ ΔΙΟΔΟ

- $Q = V_{GATE} / \tau$
- $Q = K * i * A$
- $v = (K * i) / n_e$

$$n_e = 0,35$$

$$K = 283,5 \text{ ft/d}$$

$$v = 0.5 \text{ ft/d}$$

$$i = 6,17 \times 10^{-4}$$

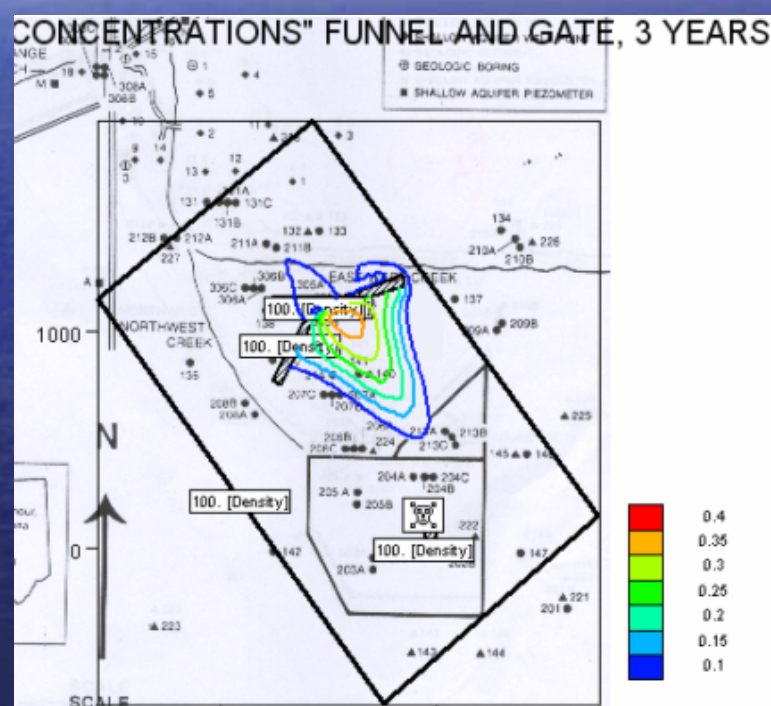
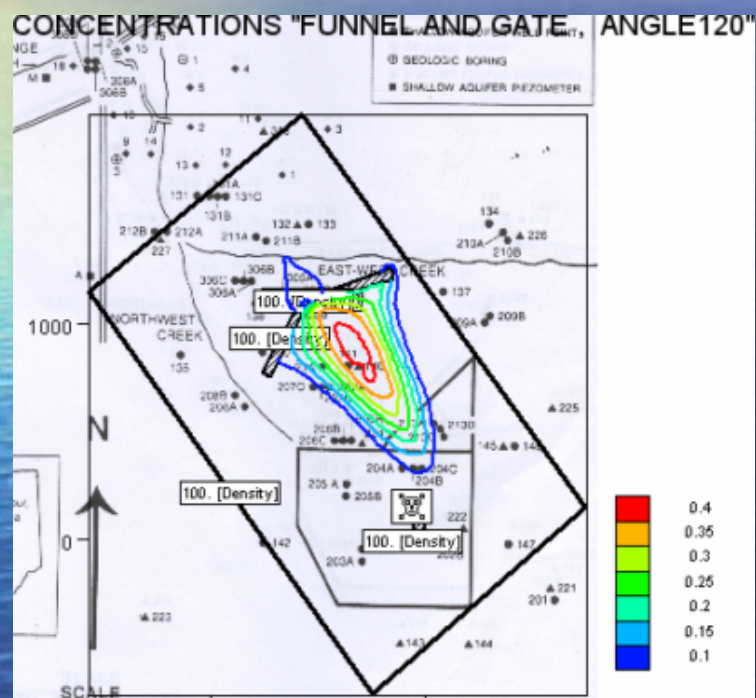
$$A = (2 \times 400 + 60) \text{ ft} \times 32 \text{ ft} \rightarrow A = 27520 \text{ ft}^2$$

$$Q = 4815 \text{ ft}^3/\text{d}$$

$$V_{Gate} = 32 \times 60 \times 10 = 19200 \text{ ft}^3$$

$$\tau = 4 \text{ ημέρες}$$

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ 2 ΚΑΙ 3 ΧΡΟΝΙΑ ΜΕΤΑ ΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΗΣ ΕΚΧΥΣΗΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΚΑΙ ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ "FUNNEL AND GATE ΜΕ ΓΩΝΙΑ"



COPYRIGHT 1998 JOHN PETRAK
WWW.OCEANPHOTOS.COM

ΚΑΛΕΣ ΒΟΥΤΙΕΣ !!!

