



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ**

**Τι μπορεί να πετύχει η Παρακολουθούμενη Φυσική  
Εξασθένηση σε χώρους ρυπασμένους με  
χλωροαιθένια**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

της

**ΑΡΙΑΔΝΗΣ ΕΛΜΑΛΟΓΛΟΥ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ:**

Μαρίνα Πανταζίδου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Αύγουστος 2014









ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

**Τι μπορεί να πετύχει η Παρακολουθούμενη Φυσική  
Εξασθένηση σε χώρους ρυπασμένους με  
χλωροαιθένια**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

**ΑΡΙΑΔΝΗΣ ΕΛΜΑΛΟΓΛΟΥ**  
**A.M.: 01107026**

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

1. Μαρίνα Πανταζίδου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Ε.Μ.Π. (επιβλέπουσα)

2. Δανιήλ Μαμάης

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή  
Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

3. Νυμφοδώρα Παπασιώπη

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τομέας Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών, Σχολή  
Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Αύγουστος 2014

**ΕΛΜΑΛΟΓΛΟΥ ΑΡΙΑΔΝΗ**

© 2014 – All rights reserved

## Ευχαριστίες

Το θέμα της διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε από την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π. κ. Μαρίνα Πανταζίδου, την οποία θέλω να ευχαριστήσω τόσο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, ολοκληρώνοντας έτσι με τον καλύτερο τρόπο τον κύκλο των προπτυχιακών μου σπουδών, όσο και για την επιστημονική καθοδήγηση, την ουσιαστική επίβλεψη και την αμέριστη υποστήριξη που μου παρείχε.

Ακόμη, θα ήθελα να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στην επιτροπή εξέτασης της διπλωματικής εργασίας, και συγκεκριμένα στον κ. Δανιήλ Μαμάη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και στην κ. Νυμφοδώρα Παπασιώπη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών Ε.Μ.Π..

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την ηθική και συναισθηματική υποστήριξη που μου προσέφεραν. Ευχαριστώ επίσης τους φίλους μου από τη συντονιστική ομάδα του forum της σχολής [www.mqh.gr](http://www.mqh.gr) για την κοινή πολυετή μας πορεία στη συνδιαχείριση του site και την πολύτιμη βοήθεια τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Κλείνοντας, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, Σταμάτη και Άννα, και στην αδελφή μου Κωνσταντίνα για την υπομονή τους και την υποστήριξη που μου προσφέρουν σε κάθε προσπάθειά μου όλα αυτά τα χρόνια.





# Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη .....	xix
Abstract .....	xxi
<b>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1 Αντικείμενο διπλωματικής .....	2
1.2 Οργάνωση κειμένου .....	4
<b>Κεφάλαιο 2 Θεωρητικό Υπόβαθρο.....</b>	<b>7</b>
2.1 Παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση.....	7
2.1.1 Η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση στο πρόγραμμα Superfund .....	9
2.2 Οι χλωριωμένοι διαλύτες ως ρύποι στο υπέδαφος .....	10
2.2.1 Φυσική εξασθένηση χλωριωμένων διαλυτών.....	12
2.3 Συμπερασματικά σχόλια.....	15
<b>Κεφάλαιο 3 Φυσική εξασθένηση χλωροαιθενίων στο πεδίο .....</b>	<b>17</b>
3.1 Συμπεράσματα από υπάρχουσες συλλογές περιστατικών.....	17
3.2 Συλλογή περιστατικών όπου η αποκατάσταση με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση έχει ολοκληρωθεί .....	21
3.2.1 Παρουσίαση δεδομένων .....	21
3.2.2 Επεξεργασία δεδομένων .....	33
3.3 Βιβλιογραφική Έρευνα - Πηγές .....	36
3.4 Κριτήρια επιλογής περιστατικών προς ανάλυση με το λογισμικό BIOCHLOR.....	38
3.5 Συμπερασματικά σχόλια.....	39
<b>Κεφάλαιο 4 Το λογισμικό φυσικής εξασθένησης BIOCHLOR .....</b>	<b>41</b>
4.1 Μαθηματικό μοντέλο .....	42
4.2 Δεδομένα εισόδου στο BIOCHLOR .....	44
4.3 Δεδομένα εξόδου του BIOCHLOR .....	48
4.3.1 Υπολογισμός της προβλεπόμενης εξάπλωσης των χλωροαιθενίων σε μια δεδομένη χρονική στιγμή.....	49
4.3.2 Υπολογισμός των συντελεστών βιομετασχηματισμού κάθε χλωροαιθενίου για συγκεκριμένο περιστατικό .....	49

4.3.3	Υπολογισμός του χρόνου (TOS) και της απόστασης σταθεροποίησης (DOS) της ρύπανσης του υπογείου νερού με χλωροαιθένια.....	50
4.3.4	Υπολογισμός χρόνου αποκατάστασης (TOR) .....	50
4.4	Παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου BIOCHLOR στο περιστατικό ρύπανσης υπεδάφους με χλωροαιθένια: Πολεμική Αεροπορική Βάση στη Φλόριντα (Cape Canaveral Air Force Station, Facility 1381).....	51
4.4.1	Ο χώρος.....	51
4.4.2	Αίτια ρύπανσης και τύπος ρύπου.....	51
4.4.3	Χαρακτηριστικά υπεδάφους .....	51
4.4.4	Έκταση ρύπανσης.....	53
4.4.5	Έργα αποκατάστασης .....	54
4.4.6	Προσομοίωση με το λογισμικό BIOCHLOR .....	55
4.5	Συμπερασματικά σχόλια.....	64

**Κεφάλαιο 5 Εφαρμογή λογισμικού BIOCHLOR σε καταγεγραμμένα περιστατικά παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης ..... 65**

5.1	Περιστατικό ρύπανσης υπεδάφους με χλωροαιθένια: Αυτοκινητοβιομηχανία στο Μίσιγκαν (Bendix Corporation/Allied Automotive).....	67
5.1.1	Ο χώρος.....	67
5.1.2	Αίτια ρύπανσης και τύπος ρύπου.....	68
5.1.3	Χαρακτηριστικά υπεδάφους .....	71
5.1.4	Έκταση ρύπανσης.....	73
5.1.5	Έργα αποκατάστασης .....	74
5.1.6	Προσομοίωση με το λογισμικό BIOCHLOR .....	75
5.1.7	Σύνοψη-Συμπεράσματα .....	92
5.2	Περιστατικό ρύπανσης υπεδάφους με χλωροαιθένια: Πρώην αεροπορική βάση England στη Λουιζιάνα (Site SS-45).....	94
5.2.1	Ο χώρος.....	94
5.2.2	Αίτια ρύπανσης και τύπος ρύπου.....	94
5.2.3	Χαρακτηριστικά υπεδάφους .....	95
5.2.4	Έκταση ρύπανσης.....	95
5.2.5	Έργα αποκατάστασης .....	97
5.2.6	Προσομοίωση με το λογισμικό BIOCHLOR .....	98

5.2.7	Αναλύσεις ευαισθησίας .....	109
5.2.8	Σύνοψη-Συμπεράσματα .....	112
5.3	Περιστατικό ρύπανσης υπεδάφους με χλωροαιθένια: Αεροπορική Βάση Tinker στην Οκλαχόμα (Site FTA-2).....	113
5.3.1	Ο χώρος.....	113
5.3.2	Αίτια ρύπανσης και τύπος ρύπου.....	113
5.3.3	Χαρακτηριστικά υπεδάφους .....	115
5.3.4	Έκταση ρύπανσης.....	116
5.3.5	Έργα αποκατάστασης .....	117
5.3.6	Προσομοίωση με το λογισμικό BIOCHLOR .....	118
5.3.7	Αναλύσεις ευαισθησίας .....	130
5.3.8	Σύνοψη-Συμπεράσματα .....	132
5.4	Σύνοψη αποτελεσμάτων-Συμπερασματικά σχόλια .....	133
<b>Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα .....</b>		<b>137</b>
6.1	Κύρια ευρήματα .....	137
6.2	Μελλοντικές επεκτάσεις.....	139
<b>Βιβλιογραφία .....</b>		<b>141</b>
	Διεθνής Βιβλιογραφία.....	141
	Ελληνική Βιβλιογραφία.....	150
<b>Παράρτημα Α: Μέθοδος Buscheck &amp; Alcantar (1995) .....</b>		<b>151</b>
<b>Παράρτημα Β: Υπολογισμός κατακόρυφης εγκάρσιας διάστασης (πάχους) της πηγής για την προσομοίωση του χώρου Bendix.....</b>		<b>153</b>
<b>Ελληνοαγγλικό γλωσσάρι τεχνικών όρων.....</b>		<b>155</b>
<b>Αγγλοελληνικό γλωσσάρι τεχνικών όρων.....</b>		<b>159</b>

## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1 Κατάλογος χλωριωμένων διαλυτών (U.S. EPA, 2000e) .....	11
Πίνακας 3.1 Διάμεση τιμή της ταχύτητας μεταγωγής του υπόγειου νερού σε ρυπασμένους χώρους από τρεις βιβλιογραφικές πηγές .....	19
Πίνακας 3.2 Διάμεση τιμή του μήκους εξάπλωσης της ρύπανσης σε ρυπασμένους χώρους με χλωριωμένους διαλύτες από τρεις βιβλιογραφικές πηγές .....	19
Πίνακας 3.3 Μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις χλωριωμένων διαλυτών στο πόσιμο νερό (U.S. EPA, 2009a).....	22
Πίνακας 3.4 Παρουσίαση επιλεγμένων δεδομένων για 17 περιστατικά ολοκληρωμένης αποκατάστασης με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α.....	23
Πίνακας 3.5 Κατάλογος βιβλιογραφικών πηγών .....	37
Πίνακας 4.1 Επεξήγηση των συμβόλων της λύσης Domenico (1987).....	43
Πίνακας 4.2 Δεδομένα εισόδου του μοντέλου BIOCHLOR.....	45
Πίνακας 4.3 Συντελεστές βιομετασχηματισμού 1 <sup>ης</sup> τάξης χλωροαιθινίων από μελέτες στο πεδίο για συνθήκες αναγωγικής αποχλωρίωσης (Suarez & Rifai, 1999).....	47
Πίνακας 4.4 Συντελεστές απομείωσης 1 <sup>ης</sup> τάξης του TCE στην περιοχή της πηγής (Newell et al., 2006).....	47
Πίνακας 4.5 Παράμετροι που σχετίζονται με τα δεδομένα εξόδου λογισμικού BIOCHLOR	49
Πίνακας 4.6 Μετρήσεις συγκεντρώσεων σε φρέατα παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης περιοχής το 1996 .....	54
Πίνακας 4.7 Μετρήσεις συγκεντρώσεων σε φρέατα παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης περιοχής το 2001 .....	54
Πίνακας 4.8 Δεδομένα εισόδου στο BIOCHLOR για τη βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου.....	57
Πίνακας 4.9 Δεδομένα εισόδου του BIOCHLOR για τη βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου.....	64
Πίνακας 5.1 Μετρήσεις στάθμης υδροφόρου ορίζοντα (2001-05) και υπολογισμός μέσης υδραυλικής κλίσης.....	72
Πίνακας 5.2 Μέγιστες συγκεντρώσεις χλωροαιθινίων σε θέσεις δειγματοληψίας κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης .....	73
Πίνακας 5.3 Συντελεστές βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν από τους Weaver et al., (1996) .....	74

Πίνακας 5.4 Εκτίμηση της τιμής του κοινού συντελεστή υστέρησης των χλωροαιθενίων ....	76
Πίνακας 5.5 Δεδομένα εισόδου του BIOCHLOR για την εκτίμηση των συντελεστών βιομετασχηματισμού για το Σενάριο A.....	78
Πίνακας 5.6 Δεδομένα εισόδου του BIOCHLOR για την εκτίμηση των συντελεστών βιομετασχηματισμού για το Σενάριο B.....	86
Πίνακας 5.7 Μέσες συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν σε φρέατα παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 1997.....	97
Πίνακας 5.8 Μέσες συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν σε φρέατα παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 2000.....	97
Πίνακας 5.9 Εκτίμηση της τιμής του κοινού συντελεστή υστέρησης των χλωροαιθενίων ....	99
Πίνακας 5.10 Συγκεντρώσεις τριχλωροαιθενίου (TCE) που μετρήθηκαν στο φρέαρ παρακολούθησης της περιοχής της πηγής (SS45LOO1MW) .....	100
Πίνακας 5.11 Δεδομένα εισόδου του BIOCHLOR για τον υπολογισμό των συντελεστών βιομετασχηματισμού, τη βαθμονόμηση και την επαλήθευση του μοντέλου .....	101
Πίνακας 5.12 Αποτελέσματα των αναλύσεων ευαισθησίας για τον χώρο SS-45 της πρώην αεροπορικής βάσης England στη Λουιζιάνα.....	111
Πίνακας 5.13 Προβλεπόμενος χρόνος αποκατάστασης για τα διαφορετικά σενάρια των αναλύσεων ευαισθησίας.....	111
Πίνακας 5.14 Μετρήσεις συγκεντρώσεων σε φρέατα παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 1997 .....	117
Πίνακας 5.15 Μετρήσεις συγκεντρώσεων σε φρέατα παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 2002 .....	117
Πίνακας 5.16 Εκτίμηση της τιμής του κοινού συντελεστή υστέρησης των χλωροαιθενίων	120
Πίνακας 5.17 Συγκεντρώσεις τριχλωροαιθενίου (TCE) που μετρήθηκαν στο φρέαρ παρακολούθησης της περιοχής της πηγής (2-62B) .....	121
Πίνακας 5.18 Δεδομένα εισόδου του BIOCHLOR για τον υπολογισμό των συντελεστών βιομετασχηματισμού, τη βαθμονόμηση και την επαλήθευση του μοντέλου .....	122
Πίνακας 5.19 Αποτελέσματα των αναλύσεων ευαισθησίας για τον χώρο FTA-2 της αεροπορικής βάσης Tinker, στην Οκλαχόμα .....	131
Πίνακας 5.20 Χρόνος και απόσταση σταθεροποίησης της ρύπανσης για τα διαφορετικά σενάρια των αναλύσεων ευαισθησίας.....	131
Πίνακας 5.21 Βασικά χαρακτηριστικά των τριών περιστατικών ρύπανσης με χλωροαιθένια που προσομοιώθηκαν με το BIOCHLOR .....	135

Πίνακας 5.22 Σύνοψη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης τριών περιστατικών ρύπανσης με χλωροαιθένια με το BIOCHLOR .....	135
---	-----

## Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Απεικόνιση μηχανισμών φυσικής εξασθένησης σε περιστατικό διαρροής χλωριωμένων διαλυτών από υπόγεια δεξαμενή αποθήκευσης (U.S. EPA, 1999b - τροποποιημένο) .....	13
Σχήμα 2.2 Αναγωγική αποχλωρίωση χλωροαιθινίων.....	14
Σχήμα 3.1 Ποσοστιαία κατανομή του αθροίσματος των μέγιστων συνολικών αρχικών συγκεντρώσεων των χλωριωμένων διαλυτών στα περιστατικά (n=16).....	33
Σχήμα 3.2 Ποσοστιαία κατανομή του μήκους εξάπλωσης της ρύπανσης στα περιστατικά (n=8).....	34
Σχήμα 3.3 Ποσοστιαία κατανομή της ταχύτητας μεταγωγής στα περιστατικά (n=8).....	34
Σχήμα 3.4 Ποσοστιαία κατανομή του προβλεπόμενου χρόνου αποκατάστασης στα περιστατικά (n=12).....	35
Σχήμα 4.1 Η πηγή της ρύπανσης προσομοιώνεται ως ένα επίπεδο πλάτους Y και πάχους Z, κάθετο στη διεύθυνση της ροής, που βρίσκεται στο x=0 σε ημίπειρο, αρχικά καθαρό πεδίο .....	43
Σχήμα 4.2 Απεικόνιση του πεδίου μεταφοράς των ρύπων όπως προσομοιώνεται από το μοντέλο BIOCHLOR. Τα MW-1, MW-2, MW-3 και MW-4 είναι φρέατα παρακολούθησης που βρίσκονται κατά μήκος τους άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης .....	48
Σχήμα 4.3 Καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων του διχλωροαιθινίου (DCE), Σεπτέμβριος 1996 και Μάρτιος 1998, εγκατάσταση 1381, πολεμική αεροπορική βάση στο Ακρωτήριο Κανάβεραλ, Φλόριντα (Parsons ES, 2009 - τροποποιημένο).....	52
Σχήμα 4.4 Μετρήσεις συγκεντρώσεων χλωροαιθινίων (TCE, DCE, VC) σε φρέατα παρακολούθησης στον άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 1996.....	56
Σχήμα 4.5 Μετρήσεις συγκεντρώσεων χλωροαιθινίων (TCE, DCE, VC) σε φρέατα παρακολούθησης στον άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 2001 .....	56
Σχήμα 4.6 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθινίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09 (πηγή), S01, S03, S12 και S15 για το έτος 1996 (με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Buscheck & Alcantar (1995)).....	58

Σχήμα 4.7 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09, S01, S03, S12 και S15 για το έτος 1996 (με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Buscheck & Alcantar (1995)).....	59
Σχήμα 4.8 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09, S01, S03, S12 και S15 για το έτος 1996 (με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Buscheck & Alcantar (1995)).....	59
Σχήμα 4.9 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09 (πηγή), S01, S03, S12 και S15 για το έτος 1996 (με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο δοκιμής-λάθους με το BIOCHLOR).....	60
Σχήμα 4.10 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (DCE) κατάντη της πηγής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09, S01, S03, S12 και S15 για το έτος 1996 (με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο δοκιμής-λάθους με το BIOCHLOR) .....	61
Σχήμα 4.11 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09, S01, S03, S12 και S15 για το έτος 1996 (με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο δοκιμής-λάθους με το BIOCHLOR) .....	61
Σχήμα 4.12 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09, S01, S03, S12 και S15 για το έτος 2001 (με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο δοκιμής-λάθους με το BIOCHLOR) .....	62
Σχήμα 4.13 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (DCE) κατάντη της πηγής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09, S01, S03, S12 και S15 για το έτος 2001 (με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο δοκιμής-λάθους με το BIOCHLOR) .....	62

Σχήμα 4.14 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09, S01, S03, S12 και S15 για το έτος 2001(με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο δοκιμής-λάθους με το BIOCHLOR) .....	63
Σχήμα 5.1 Φωτογραφία ρυπασμένου χώρου Bendix (Bosch), St. Joseph, Michigan (από δορυφόρο, Bing maps, 2012 - τροποποιημένη).....	69
Σχήμα 5.2 Θέσεις δειματοληψίας και καμπύλες ίσων συνολικών συγκεντρώσεων χλωροαιθινίων στον ρυπασμένο χώρο Bendix, St. Joseph, Michigan. Σύμβολα: T-1= Τομή 1, T 1-2= Γεώτρηση 2 της Τομής 1 (Woodard & Curran, 1999b - τροποποιημένο).....	70
Σχήμα 5.3 Εννοιακό μοντέλο- Γεωλογική τομή A-A' (αντίστοιχη της τομής B-B' στο Σχήμα 5.2), στον άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης στον χώρο Bendix, St. Joseph, Μίσιγκαν. Σύμβολα: T 1-4= Γεώτρηση 4 της Τομής 1 (Woodard & Curran, 1999a - τροποποιημένο) .....	71
Σχήμα 5.4 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειματοληψίας T 2-5 και T 1-4 για το έτος 1991 .....	79
Σχήμα 5.5 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2- διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειματοληψίας T 2-5 και T 1-4 για το έτος 1991 .....	80
Σχήμα 5.6 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειματοληψίας T 2-5 και T 1-4 για το έτος 1991 .....	80
Σχήμα 5.7 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στη θέση δειματοληψίας T 4-2 για το έτος 1992 .....	81
Σχήμα 5.8 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στη θέση δειματοληψίας T 4-2 για το έτος 1992 .....	81
Σχήμα 5.9 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στη θέση δειματοληψίας T 4-2 για το έτος 1992 .....	82



Σχήμα 5.10 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στη θέση δειγματοληψίας 55-AF για το έτος 1995.....	82
Σχήμα 5.11 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στη θέση δειγματοληψίας 55-AF για το έτος 1995 .....	83
Σχήμα 5.12 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στη θέση δειγματοληψίας 55-AF για το έτος 1995.....	83
Σχήμα 5.13 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, 118 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής.....	84
Σχήμα 5.14 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, 118 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής.....	85
Σχήμα 5.15 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, 118 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής.....	85
Σχήμα 5.16 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας T 2-5 και T 1-4 για το έτος 1991 .....	87
Σχήμα 5.17 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2- διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας T 2-5 και T 1-4 για το έτος 1991 .....	87
Σχήμα 5.18 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας T 2-5 και T 1-4 για το έτος 1991 .....	87
Σχήμα 5.19 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τη μέτρηση πεδίου στη θέση δειγματοληψίας T 4-2 για το έτος 1992.....	88
Σχήμα 5.20 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τη μέτρηση πεδίου στη θέση δειγματοληψίας T 4-2 για το έτος 1992.....	88

Σχήμα 5.21 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στη θέση δειγματοληψίας T 4-2 για το έτος 1992 .....	89
Σχήμα 5.22 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τη μέτρηση πεδίου στη θέση δειγματοληψίας 55-AF για το έτος 1995 .....	89
Σχήμα 5.23 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τη μέτρηση πεδίου στη θέση δειγματοληψίας 55-AF για το έτος 1995 .....	90
Σχήμα 5.24 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τη μέτρηση πεδίου στη θέση δειγματοληψίας 55-AF για το έτος 1995.....	90
Σχήμα 5.25 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας SC-20D, T 2-5, T 1-4, T 4-2 και 55-AF μετά το 1977, οπότε σταθεροποιήθηκε η ρύπανση .....	91
Σχήμα 5.26 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας SC-20D, T 2-5, T 1-4, T 4-2 και 55-AF μετά το 1977, οπότε σταθεροποιήθηκε η ρύπανση.....	92
Σχήμα 5.27 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας SC-20D, T 2-5, T 1-4, T 4-2 και 55-AF μετά το 1977, οπότε σταθεροποιήθηκε η ρύπανση .....	92
Σχήμα 5.28 Φωτογραφία του νυν Διεθνούς Αεροδρομίου της Αλεξάνδρειας, Λουιζιάνα (πρώην Αεροπορική Βάση England) (από δορυφόρο, Bing maps, 2014 - τροποποιημένη)...	94
Σχήμα 5.29 Θέσεις φρεάτων παρακολούθησης και καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων του τριχλωροαιθενίου (TCE), Μάρτιος 2002, υποενότητα διαχείρισης της ρύπανσης SS-45, πρώην αεροπορική βάση England, Αλεξάνδρεια, Λουιζιάνα (Parsons ES, 2009 – τροποποιημένο) .....	96
Σχήμα 5.30 Ημιλογαριθμικό διάγραμμα της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) στο φρέαρ παρακολούθησης της πηγής (SS45LOO1MW) σε σχέση με τον χρόνο (1997-2002), θεωρώντας ως αφετηρία μέτρησης του χρόνου την ημερομηνία 1/1/1997.....	100
Σχήμα 5.31 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους	

συντελεστές βιομετασχηματισμού από τη βιβλιογραφία, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 1997.....	102
Σχήμα 5.32 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού από τη βιβλιογραφία, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 1997.....	103
Σχήμα 5.33 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού από τη βιβλιογραφία, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 1997.....	103
Σχήμα 5.34 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 1997.....	104
Σχήμα 5.35 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 1997.....	105
Σχήμα 5.36 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 1997.....	105
Σχήμα 5.37 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 2000.....	106
Σχήμα 5.38 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 2000.....	106

Σχήμα 5.39 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 2000.....	107
Σχήμα 5.40 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, 67 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής, σε σύγκριση με τη μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση στο πόσιμο νερό (MCL).....	108
Σχήμα 5.41 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, 67 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής, σε σύγκριση με τη μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση στο πόσιμο νερό (MCL).....	108
Σχήμα 5.42 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, 67 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής, σε σύγκριση με τη μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση στο πόσιμο νερό (MCL).....	109
Σχήμα 5.43 Καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων του τριχλωροαιθενίου (TCE) στον ρυπασμένο χώρο FTA-2 της αεροπορικής βάσης Tinker στην Οκλαχόμα το Αύγουστο του 1997 και τον Απρίλιο του 1999 (Parsons ES, 2009 – τροποποιημένο) .....	114
Σχήμα 5.44 Ημιλογαριθμικό διάγραμμα της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) στο φρέαρ παρακολούθησης της πηγής (2-62B) σε σχέση με τον χρόνο, θεωρώντας ως αφετηρία μέτρησης του χρόνου την ημερομηνία 1/1/1993.....	121
Σχήμα 5.45 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού από τη βιβλιογραφία, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 1997.....	123
Σχήμα 5.46 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού από τη βιβλιογραφία, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 1997 .....	124
Σχήμα 5.47 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού από τη βιβλιογραφία, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 1997 .....	124

Σχήμα 5.48 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 1997 .....	125
Σχήμα 5.49 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 1997 .....	126
Σχήμα 5.50 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 1997 .....	126
Σχήμα 5.51 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 2002 .....	127
Σχήμα 5.52 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 2002 .....	127
Σχήμα 5.53 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 2002 .....	128
Σχήμα 5.54 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 2027, όταν σταθεροποιείται η ρύπανση .....	129
Σχήμα 5.55 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 2027, όταν σταθεροποιείται η ρύπανση .....	129
Σχήμα 5.56 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 2027, όταν σταθεροποιείται η ρύπανση .....	129



## Περίληψη

Η ρύπανση των υπογείων νερών με χλωροαιθένια αποτελεί ένα πολύ διαδεδομένο πρόβλημα λόγω της τοξικότητας, της κινητικότητας και της επιμονής αυτών των ρύπων, και κυρίως επειδή διαρρέουν συχνά σε μη υδατική φάση. Η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση είναι μια χαμηλού κόστους μέθοδος αποκατάστασης των ρυπασμένων με χλωροαιθένια χώρων. Γι' αυτό είναι χρήσιμο να εξεταστεί τι μπορεί να πετύχει η εν λόγω μέθοδος κατά την εφαρμογή της στο πεδίο, κάτι που αποτελεί τον κύριο σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Για τον σκοπό αυτόν, σε πρώτο στάδιο αντλήθηκαν συμπεράσματα από συλλογές περιστατικών ρύπανσης με χλωριωμένους διαλύτες στα οποία έχει αξιολογηθεί ή εφαρμοστεί η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση. Σε δεύτερο στάδιο, δημιουργήθηκε, βάσει δεδομένων από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α., μια συλλογή 17 περιστατικών ρύπανσης με χλωριωμένους διαλύτες όπου η αποκατάσταση με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση (αποκλειστικά ή μη) έχει ολοκληρωθεί. Για καθένα από τα 17 περιστατικά συλλέχθηκαν και πινακοποιήθηκαν επιλεγμένα δεδομένα που διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: 1) αυτά που αφορούν την ταυτότητα του περιστατικού και 2) τις καθοριστικές κύριες μεταβλητές. Η πρώτη κατηγορία, «βασικά στοιχεία - ταυτότητα του περιστατικού», περιλαμβάνει τον κωδικό του περιστατικού στην Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α., τη ρυπογόνο δραστηριότητα, τη χρονική διάρκεια εφαρμογής της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης και τυχόν επεμβατικές μεθόδους αποκατάστασης που χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό με αυτή τη μέθοδο για την εξυγίανση των υπογείων υδάτων. Ως καθοριστικές μεταβλητές για την επίδοση της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης θεωρήθηκαν οι μέγιστες καταγεγραμμένες συγκεντρώσεις χλωριωμένων διαλυτών πριν την έναρξη της αποκατάστασης, η ταχύτητα μεταγωγής, η έκταση της ρύπανσης και η ύπαρξη ή μη μεικτής ρύπανσης. Σε τρίτο στάδιο, προσομοιώθηκαν με το λογισμικό BIOCHLOR τρία περιστατικά προκειμένου να καθοριστούν ενδεικτικές τιμές για τον χρόνο αποκατάστασης, τον χρόνο και την απόσταση σταθεροποίησης και να εξαχθούν συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης. Για τον σκοπό αυτόν, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα για την αναζήτηση περιστατικών ρύπανσης με χλωροαιθένια, στα οποία έχει αξιολογηθεί και/ή εφαρμοστεί η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση, σε επιστημονικά περιοδικά, πρακτικά συνεδρίων, μελέτες περιβαλλοντικών εταιρειών και οργανισμών των Η.Π.Α. και σε ηλεκτρονικές βάσεις δεδομένων περιβαλλοντικών και στρατιωτικών οργανισμών των Η.Π.Α.. Στη συνέχεια, επιλέχθηκαν τρία αντιπροσωπευτικά περιστατικά για τρία διαφορετικά εύρη ταχυτήτων μεταγωγής: i) 6-30 m/y, 30-60 m/y και >60 m/y, δύο διαφορετικά εύρη μήκους εξάπλωσης της ρύπανσης: i) 150-500 m και ii) 500-1500 m και τρία διαφορετικά εύρη συνολικών

μέγιστων συγκεντρώσεων χλωροαιθινίων: i) 0,1-1,5 mg/L, ii) της τάξης των 10 mg/L και iii) >100 mg/L. Τα τρία περιστατικά που επιλέχθηκαν να προσομοιωθούν με το BIOCHLOR ήταν ο βιομηχανικός χώρος Bendix Corporation/Allied Automotive στο Μίσιγκαν, ο χώρος SS-45 της πρώην αεροπορικής βάσης England στη Λουιζιάνα και ο χώρος FTA-2 της αεροπορικής βάσης Tinker στην Οκλαχόμα.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν συνδυασμένα από τη συλλογή περιστατικών και τις προσομοιώσεις με το BIOCHLOR έχουν ως ακολούθως. Η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση αναμένεται να είναι αποτελεσματική σε περιστατικά με μέγιστες συνολικές καταγεγραμμένες συγκεντρώσεις μικρότερες από 1,5 mg/L και ταχύτητες μεταγωγής κάτω από 15 m/y. Ο προβλεπόμενος χρόνος αποκατάστασης στον χώρο SS-45, που έχει αυτά τα δύο χαρακτηριστικά, υπολογίστηκε ίσος με 67 χρόνια. Το αντίθετο φαίνεται να ισχύει για περιστατικά με μέγιστες συνολικές καταγεγραμμένες συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 100 mg/L και ταχύτητες μεταγωγής μεγαλύτερες από 60 m/y. Η μέγιστη εξάπλωση των χλωροαιθινίων στο περιστατικό Bendix, που έχει αυτά τα δύο χαρακτηριστικά, ήταν 1262 m από την πηγή πριν φτάσει σε συνθήκες μόνιμης μεταφοράς 25 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής. Σε ένα περιστατικό ρύπανσης (FTA-2) μετρίου μεγέθους (συγκεντρώσεις της τάξης των 10 mg/L και ταχύτητα μεταγωγής 46,7 m/y) η μέγιστη εξάπλωση των χλωροαιθινίων υπολογίστηκε ίση με 636 m πριν φτάσει σε συνθήκες μόνιμης μεταφοράς 65 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής. Ο ρυθμός που βιοαποδομείται πιο αργά και στα τρία περιστατικά που εξετάστηκαν είναι το τριχλωροαιθέριο, σε σχέση με το cis-1,2-διχλωροαιθέριο και το βινυλοχλωρίδιο. Οι χρόνοι ημιζωής που υπολογίστηκαν για το τριχλωροαιθέριο είναι 1,12-3,75 έτη.

Η συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι σημαντική διότι οριοθετεί τις μέγιστες αρχικές συγκεντρώσεις και τις ταχύτητες μεταγωγής στα περιστατικά όπου η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση αναμένεται να είναι επιτυχής και σε αυτά που αναμένεται να είναι ανεπιτυχής. Επιπλέον, μπορεί να αποτελέσει έναν μερικό οδηγό για την αξιολόγηση της φυσικής εξασθένησης με το BIOCHLOR σε περιστατικά όπου τα δεδομένα συλλέχθηκαν για κάποιο άλλο σκοπό και γι' αυτό είναι ελλιπή.

**Λέξεις Κλειδιά:** παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση, εξυγίανση υπογείων υδάτων, χλωροαιθέρια, BIOCHLOR



## Abstract

Groundwater contamination with chloroethenes is a widespread problem due to their toxicity, mobility and persistence, and mostly because they are often released as non-aqueous phase liquids. Monitored natural attenuation is a low-cost remediation method for chloroethene-contaminated sites. For this reason, it is useful to examine the performance of this method in the field, which is the main goal of this thesis.

In order to achieve this objective, the first step was to draw conclusions from compilations of chlorinated solvent-contaminated sites, where monitored natural attenuation has been evaluated or implemented. At a second stage, a new compilation of 17 case studies of chlorinated solvents-contaminated sites was created, where remediation by monitored natural attenuation (as a sole remediation technique or in conjunction with others) has been completed, based on data from the U.S.A. National Priorities List. For each of the 17 case studies selected data were gathered and tabulated. These data are divided into two main categories; 1) those concerning the identity of the contaminated site and 2) the key variables that determine the performance of monitored natural attenuation. The category "main characteristics – case study identity" includes the following; U.S.A. Environmental Protection Agency code of the case study, contaminating activity, duration of application of monitored natural attenuation and any active remediation methods used in conjunction with this method for groundwater remediation. The key variables that were considered to determine the performance of monitored natural attenuation were the following; maximum recorded concentrations of chlorinated solvents prior to implementing monitored natural attenuation, seepage velocity, plume extent and presence or absence of mixed contamination. At a third stage, three case studies were simulated with the BIOCHLOR software, in order to determine indicative values for the remediation time, the time and distance of plume stabilization, and to draw conclusions about the effectiveness of monitored natural attenuation. For this purpose, an extensive literature research was carried out, in order to find case studies of chloroethene-contamination in groundwater, where monitored natural attenuation has been evaluated or implemented, in journals, conference proceedings, environmental studies by consulting companies and organizations in the U.S.A. and online databases of U.S.A. environmental and military organizations. Three representative case studies were subsequently selected for the three following ranges of seepage velocities; i) 6-30 m/y, 30-60 m/y and >60 m/y, the following two ranges of plume length; i) 150-500 m and ii) 500-1500 m, and the three following ranges of total maximum chloroethene concentrations; i) 0.1-1.5 mg/L, ii) on the order of magnitude of 10 mg/L and iii) >100 mg/L. The three sites that were chosen to be simulated with BIOCHLOR were the industrial site Bendix Corporation/Allied

Automotive in Michigan, the operable unit SS-45 at the former England Air Force Base site in Louisiana and site FTA-2 at Tinker Air Force Base in Oklahoma.

The conclusions drawn jointly from the case study compilations and the simulations with BIOCHLOR are as follows. Monitored natural attenuation is expected to be effective at contaminated sites with total maximum recorded concentrations below 1.5 m/L and seepage velocities below 15m/y. The remediation time at site SS-45, which has these two features, was calculated to be 67 years. On the contrary, it seems that monitored natural attenuation is not effective at contaminated sites with recorded maximum total concentrations greater than 100 mg/L and seepage velocities greater than 60 m/y. At the Bendix site, which is representative of these concentration and seepage velocity ranges, chloroethenes travel 1262 m downgradient of the inferred source area before reaching steady state 25 years after their release. At site FTA-2, where contamination is of moderate size (concentrations on the order of 10 mg/L and seepage velocity 46.7 m/y) chloroethenes travel 636 m downgradient of the inferred source area before reaching steady state 65 years after their release. At all three case studies, trichloroethene is the contaminant that is biotransformed most slowly compared with cis-1,2-dichloroethene and vinyl chloride. Calculated trichloroethene half-life ranges between 1.12 and 3.75 years.

The findings of this thesis are important because it defines the range of maximum concentrations and seepage velocities at case studies where monitored natural attenuation is expected to be successful and at case studies where this method is expected to be unsuccessful. In addition, it provides partial guidance for the evaluation of natural attenuation with BIOCHLOR in case studies where data were obtained for another purpose and therefore are incomplete.

**Keywords:** monitored natural attenuation, groundwater remediation, chloroethenes, BIOCHLOR

## Κεφάλαιο 1

### Εισαγωγή

Η ρύπανση των υπογείων υδάτων, ως αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων αλλά και φυσικών διεργασιών, αποτελεί ένα παγκόσμιο πρόβλημα. Τα τελευταία 40 χρόνια έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες στις Η.Π.Α. και σε άλλες βιομηχανικές χώρες για την εξυγίανση των υπογείων υδάτων. Ωστόσο, υπάρχουν πολλοί σύνθετοι ρυπασμένοι χώροι με επικίνδυνα απόβλητα, στους οποίους η ρύπανση θα παραμείνει σε επίπεδα μεγαλύτερα από τις επιτρεπτές συγκεντρώσεις για 50 έως 100 χρόνια. Η δυσκολία αποκατάστασης ενός ρυπασμένου χώρου συνδέεται άμεσα με την κατηγορία του ρύπου. Μια κατηγορία ρύπων που αποτελεί σημαντική πρόκληση στη διαχείριση ρυπασμένων χώρων είναι τα βαρύτερα από το νερό μη υδατικά υγρά (Dense Non-Aqueous Phase Liquids - DNAPLs), που περιλαμβάνουν τους χλωριωμένους διαλύτες (NRC, 2013). Οι χλωριωμένοι διαλύτες περιλαμβάνουν τα χλωροαιθένια, τα οποία μελετά η παρούσα διπλωματική εργασία.

Οι μέθοδοι αποκατάστασης των υπογείων υδάτων και του εδάφους διακρίνονται με βάση τον βαθμό επέμβασης στο ρυπασμένο μέσο (contaminated media) σε τρεις κατηγορίες. (1) Παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση (monitored natural attenuation- MNA), στην οποία εστιάζει η παρούσα εργασία. (2) Μέθοδοι μηχανικής επέμβασης (engineering-based methods), που χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση της πηγής της ρύπανσης ή την τροποποίηση των διαδρομών εξάπλωσης των ρύπων χωρίς επεξεργασία του ρύπου. Περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, την εκσκαφή, τον εγκιβωτισμό και τον υδραυλικό έλεγχο. (3) Μέθοδοι διεργασιακής επέμβασης του ρυπασμένου μέσου που βασίζονται σε φυσικές, χημικές ή βιολογικές διεργασίες για να απομακρύνουν, να διασπάσουν ή να αδρανοποιήσουν τον ρύπο (Πανταζίδου & Παπασιώπη, 2007). Η τρίτη αυτή κατηγορία διακρίνεται με τη σειρά της σε αυτές τις μεθόδους που περιλαμβάνουν επί τόπου επεξεργασία του ρυπασμένου μέσου και σε αυτές που περιλαμβάνουν απομάκρυνση του ρύπου και επεξεργασία του στην επιφάνεια του εδάφους.

Η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση, με την οποία θα ασχοληθούμε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, βασίζεται στην ικανότητα της φύσης να μετασχηματίζει τους ρύπους σε λιγότερο επιβλαβείς ενώσεις, να περιορίζει την εξάπλωσή τους ή να τους αδρανοποιεί. Η χρήση αυτής της μεθόδου για την αποκατάσταση ρυπασμένων χώρων, είτε αυτόνομα είτε σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους αποκατάστασης, αυξήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του '90, ακολουθώντας αντίθετη τροχιά από τη μέθοδο άντλησης και επεξεργασίας (pump & treat) που χρησιμοποιούνταν ευρέως μέχρι τότε. Αυτό οφείλεται τόσο στην αύξηση της κατανόησης των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο υπέδαφος,

όσο και στην ταυτόχρονη συνειδητοποίηση ότι η μέθοδος άντλησης και επεξεργασίας είναι χρονοβόρα, ακριβή, ακόμα και αναποτελεσματική (Grandel & Dahmke, 2004).

Μέχρι σήμερα, έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμα πρωτόκολλα από υπηρεσίες περιβαλλοντικής προστασίας και οργανώσεις για την καθοδήγηση της αξιολόγησης της φυσικής εξασθένησης και της εφαρμογής της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης για διαφορετικές κατηγορίες ρύπων. Πρώτα, αναπτύχθηκαν τα πρωτόκολλα για την παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση σε χώρους ρυπασμένους με πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες. Όσον αφορά την εφαρμογή της εν λόγω μεθόδου αποκατάστασης σε χώρους ρυπασμένους με χλωριωμένους διαλύτες, ορόσημο αποτελούν οι δημοσιεύσεις του τεχνικού πρωτοκόλλου για την αξιολόγηση της φυσικής εξασθένησης χλωριωμένων διαλυτών στα υπόγεια ύδατα (U.S. EPA, 1998) και της Οδηγίας της Υπηρεσίας OSWER της Υπηρεσίας Περιβαλλοντικής Προστασίας των Η.Π.Α. (U.S. EPA, 1999c), η οποία αναφέρεται στην αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών και υπόγειων υδάτων λόγω διαρροών από υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης με την παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση.

Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί πολλές βάσεις δεδομένων για τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των ρυπασμένων χώρων με χλωριωμένους διαλύτες, τις μέγιστες καταγεγραμμένες συγκεντρώσεις ρύπων και το μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης (Newell *et al.*, 1990· Wiedemeier *et al.*, 1999· McNab *et al.*, 1999· Aziz *et al.*, 2000b). Πολλές είναι οι μελέτες που έχουν δημοσιευτεί για την αξιολόγηση της φυσικής εξασθένησης σε χώρους ρυπασμένους με χλωριωμένους διαλύτες σε επιστημονικά άρθρα, πρακτικά συνεδρίων και μελέτες κόστους και εφαρμογής περιβαλλοντικών εταιριών, όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας. Η έρευνα-κλειδί των McGuire *et al.* (2004) καταγράφει με λεπτομέρεια τα χαρακτηριστικά, τις επιτυχίες και τα εμπόδια στην εφαρμογή της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης αυτόνομα ή σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες αποκατάστασης σε περιστατικά ρύπανσης με χλωριωμένους διαλύτες.

## **1.1 Αντικείμενο διπλωματικής**

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να δοθεί απάντηση στο ερώτημα για το τι μπορεί να πετύχει η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση σε χώρους ρυπασμένους με χλωροαιθένια, όταν χρησιμοποιείται αυτόνομα. Προς αυτήν την κατεύθυνση, γίνεται μια προσπάθεια καθορισμού ενδεικτικών τιμών για συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των ρυπασμένων χώρων που οριοθετούν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Το συγκεκριμένο ερώτημα είναι σημαντικό, αφού η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση ως μια τεχνολογία χαμηλού κόστους αναμένεται να είναι μέρος του σχεδίου αποκατάστασης πολλών ρυπασμένων χώρων στο μέλλον.

Προκειμένου να απαντηθεί αυτό το ερώτημα, σε πρώτο στάδιο, έγινε αναζήτηση σε υπάρχουσες συλλογές περιστατικών ρύπανσης με χλωριωμένους διαλύτες στα οποία είτε έχει

αξιολογηθεί είτε έχει εφαρμοστεί (ή και τα δύο) η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση. Σε δεύτερο στάδιο, δημιουργήθηκε μια συλλογή 17 περιστατικών εφαρμογής της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης (αυτόνομα ή σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους αποκατάστασης) σε χώρους ρυπασμένους με χλωροαιθένια που έχουν διαγραφεί από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α. (National Priorities List - NPL), δηλαδή χώρων που η αποκατάστασή τους έχει ολοκληρωθεί. Ακολούθησε στατιστική επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν, με σκοπό να συγκριθούν τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας με αυτά που έχουν προκύψει από τις υπάρχουσες συλλογές περιστατικών. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη βιβλιογραφική αναζήτηση σε μελέτες, επιστημονικά περιοδικά, βάσεις δεδομένων υπηρεσιών των Η.Π.Α. και πρακτικά συνεδρίων με στόχο τη συλλογή περιστατικών στα οποία έχει αξιολογηθεί ή εφαρμοστεί η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση. Η βιβλιογραφική αναζήτηση επικεντρώθηκε στις Η.Π.Α. λόγω της πρωτοπορίας της χώρας στην έρευνα και την πολιτική για την παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση, καθώς και λόγω του μεγάλου εύρους των διαθέσιμων πληροφοριών με ελεύθερη πρόσβαση στο διαδίκτυο στην αγγλική γλώσσα.

Από τα συμπεράσματα που προέκυψαν, τόσο από τις υπάρχουσες συλλογές περιστατικών, όσο και από αυτή που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, βάσει δεδομένων της λίστας χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α., διαμορφώθηκαν κριτήρια επιλογής τριών περιστατικών αντιπροσωπευτικών διαφορετικών κατηγοριών χώρων, με σκοπό την ανάλυση με το λογισμικό αξιολόγησης της φυσικής εξασθένησης BIOCHLOR και την εξαγωγή συμπερασμάτων για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Τα κριτήρια επιλογής των περιστατικών αφορούν την αντιπροσωπευτικότητα διαφορετικών υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών, μεγέθους και έκτασης ρύπανσης. Επιπλέον, ήταν επιθυμητό να βρεθεί ένας χώρος που να έχει μελετηθεί εκτενώς ως προς τη φυσική εξασθένηση, ώστε να αποτελέσει οδηγό για τις αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν για τη μοντελοποίηση και την επιλογή των ελάχιστων απαραίτητων δεδομένων. Σημαντικό περιορισμό που οδήγησε στον αποκλεισμό αρκετών περιστατικών αποτελεί η αδυναμία του BIOCHLOR να προσομοιώσει τη ρύπανση σε εδάφη με μεγάλη υδρογεωλογική ετερογένεια, όπως την παρουσία ρωγματώσεων.

Στο κύριο μέρος της διπλωματικής εργασίας προσομοιώθηκαν τρία καταγεγραμμένα περιστατικά ρύπανσης με χλωροαιθένια, με το λογισμικό αξιολόγησης της φυσικής εξασθένησης BIOCHLOR. Το εν λόγω λογισμικό απαιτεί στοιχεία για τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του χώρου, για την κατανομή της ρύπανσης με χλωροαιθένια, για τον βιομετασχηματισμό των χλωροαιθινίων, για τη διάρκεια της ρύπανσης και για τις συγκεντρώσεις σε ένα φρέαρ παρακολούθησης κοντά στην πηγή και σε φρέατα παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης. Με αυτά τα

δεδομένα το λογισμικό υπολογίζει τον χρόνο και την απόσταση σταθεροποίησης ή τον χρόνο αποκατάστασης της ρύπανσης αναλόγως αν η πηγή είναι σταθερής ή μειούμενης έντασης αντίστοιχα. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας για τον καθορισμό των παραμέτρων που επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τα παραπάνω αποτελέσματα.

## **1.2 Οργάνωση κειμένου**

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε έξι κεφάλαια, το περιεχόμενο των οποίων παρουσιάζεται συνοπτικά στις παραγράφους που ακολουθούν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: Παρουσιάζεται το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ: Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση του περιεχομένου της εργασίας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται το προφίλ της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης ως τεχνολογίας αποκατάστασης. Περιγράφονται οι κύριοι μηχανισμοί αποκατάστασης με την εν λόγω μέθοδο, οι στόχοι, τα πλεονεκτήματά της, οι συνθήκες που πρέπει να πληρούνται για την επιτυχία της, καθώς και στατιστικά στοιχεία για την εφαρμογή της. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι φυσικοχημικές ιδιότητες των χλωριωμένων αλειφατικών υδρογονανθράκων, οι μηχανισμοί φυσικής εξασθένησής τους μετά τη διαρροή τους στο υπέδαφος, οι μηχανισμοί βιοαποδόμησής τους και ειδικά η αναγωγική αποχλωρίωση των χλωροαιθινίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ: Εξετάζεται τι μπορεί να πετύχει η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση σε χώρους ρυπασμένους με χλωροαιθίνα. Για τον σκοπό αυτόν, αναζητήθηκαν ενδεικτικές τιμές για καθοριστικές μεταβλητές που οριοθετούν την επίδοση της εν λόγω μεθόδου από συλλογές (compilations) περιστατικών ρύπανσης του υπογείου νερού με χλωριωμένους διαλύτες, για τα οποία είτε έχει αξιολογηθεί είτε έχει εγκριθεί η εφαρμογή της μεθόδου (ή και τα δύο), τα οποία έχουν δημοσιευτεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε μια καινούρια συλλογή περιστατικών που έχουν διαγραφεί από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α., στα οποία η αποκατάσταση με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση έχει ολοκληρωθεί. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας αυτών των δεδομένων και συγκρίνονται με αυτά από τις υπάρχουσες συλλογές. Με τα παραπάνω δεδομένα, διαμορφώθηκαν και παρουσιάστηκαν τα κριτήρια επιλογής των περιστατικών που θα αναλυθούν με το λογισμικό BIOCHLOR στο πέμπτο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ: Παρουσιάζεται το λογισμικό αξιολόγησης της φυσικής εξασθένησης BIOCHLOR. Παρατίθενται οι παράμετροι εισόδου που απαιτούνται για την εφαρμογή του και τα μεγέθη που μπορούν να υπολογιστούν μέσω της χρήσης του. Τέλος, προκειμένου να γίνουν κατανοητές στον αναγνώστη οι δυνατότητες του λογισμικού, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής του σε ένα περιστατικό διαρροής χλωροαιθινίων

στην πολεμική αεροπορική βάση Cape Canaveral στη Φλόριντα, η μελέτη του οποίου από την Parsons ES (2009), είναι διαθέσιμη στο διαδίκτυο.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ:** Αναλύονται με το λογισμικό BIOCHLOR τρία αντιπροσωπευτικά περιστατικά ρύπανσης με χλωροαιθένια. Περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση ρυπασμένων χώρων, τα στάδια της προσομοίωσης, τα αποτελέσματα και οι αναλύσεις ευαισθησίας. Τέλος, γίνεται μια προσπάθεια άντλησης συμπερασμάτων για την αποτελεσματικότητα της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης σε χώρους ρυπασμένους με χλωροαιθένια.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:** Συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα Κεφάλαια 3 έως 5 και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος, μετά τη βιβλιογραφία, ακολουθούν παραρτήματα (για τη μέθοδο εκτίμησης των συντελεστών βιομετασχηματισμού Buschek & Alcantar (1995) και για την εκτίμηση της κατακόρυφης εγκάρσιας διάστασης της πηγής στο περιστατικό Bendix) και γλωσσάρια των κύριων τεχνικών όρων (ελληνοαγγλικό και αγγλοελληνικό).





## Κεφάλαιο 2

### Θεωρητικό Υπόβαθρο

#### 2.1 Παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση

Η χρήση των μηχανισμών φυσικής εξασθένησης στη διαχείριση των περιστατικών ρύπανσης υπόγειων υδροφορέων άρχισε να κερδίζει έδαφος από το 1990, ειδικά στις Η.Π.Α. Σήμερα, η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση είναι αναγνωρισμένη μέθοδος εξυγίανσης των υπογείων υδάτων τόσο στις Η.Π.Α. όσο και σε χώρες μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Declercq *et al.*, 2012).

Ο όρος «φυσική εξασθένηση» (natural attenuation - NA) αναφέρεται στις φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο υπέδαφος, με αποτέλεσμα κάτω από ευνοϊκές συνθήκες και χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση να μειώνονται η μάζα, η τοξικότητα, η κινητικότητα, ο όγκος ή οι συγκεντρώσεις των ρύπων στο έδαφος και το υπόγειο νερό (U.S. EPA, 1999b). Οι διεργασίες φυσικής εξασθένησης διακρίνονται σε (1) αυτές που μειώνουν τη συγκέντρωση, αλλά όχι τη μάζα των ρύπων, οι οποίες είτε αφορούν τη μεταφορά του ρύπου εντός ενός μέσου όπως το υπόγειο νερό και το έδαφος και περιλαμβάνουν τη μεταγωγή, τη διάχυση, τη διασπορά, και την καταβύθιση είτε αφορούν τη μεταφορά των ρύπων μεταξύ των μέσων, όπως η ρόφιση και η εξάτμιση και σε (2) αυτές που μειώνουν τη μάζα των ρύπων, όπως η βιοαποδόμηση και οι χημικές αντιδράσεις που τους μετασχηματίζουν σε λιγότερο επιβλαβείς ουσίες (Declercq *et al.*, 2012).

Η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση (Monitored Natural Attenuation - MNA) είναι μέθοδος αποκατάστασης των υπόγειων υδροφορέων και πρέπει να διακρίνεται από τη δράση των μηχανισμών φυσικής εξασθένησης που ενεργούν σε κάθε ρυπασμένο χώρο και στους οποίους βασίζεται. Ως μέθοδος αποκατάστασης η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση συνίσταται από: (1) την αξιολόγηση των διεργασιών φυσικής εξασθένησης και πρόβλεψη του χρονικού πλαισίου αποκατάστασης του ρυπασμένου χώρου μέσω αυτών, (2) την εγκατάσταση ενός δικτύου φρεάτων παρακολούθησης (monitoring network) στο πεδίο και (3) τη διεξαγωγή συχνών δειγματοληψιών και αναλύσεων για την επιβεβαίωση της πρόβλεψης (U.S. EPA, 1999c).

Οι υδρογεωλογικές και βιοχημικές συνθήκες που επικρατούν στο εκάστοτε πεδίο και οι φυσικοχημικές ιδιότητες των ρύπων είναι καθοριστικοί παράγοντες για την επίδοση των μηχανισμών φυσικής εξασθένησης στη μείωση της μάζας ή της συγκέντρωσης των ρύπων. Πριν την επιλογή της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης ως μεθόδου αποκατάστασης, απαιτείται εκτενής μελέτη χαρακτηρισμού του ρυπασμένου χώρου. Είναι απαραίτητη η γνώση της θέσης και της συγκέντρωσης των ρύπων καθώς και της ύπαρξης ή μη μη-υδατικής φάσης (non-aqueous phase liquid - NAPL). Επίσης, όταν λαμβάνουν χώρα

βιολογικές διεργασίες, θα πρέπει να έχουν μετρηθεί ενδείξεις που σχετίζονται με τη μικροβιακή δραστηριότητα όπως το οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα, τα νιτρικά, τα θειικά, ο σίδηρος και συγκεντρώσεις πιθανών προϊόντων βιοαποδόμησης (U.S. EPA, 1999b). Λόγω της αβεβαιότητας στις μακροχρόνιες προβλέψεις για την εξέλιξη των βιογεωχημικών συνθηκών στο εκάστοτε πεδίο εφαρμογής της μεθόδου, η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση συνοδεύεται από ένα λεπτομερές πρόγραμμα παρακολούθησης για την τακτική επιβεβαίωση της απόδοσης των διεργασιών φυσικής εξασθένησης (NRC, 2000).

Τα πλεονεκτήματα της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης περιλαμβάνουν: ελάχιστη παραγωγή αποβλήτων, ελάχιστη παρέμβαση στο περιβάλλον, χαμηλότερο κόστος από επεμβατικές μεθόδους αποκατάστασης, λιγότερο απαιτούμενο εξοπλισμό και εργασίες, μικρή ή μηδενική επαφή μεταξύ των εμπλεκόμενων στα έργα απορρύπανσης και τη ρύπανση. (U.S. EPA, 1999c).

Η αποτελεσματικότητα της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης συνήθως προϋποθέτει τον έλεγχο της πηγής της ρύπανσης (U.S. EPA, 2012a). Πηγές ρύπανσης του υπόγειου νερού αποτελούν εγκαταστάσεις στην επιφάνεια του εδάφους, χώροι υγειονομικής ταφής αποβλήτων, ρυπασμένα εδάφη. Τα μέτρα για τον έλεγχο της πηγής περιλαμβάνουν την απομάκρυνση, την εξυγίανση ή τον περιορισμό της πηγής (U.S. EPA, 1999b). Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται όταν οι χλωριωμένοι διαλύτες, στους οποίους εστιάζει η παρούσα διπλωματική, συναντώνται σε μη υδατική φάση λόγω της υπολογίσιμης συνολικής μάζας ρύπου. Μια στρατηγική που χρησιμοποιείται συχνά σε αυτήν την περίπτωση είναι η εφαρμογή της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης με σκοπό την αποκατάσταση της υπολειπόμενης ρύπανσης μετά τη μερική εξυγίανση του μεγαλύτερου μέρους της περιοχής της πηγής με μια επεμβατική τεχνολογία απορρύπανσης (source zone treatment), όπως για παράδειγμα, η ενισχυμένη βιοαποκατάσταση (in situ bioremediation - ISB), η εισαγωγή οξειδωτικών στο πεδίο που διασπών τον εκάστοτε ρύπο (in situ chemical oxidation - ISCO) και οι θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας (in situ thermal treatment) (Stroo *et al.*, 2012).

Στόχος της αποκατάστασης με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση, όπως και με κάθε άλλη μέθοδο, μπορεί να είναι είτε (1) η διαχείριση της ρυπασμένης έκτασης, δηλαδή να μην επεκταθεί η ρύπανση μέχρι το σημείο όπου υπάρχει ένας αληθινός αποδέκτης (φρέατα άντλησης πόσιμου νερού, επιφανειακά νερά) ή ένας υποθετικός αποδέκτης (σύνορα της ιδιοκτησίας) είτε (2) η απορρύπανση των υπογείων υδάτων. Στην πρώτη περίπτωση, η χρήση της μεθόδου έχει νόημα μετά τον περιορισμό ή την απομάκρυνση της πηγής. Αντιθέτως, στη δεύτερη περίπτωση, η χρήση της μεθόδου μπορεί να φέρει αποτελέσματα μόνο αν οι συγκεντρώσεις των ρύπων είναι ήδη κοντά στα επιθυμητά όρια (Cooley *et al.*, 2005).

Σε σύγκριση με τους ρυπασμένους χώρους από πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες, η αυτόνομη εφαρμογή της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης σε ρυπασμένους χώρους

από χλωριωμένους διαλύτες είναι κατάλληλη για πολύ μικρότερο ποσοστό περιστατικών, λόγω του γενικά μεγαλύτερου μήκους εξάπλωσης των χλωριωμένων διαλυτών στα υπόγεια ύδατα (Aziz *et al.*, 2000b). Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Grandel & Damke (2004), το μέσο μήκος των ρυπασμένων εκτάσεων από χλωριωμένους διαλύτες είναι δύο έως πέντε φορές μεγαλύτερο από αυτό των ρυπασμένων εκτάσεων από το μείγμα βενζόλιο-τολουόλιο-ξυλόλιο-αιθυλοβενζόλιο (BTEX) ή από Πολυκυκλικούς Αρωματικούς Υδρογονάνθρακες, με αποτέλεσμα να απειλούν περισσότερο πιθανούς αποδέκτες.

Η έρευνα-κλειδί των McGuire *et al.* (2004a, b) για 191 περιστατικά ρύπανσης με χλωριωμένους διαλύτες έδειξε ότι η αποκατάσταση του 30% αυτών των περιστατικών βασίζεται αποκλειστικά στην παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση και ότι στο 33% εφαρμόζεται η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση σε συνδυασμό με αποκατάσταση της πηγής. Η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση αποκλείστηκε στο 23% των περιστατικών επειδή η έκταση της ρύπανσης μεγάλωνε με τον χρόνο ή επειδή το χρονικό πλαίσιο αποκατάστασης δεν ήταν λογικό. Στα υπόλοιπα περιστατικά εφαρμόζεται παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση σε συνδυασμό με αποκατάσταση της περιοχής όπου έχει εξαπλωθεί ο διαλυμένος ρύπος (13%), περιορισμό της πηγής (9%) ή κάποια άλλη στρατηγική (16%).

### 2.1.1 Η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση στο πρόγραμμα Superfund

Στον απόηχο της ανακάλυψης χώρων διάθεσης τοξικών αποβλήτων όπως το Times Beach το 1974 και το Love Canal το 1978 (<http://www2.epa.gov/aboutepa/love-canal-tragedy>), όπου η περιβαλλοντική ρύπανση συνδέθηκε άμεσα με την ανθρώπινη υγεία, το Κογκρέσο των Ηνωμένων Πολιτειών θέσπισε το 1980 το περιβαλλοντικό πρόγραμμα Superfund για τη διαχείριση εγκαταλειμμένων ή ανεξέλεγκτων ρυπασμένων χώρων από επικίνδυνα απόβλητα. Από το ξεκίνημα του προγράμματος Superfund, η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (United States Environmental Protection Agency- U.S. EPA) έχει αντιμετωπίσει χιλιάδες πραγματικές ή πιθανές διαρροές επικίνδυνων ουσιών μέσω βραχυχρόνιων ή έκτακτων ενεργειών απομάκρυνσης και μακροχρόνιων προσπαθειών εξυγίανσης, που είναι γνωστές ως ενέργειες αποκατάστασης (remedial actions). Ο χρονικός ορίζοντας του σχεδιασμού, της εφαρμογής και της ολοκλήρωσης αυτών των ενεργειών αποκατάστασης, που πραγματοποιούνται για να παρέχουν μόνιμες λύσεις με σκοπό τη διασφάλιση της ανθρώπινης υγείας και της ασφάλειας, είναι της τάξης ετών ή συχνά δεκαετιών.

Κάποιοι σύνθετοι ρυπασμένοι χώροι μπορεί να καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση και να περιλαμβάνουν διάφορα είδη ρυπασμένων μέσων, ή να περιλαμβάνουν εκτάσεις στις οποίες οι ρύποι διαφέρουν. Ένας σύνθετος χώρος μπορεί να διαιρεθεί σε υποενοότητες διαχείρισης της ρύπανσης (Operable Units - OUs), καθεμιά με διαφορετικές μεθόδους αποκατάστασης.

Οι μέθοδοι αποκατάστασης καταγράφονται σε πρακτικά απόφασης (Records of decision - RODs). Για κάθε υποενότητα διαχείρισης της ρύπανσης μπορεί να δημιουργηθεί ένα ξεχωριστό πρακτικό απόφασης. Επιπλέον, για μια υποενότητα διαχείρισης της ρύπανσης μπορεί να απαιτηθούν περισσότερα από ένα πρακτικά απόφασης για να αντιμετωπιστεί η ρύπανση σε διαφορετικά ρυπασμένα μέσα σε αυτήν την υποενότητα διαχείρισης της ρύπανσης ή τροποποίηση του πρακτικού απόφασης για να αναθεωρηθεί η μέθοδος αποκατάστασης που έχει επιλεγεί, στην περίπτωση που μεταγενέστερες αναφορές προόδου δείξουν ότι οι στόχοι αποκατάστασης δεν επιτυγχάνονται. Επομένως, για έναν ρυπασμένο χώρο μπορεί να υπάρχουν πολλά πρακτικά απόφασης.

Πριν από μια δεκαετία επικρατούσε η αντίληψη ότι η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απορρύπανση μόνο λίγων κατηγοριών ρύπων και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Με τον καιρό, διαδόθηκε περισσότερο η συμπερίληψή της στα σχέδια αποκατάστασης του υπόγειου νερού (NRC, 2013). Συγκεκριμένα, όπως αναφέρεται στη δέκατη τρίτη αναφορά για το πρόγραμμα Superfund (U.S. EPA, 2010b), η χρήση της εν λόγω μεθόδου αποκατάστασης σε ρυπασμένους χώρους που ανήκουν στη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α. αυξήθηκε σταθερά από το 1986 έως το 1998 και επιλέχθηκε στο 30 έως 40% των χώρων ετήσια. Η ίδια πηγή αναφέρει ότι, από το 2005 έως το 2008, η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση εφαρμόστηκε αυτόνομα στο 21% των ρυπασμένων χώρων που ανήκουν στη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α. και σε συνδυασμό με επεμβατικές μεθόδους αποκατάστασης στο 35% αυτών.

## **2.2 Οι χλωριωμένοι διαλύτες ως ρύποι στο υπέδαφος**

Οι χλωριωμένοι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες (Chlorinated Aliphatic Hydrocarbons - CAHs), που ανιχνεύονται στα υπόγεια νερά, είναι ανθρωπογενούς κυρίως προέλευσης (Bradley, 2003). Παρασκευάζονται ή από υδρογονάνθρακες που υπάρχουν στη φύση (μεθάνιο, αιθάνιο και αιθένιο) και χλώριο μέσω διαφόρων διαδικασιών όπου ένα ή περισσότερα άτομα υδρογόνου υποκαθίστανται από άτομα χλωρίου, ή από χλωριωμένες ενώσεις που αποχλωριώνονται επιλεκτικά σε λιγότερο χλωριωμένη κατάσταση. Περιλαμβάνουν τα χλωροαιθένια, τα χλωροαιθάνια και τα χλωρομεθάνια (U.S. EPA, 2000e). Στον Πίνακα 2.1 δίνεται ο κατάλογος των CAHs που συναντώνται πιο συχνά ως ρύποι στο περιβάλλον, τα ονόματά τους, οι συντομογραφίες, οι χημικοί τύποι και η προέλευσή τους. Τέλος, στον Πίνακα 2.1 αναφέρεται και ο αριθμός μητρώου αυτών των CAHs (Chemical Abstract Service (CAS) Registry Number), ο οποίος είναι ένας ενιαίος αναγνωριστικός αριθμός ειδικός για κάθε χημική ένωση, που διευκολύνει την έρευνα σε βάσεις δεδομένων, καθώς οι χημικές ενώσεις έχουν συχνά πολλά ονόματα.

Πίνακας 2.1 Κατάλογος χλωριωμένων διαλυτών (U.S. EPA, 2000e)

ΟΝΟΜΑ	ΣΥΝΤΟΜΟ -ΓΡΑΦΙΑ	ΧΗΜΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ	CAS #	ΣΥΝΗΘΗΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΡΥΠΩΝ
ΧΛΩΡΟΑΙΘΕΝΙΑ				
<i>Τετραχλωροαιθένιο</i> (-αιθυλένιο)	PCE	$\text{CCl}_2=\text{CCl}_2$	127-18-4	Αποθήκευση καθαρών και χρησιμοποιημένων διαλυτών
<i>Τριχλωροαιθένιο</i> (-αιθυλένιο)	TCE	$\text{CHCl}=\text{CCl}_2$	79-01-6	Αποθήκευση καθαρών και χρησιμοποιημένων διαλυτών, προϊόν βιοαποδόμησης του PCE
<i>cis-1,2-Διχλωροαιθένιο</i> (-αιθυλένιο)	cis-DCE	$\text{CHCl}=\text{CHCl}$	156-59-2	Αποθήκευση καθαρών και χρησιμοποιημένων διαλυτών, προϊόν βιοαποδόμησης του TCE
<i>trans-1,2-Διχλωροαιθένιο</i> (-αιθυλένιο)	trans-DCE	$\text{CHCl}=\text{CHCl}$	156-60-5	Αποθήκευση καθαρών και χρησιμοποιημένων διαλυτών, προϊόν βιοαποδόμησης του TCE (σε μικρό ποσοστό)
<i>1,1-Διχλωροαιθένιο</i> (-αιθυλένιο)	1,1-DCE	$\text{CH}_2=\text{CCl}_2$	75-35-4	Αποθήκευση καθαρών και χρησιμοποιημένων διαλυτών, προϊόν βιοαποδόμησης του 1,1,1-TCA
<i>Βινυλοχλωρίδιο</i>	VC	$\text{CH}_2=\text{CHCl}$	75-01-4	Διαρροές κατά την παραγωγή πολυβινυλοχλωριδίου (PVC), προϊόν βιοαποδόμησης των DCE και 1,1,1-TCA
ΧΛΩΡΟΑΙΘΑΝΙΑ				
<i>1,1,1-Τριχλωροαιθάνιο</i>	1,1,1- TCA	$\text{CH}_3-\text{CCl}_3$	71-55-6	Αποθήκευση καθαρών και χρησιμοποιημένων διαλυτών
<i>1,1,2-Τριχλωροαιθάνιο</i>	1,1,2-TCA	$\text{CHCl}_2-\text{CH}_2\text{Cl}$	79-00-5	Αποθήκευση καθαρών και χρησιμοποιημένων διαλυτών
<i>1,2-Διχλωροαιθάνιο</i>	1,2-DCA	$\text{CH}_2\text{Cl}-\text{CH}_2\text{Cl}$	107-06-2	Αποθήκευση καθαρών και χρησιμοποιημένων διαλυτών, προϊόν βιοαποδόμησης του 1,1,2-TCA
<i>1,1-Διχλωροαιθάνιο</i>	1,1-DCA	$\text{CH}_3-\text{CHCl}_2$	75-34-3	Προϊόν βιοαποδόμησης του 1,1,1-TCA
<i>Χλωροαιθάνιο</i>	CA	$\text{CH}_3-\text{CH}_2\text{Cl}$	75-00-3	Απόβλητα ψυκτικών υγρών, απόβλητα παρασκευής τετρααιθυλικού μόλυβδου, προϊόν βιοαποδόμησης του 1,1,1-TCA και του 1,1,2-TCA
ΧΛΩΡΟΜΕΘΑΝΙΑ				
<i>Τετραχλωράνθρακας</i>	CT	$\text{CCl}_4$	56-23-5	Αποθήκευση καθαρών και χρησιμοποιημένων διαλυτών, απόβλητα πυροσβεστήρων
<i>Χλωροφόρμιο</i>	CF	$\text{CHCl}_3$	67-66-3	Αποθήκευση καθαρών και χρησιμοποιημένων διαλυτών, προϊόν βιοαποδόμησης του CT
<i>Διχλωρομεθάνιο</i>	MC	$\text{CH}_2\text{Cl}_2$	75-09-2	Αποθήκευση καθαρών και χρησιμοποιημένων διαλυτών, προϊόν βιοαποδόμησης του CT
<i>Χλωρομεθάνιο</i>	CM	$\text{CH}_3\text{Cl}$	74-87-3	Απόβλητα ψυκτικών υγρών, προϊόν βιοαποδόμησης του CT

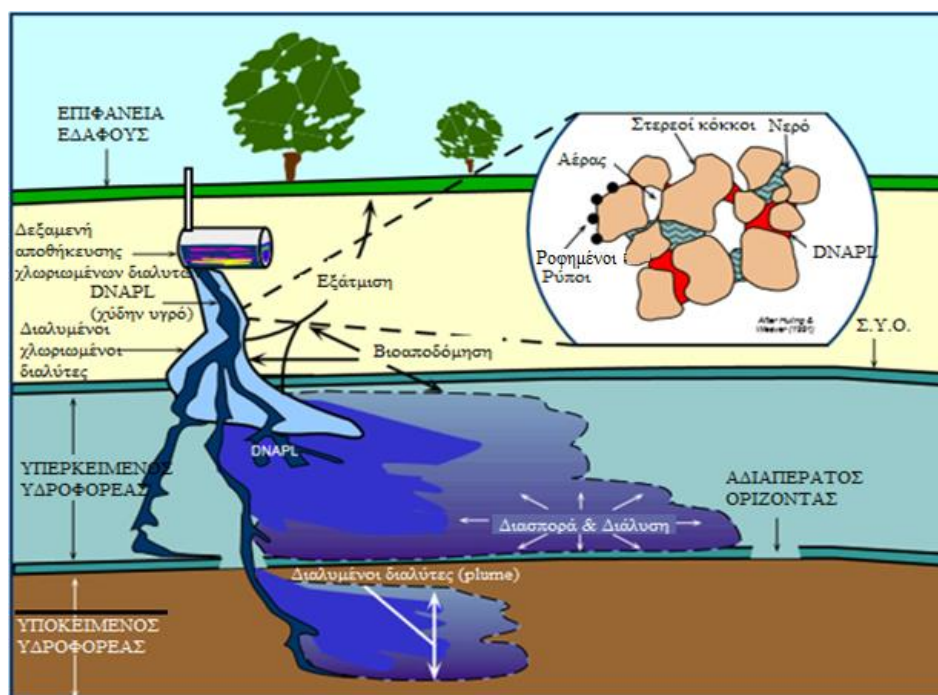
Οι CAHs έχουν ευρεία εφαρμογή συμπεριλαμβανομένης της χρήσης τους ως διαλυτών στα στεγνοκαθαριστήρια και διαλυτών απολίπανσης σε στρατιωτικές εφαρμογές, όπως η συντήρηση αεροσκαφών, και σε βιομηχανίες, όπως αυτοκινητοβιομηχανίες, εργοστάσια μετάλλων, εργοστάσια παραγωγής διαλυτών και εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικών ειδών. Στο παρελθόν, οι πρακτικές διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων που περιείχαν CAHs, καθώς και τυχαίες διαρροές οδήγησαν σε εκτεταμένη ρύπανση του εδάφους και των υπόγειων νερών στις βιομηχανικές χώρες (McGuire *et al.*, 2004b).

Από τα χλωροαιθένια, στα οποία επικεντρώνεται η παρούσα διπλωματική εργασία, το τριχλωροαιθένιο (TCE) και το βινυλοχλωρίδιο (VC) είναι γνωστό ότι έχουν καρκινογόνες επιπτώσεις (<http://water.epa.gov/drink/contaminants/>). Στις Η.Π.Α., από τους CAHs, το τριχλωροαιθένιο είναι αυτό που ανιχνεύεται πιο συχνά στο υπόγειο νερό και σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις (U.S. EPA, 2013d).

### 2.2.1 Φυσική εξασθένηση χλωριωμένων διαλυτών

Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των CAHs καθορίζουν την εξάπλωσή τους στο υπέδαφος. Ο αριθμός των ατόμων χλωρίου επηρεάζει άμεσα τη φυσική και χημική τους συμπεριφορά. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των ατόμων χλωρίου, τόσο το μοριακό βάρος και η πυκνότητα αυξάνεται, και η τάση ατμών και η υδατική διαλυτότητα μειώνονται. Αυτές οι ενώσεις έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα από το νερό και γι' αυτό αναφέρονται ως βαρύτερα από το νερό μη υδατικά υγρά. Τα βαρύτερα από το νερό μη υδατικά υγρά μπορούν να βυθιστούν διαμέσου της εδαφικής στήλης έως τον πυθμένα του υδροφορέα. Μπορούν όμως να διαρρεύσουν και ως μείγματα με άλλες ενώσεις μικρότερης πυκνότητας. Το εννοιακό μοντέλο του Σχήματος 2.1 απεικονίζει πώς θα μεταφερθεί και εν τέλει «τι θα απογίνει» ένας χλωριωμένος διαλύτης αφού διαρρεύσει στο υπέδαφος από μια υπόγεια δεξαμενή αποθήκευσης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, καθώς ο χύδην χλωριωμένος διαλύτης κινείται διαμέσου του υπεδάφους, μια ποσότητα του υγρού μπορεί να παγιδευτεί στους εδαφικούς πόρους, κάποια ποσότητα μπορεί να εξατμιστεί, κάποια μπορεί να ροφηθεί στην επιφάνεια κόκκων του εδάφους και κάποια μπορεί να διαλυθεί στο υπόγειο νερό. Εφόσον οι χύδην χλωριωμένοι διαλύτες είναι βαρύτεροι από το νερό, τείνουν να κινηθούν προς τα κάτω, ξεπερνώντας τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Καθώς οι διαλυμένοι χλωριωμένοι διαλύτες μεταφέρονται, η συγκέντρωσή τους μειώνεται από τη διασπορά και τη διάχυση. Οι μικροοργανισμοί βιοαποδομούν τους χλωριωμένους διαλύτες που είναι διαλυμένοι, έχουν εξατμιστεί ή έχουν ροφηθεί.



Σχήμα 2.1 Απεικόνιση μηχανισμών φυσικής εξασθένησης σε περιστατικό διαρροής χλωριωμένων διαλυτών από υπόγεια δεξαμενή αποθήκευσης (U.S. EPA, 1999b - τροποποιημένο)

Η μη υδατική φάση των CAHs μπορεί να αποτελεί πηγή ρύπων που διαλύονται στο υπόγειο νερό και εξαπλώνονται μέσω αυτού για δεκαετίες ή και περισσότερο (U.S. EPA, 1999b). Στην πράξη όμως, η μη υδατική φάση είναι πολύ δύσκολο να εντοπιστεί και να ποσοτικοποιηθεί. Έτσι, χρησιμοποιούνται συνήθως εμπειρικοί κανόνες που βασίζονται στις μέγιστες συγκεντρώσεις που έχουν μετρηθεί σε έναν χώρο. Οι Feenstra & Cherry (1988) πρότειναν ότι αν η συγκέντρωση ενός χλωριωμένου διαλύτη σε ένα φρέαρ παρακολούθησης του υπόγειου νερού σε έναν ρυπασμένο χώρο υπερβαίνει το 10% της υδατικής του διαλυτότητας, τότε αυτό μπορεί να είναι ενδεικτικό της ύπαρξης μη υδατικής φάσης (σύμφωνα με τους McNab *et al.*, 1999). Οι Newell & Ross (1991) πρότειναν πιο συντηρητικό κατώτατο όριο της υδατικής διαλυτότητας, ίσο με 1%.

Η βιοαποδόμηση ενός ρύπου συμβαίνει κατά κανόνα επειδή ένας μικροοργανισμός μπορεί να επωφεληθεί από την ενέργεια που εκλύεται από μια αντίδραση οξειδωσης-αναγωγής για να επιζήσει και να συνθέσει νέα κύτταρα (Field *et al.*, 2004). Μια οργανική ένωση μπορεί να βιοαποδομηθεί δρώντας είτε ως δέκτης ηλεκτρονίων (electron acceptor) είτε ως δότης ηλεκτρονίων (electron donor), είτε μέσω συμμεταβολισμού (cometabolism). Στις δύο πρώτες περιπτώσεις, η οργανική ένωση λειτουργεί ως πρωτογενής πηγή άνθρακα και ενέργειας για τους μικροοργανισμούς. Αντιθέτως, κατά τον συμμεταβολισμό η οργανική ένωση βιοαποδομείται τυχαία από ένα ένζυμο, που παράγεται από τη χρήση μιας δεύτερης ένωσης ως πρωτογενούς πηγής ενέργειας ή άνθρακα. Η βιοαποδόμηση μιας οργανικής

ένωσης μπορεί να συμβεί με ή χωρίς την παρουσία διαλυμένου οξυγόνου ή με άλλα λόγια, κάτω από αερόβιες ή αναερόβιες συνθήκες, αντίστοιχα.

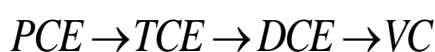
Η αναγωγική αποχλωρίωση (reductive dechlorination) είναι μια αντίδραση κατά την οποία ένας χλωριωμένος διαλύτης λειτουργεί ως τελικός δέκτης ηλεκτρονίων και ένα άτομο χλωρίου στο μόριό του αντικαθίσταται από ένα άτομο υδρογόνου. Αυτή η αντίδραση έχει σαν αποτέλεσμα την αναγωγή του χλωριωμένου διαλύτη. Όταν η αντίδραση είναι βιολογική, και οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν το υπόστρωμα (substrate) (δηλ. τον δότη ηλεκτρονίων) για ενέργεια και σύνθεση νέων κυττάρων, η αντίδραση ονομάζεται χλωροαναπνοή (chlororespiration). Κατά την χλωροαναπνοή, το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως δότης ηλεκτρονίων. Η γενικευμένη αντίδραση δίνεται ως εξής:



όπου το C-Cl αντιπροσωπεύει τον δεσμό άνθρακα- χλωρίου στον χλωριωμένο διαλύτη. Σε αυτήν την αντίδραση, το  $H_2$  είναι ο πρωτογενής δότης ηλεκτρονίων που οξειδώνεται και ο χλωριωμένος διαλύτης είναι ο τελικός δέκτης ηλεκτρονίων που ανάγεται. Το υδρογόνο παράγεται στο υπέδαφος από τη ζύμωση (fermentation) μιας μεγάλης ποικιλίας οργανικών ενώσεων που περιλαμβάνουν τους πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες και τον φυσικό οργανικό άνθρακα.

Για να συμβεί η χλωροαναπνοή, πρέπει να ισχύουν οι ακόλουθες προϋποθέσεις: (1) οι συνθήκες στο υπέδαφος να είναι αναερόβιες και το δυναμικό οξειδοαναγωγής (oxidation-reduction potential - ORP) να είναι χαμηλό, (2) οι υφιστάμενοι χλωριωμένοι διαλύτες στο πεδίο να είναι επιδεκτικοί σε αναγωγική αποχλωρίωση και (3) να υπάρχει επαρκής ποσότητα υποστρωμάτων ζύμωσης στο πεδίο για την παραγωγή διαλυμένου υδρογόνου (Wiedemeier *et al.*, 1999).

Κατά την αναγωγική αποχλωρίωση των χλωροαιθινίων γίνεται διαδοχική αποχλωρίωση του PCE σε TCE, του TCE σε διχλωροαιθένιο (DCE), του DCE σε VC και τελικά του VC σε αιθένιο (Σχήμα 2.2). Κατά την αναγωγική αποχλωρίωση του TCE μπορούν θεωρητικά να παραχθούν και τα τρία ισομερή του DCE (1,1-διχλωροαιθένιο (1,1-DCE), cis-1,2-διχλωροαιθένιο (cis-DCE) και trans-1,2-διχλωροαιθένιο (trans-DCE)) (Wiedemeier *et al.*, 1998). Ο Bouwer (1994) αναφέρει ότι το ισομερές cis-DCE παράγεται πιο συχνά από τη βιοαποδόμηση του TCE απ' ό,τι το ισομερές trans-DCE, ενώ το ισομερές 1,1-DCE είναι το λιγότερο συχνό προϊόν βιοαποδόμησης του τριχλωροαιθινίου (σύμφωνα με τους Wiedemeier *et al.*, 1998).



Σχήμα 2.2 Αναγωγική αποχλωρίωση χλωροαιθινίων



Η αποτελεσματικότητα της αναγωγικής αποχλωρίωσης των χλωροαιθινίων ποικίλλει πολύ από χώρο σε χώρο και εξαρτάται από τον αριθμό των ατόμων χλωρίου στο μόριο της ένωσης και τις επιτόπου οξειδοαναγωγικές συνθήκες (Wiedemeier *et al.*, 1998). Το PCE ανάγεται εύκολα σε TCE, εκτός αν επικρατούν αερόβιες συνθήκες στον υδροφορέα (Bradley, 2003). Η αναγωγική αποχλωρίωση του TCE σε cis-DCE συμβαίνει σε συνθήκες αναγωγής νιτρικών ιόντων, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ή τρισθενούς σιδήρου, Fe (III) (Chapelle, 1997). Η αναγωγική αποχλωρίωση του cis-DCE σε VC ευνοείται κάτω από συνθήκες αναγωγής θεικών ιόντων, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> και μεθανογένεσης (Bradley, 2003· Chapelle, 1997). Η αναγωγική αποχλωρίωση του VC σε αιθένιο είναι πολύ αργή και θεωρείται ότι συμβαίνει σε συνθήκες μεθανογένεσης (Bradley, 2003). Κατά συνέπεια, το μονοπάτι της αναγωγικής αποχλωρίωσης παραμένει πολλές φορές ανολοκλήρωτο και οι ενώσεις cis-DCE και VC συσσωρεύονται στο υπόγειο νερό (Bradley, 2003).

Μολονότι η αναγωγική αποχλωρίωση, η οποία συμβαίνει κάτω από αυστηρά αναερόβιες συνθήκες, είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός βιομετασχηματισμού των χλωροαιθινίων, ορισμένα χλωροαιθίνια μπορεί να υποβαθμιστούν υπό αερόβιες συνθήκες. Οι ενώσεις TCE, cis-DCE και VC αποδομούνται συμμεταβολικά, ενώ το VC και ενδεχομένως το cis-DCE μπορεί να οξειδώνονται άμεσα σε διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub> (ανοργανοποίηση) υπό αερόβιες συνθήκες (Bradley, 2003).

### **2.3 Συμπερασματικά σχόλια**

Η αναγωγική αποχλωρίωση είναι μια πολυπαραμετρική διαδικασία. Καλό θα ήταν να μπορεί να εκτιμηθεί η πρόοδος της «εκ του αποτελέσματος», δηλαδή από μετρήσεις πεδίου. Με αυτό ασχολείται η παρούσα διπλωματική εργασία.



## Κεφάλαιο 3

### Φυσική εξασθένηση χλωροαιθενίων στο πεδίο

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται τι μπορεί να πετύχει η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση σε χώρους ρυπασμένους με χλωροαιθένια. Προς αυτήν την κατεύθυνση, αναζητήθηκαν στη βιβλιογραφία συμπεράσματα από υπάρχουσες συλλογές (compilations) περιστατικών των McGuire *et al.* (2004a, b) και των Newell *et al.* (2006). Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε μια καινούρια συλλογή περιστατικών όπου η αποκατάσταση με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση έχει ολοκληρωθεί με βάση δεδομένα από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α.. Τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας της καινούριας συλλογής παρουσιάζονται επίσης σε αυτό το κεφάλαιο. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι βιβλιογραφικές πηγές στις οποίες αναζητήθηκαν περιστατικά στα οποία έχει αξιολογηθεί και/ή έχει εγκριθεί η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση. Τέλος, διατυπώνονται κριτήρια επιλογής τριών από αυτά τα περιστατικά που θεωρούνται αντιπροσωπευτικά των ρυπασμένων χώρων με χλωροαιθένια, τα οποία θα αναλυθούν με το λογισμικό BIOCHLOR στο Κεφάλαιο 5 με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για την αποτελεσματικότητα της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης.

#### 3.1 Συμπεράσματα από υπάρχουσες συλλογές περιστατικών

Η πρώτη συλλογή, με τίτλο “Historical and retrospective survey of monitored natural attenuation: A line of inquiry supporting monitored natural attenuation and enhanced passive remediation of chlorinated solvents” (McGuire *et al.*, 2004a, b), πραγματοποιήθηκε για λογαριασμό της Υπηρεσίας Ενέργειας των Η.Π.Α. (U.S. Department of Energy - U.S. DOE). Η εν λόγω συλλογή περιλαμβάνει δεδομένα από 45 ρυπασμένους χώρους στις Η.Π.Α. και στην Ευρώπη όπου εφαρμόζεται ή είναι υπό εξέταση η εφαρμογή της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης, είτε αυτόνομα είτε σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες αποκατάστασης. Από τους Ευρωπαϊκούς χώρους, οι εννέα βρίσκονται στην Ολλανδία και ο ένας στην Ιταλία. Οι μισοί από τους ρυπασμένους χώρους που συμπεριλήφθηκαν στη μελέτη είναι είτε στεγνοκαθαριστήρια (26%) είτε χώροι υγειονομικής ταφής (24%). Βιομηχανίες που αντιπροσωπεύονται, επίσης, στη συλλογή είναι εγκαταστάσεις συντήρησης αεροσκαφών (12%), εργοστάσια μετάλλων (5%), εργοστάσια παραγωγής διαλυτών (5%) και εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρονικών ειδών (5%). Η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση εφαρμόζεται αυτόνομα στα 13 περιστατικά (29% του συνόλου). Από τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν γι’ αυτά τα 13 περιστατικά, προέκυψε ότι: 1) σε πάνω από τα μισά η ταχύτητα μεταγωγής του υπόγειου νερού είναι μικρότερη από 6 m/y και 2) στα περισσότερα το μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης είναι μικρότερο από 150 m. Σύμφωνα με την ίδια έρευνα, η μέθοδος χρησιμοποιείται σπάνια αυτόνομα για την εξυγίανση

υπογείων νερών με συνολικές συγκεντρώσεις χλωριωμένων διαλυτών που υπερβαίνουν τα 10 mg/L.

Για να έχει ο αναγνώστης της παρούσας διπλωματικής εργασίας μια αίσθηση της τάξης μεγέθους της ταχύτητας μεταγωγής και του μήκους εξάπλωσης της ρύπανσης σε χώρους ρυπασμένους με χλωριωμένους διαλύτες, έγινε αναζήτηση των διάμεσων τιμών (median values) τους σε τέσσερις βιβλιογραφικές πηγές: (1) Newell *et al.* (1990), (2) Wiedemeier *et al.* (1999), (3) McNab *et al.* (1999) και (4) Aziz *et al.* (2000b). Τα αποτελέσματα της αναζήτησης, που συνοψίζονται στους Πίνακες 3.1 και 3.2, παρουσιάζονται αναλυτικά στις παρακάτω παραγράφους.

Η βάση δεδομένων “Hydrogeologic Database for Groundwater Modeling” (HDBD) περιλαμβάνει πληροφορίες που συλλέχθηκαν μέσω ερωτηματολογίων για τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά 400 ρυπασμένων χώρων στις Η.Π.Α. (Newell *et al.*, 1990). Η διάμεση τιμή της ταχύτητας μεταγωγής στους 290 από αυτούς τους χώρους, για τους οποίους διατίθενται δεδομένα, είναι 26,8 m/y. Για 88 ρυπασμένους χώρους με χλωροαιθένια από αυτή τη βάση δεδομένων, η διάμεση τιμή του μήκους εξάπλωσης της ρύπανσης υπολογίστηκε ίση με 305 m (Wiedemeier *et al.*, 1999).

Στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος που εκπονήθηκε από τους McNab *et al.* (1999) στο εργαστήριο Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), συλλέχθηκαν δεδομένα από 65 περιστατικά ρύπανσης του υπογείου νερού με χλωριωμένους διαλύτες στις Η.Π.Α. που αντιπροσωπεύουν ποικιλία υδρογεωλογικών συνθηκών και πηγών ρύπων, όπως μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, στεγνοκαθαριστήρια και χώρους υγειονομικής ταφής. Το TCE ήταν ο πιο διαδεδομένος ρύπος σε αυτούς του ρυπασμένους χώρους. Από τις 55 ρυπασμένες εκτάσεις με TCE, το 67% είχαν μέγιστες συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 0,1 mg/L και το 35% είχαν μέγιστες συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 1 mg/L. Διαθέσιμα δεδομένα για τη μέση υδραυλική αγωγιμότητα υπήρχαν για τους 46 από τους 65 ρυπασμένους χώρους, ενώ για τη μέση υδραυλική κλίση για τους 34 από τους 46. Χρησιμοποιώντας μια υποθετική τιμή του πορώδους  $n=0,25$ , κοινή για τα 34 περιστατικά, οι McNab *et al.* (1999) υπολόγισαν, μέσω της σχέσης  $v_s = \frac{Ki}{n}$ , όπου  $K$ = μέση υδραυλική αγωγιμότητα,  $i$ = μέση υδραυλική κλίση και  $n$ = πορώδες, μέση ταχύτητα μεταγωγής ίση με  $v_s=22,3$  m/y, θεωρώντας ότι οι ταχύτητες μεταγωγής κατανέμονται λογαριθμοκανονικά. Για τους 65 ρυπασμένους χώρους, η διάμεση τιμή του μήκους εξάπλωσης του ρύπου που έχει επεκταθεί περισσότερο ήταν 488 m. Ως μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης ορίζεται, εδώ, η μέγιστη απόσταση μεταξύ του φρέατος παρακολούθησης με τις μεγαλύτερες ιστορικά συγκεντρώσεις και της καμπύλης ίσων συγκεντρώσεων (isoconcentration contour) των 0,01 mg/L.

Οι Aziz *et al.* (2000b) δημιούργησαν για το κέντρο της Πολεμικής Αεροπορίας για την Περιβαλλοντική Αριστεία (Air Force Center for Environmental Excellence - AFCEE) μια βάση δεδομένων για 24 ρυπασμένους χώρους με χλωροαιθένια και χλωροαιθένια στις Η.Π.Α., κυρίως Αεροπορικές Βάσεις (42%) και βιομηχανίες (41%). Στις Αεροπορικές Βάσεις το 25% των χώρων ήταν περιοχές πραγματοποίησης πυροσβεστικών ασκήσεων, όπου οι διαρροές μείγματος χλωριωμένων και πετρελαϊκών υδρογονανθράκων ήταν συχνό φαινόμενο. Σε αυτήν τη βάση δεδομένων περιλαμβάνονται, επίσης, χώροι υγειονομικής ταφής (13%) και χώροι που δεν ανήκουν στις προηγούμενες κατηγορίες (4%). Το TCE και το cis-DCE ήταν οι πιο διαδεδομένοι ρύποι στη βάση δεδομένων (υπήρχαν σε 22 περιστατικά). Η μέγιστη συγκέντρωση του TCE σε κάθε ρυπασμένο χώρο κυμαινόταν από 0,002 έως 570 mg/L, με διάμεση τιμή της μέγιστης συγκέντρωσης 3,255 mg/L. Οι κατηγορίες εδαφών που αντιπροσωπεύονται στη βάση δεδομένων είναι ποικίλες, αλλά στο 62% των χώρων το έδαφος ήταν ιλυώδης άμμος. Η διάμεση τιμή της ταχύτητας μεταγωγής του υπόγειου νερού υπολογίστηκε, μέσω της σχέσης  $v_s = \frac{Ki}{n}$ , ίση με 18,3 m/y. Από τα χλωροαιθένια, ο ρύπος με τη μέγιστη διάμεση τιμή μήκους εξάπλωσης της ρύπανσης ήταν το TCE (370 m) για 21 περιστατικά και από τα χλωροαιθένια το 1,1-διχλωροαιθάνιο (503 m) για 8 περιστατικά. Το μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης καθορίστηκε, εδώ, για κάθε χλωροαιθάνιο και χλωροαιθένιο από το όριο ανίχνευσης στις καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων, που στις περισσότερες περιπτώσεις ήταν 0,001 mg/L.

Πίνακας 3.1 Διάμεση τιμή της ταχύτητας μεταγωγής του υπόγειου νερού σε ρυπασμένους χώρους από τρεις βιβλιογραφικές πηγές

ΔΙΑΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ (m/y)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΩΝ	ΑΝΑΦΟΡΑ
26,8	290	Newell <i>et al.</i> (1990)
22,3	34	McNab <i>et al.</i> (1999)
18,3	24	Aziz <i>et al.</i> (2000b)

Πίνακας 3.2 Διάμεση τιμή του μήκους εξάπλωσης της ρύπανσης σε ρυπασμένους χώρους με χλωριωμένους διαλύτες από τρεις βιβλιογραφικές πηγές

ΕΝΩΣΗ	ΔΙΑΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΕΞΑΠΛΩΣΗΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ (m)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΩΝ	ΑΝΑΦΟΡΑ
Χλωροαιθένια	305	88	Wiedemeier <i>et al.</i> (1999)
Χλωριωμένοι διαλύτες	488	65	McNab <i>et al.</i> (1999)
TCE	370	21	Aziz <i>et al.</i> (2000b)
1,1-DCA	503	8	

TCE= Τριχλωροαιθένιο, 1,1-DCA= 1,1-Διχλωροαιθάνιο

Συνοψίζοντας, η διάμεση τιμή της ταχύτητας μεταγωγής στις προαναφερθείσες βιβλιογραφικές πηγές ποικίλλει από 18,3-26,3 m/y (Πίνακας 3.1), ενώ η διάμεση τιμή του μήκους εξάπλωσης της ρύπανσης ποικίλλει από 305-503 m (Πίνακας 3.2). Δεδομένου ότι, σύμφωνα με τους McGuire *et al.* (2004a), η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση εφαρμόζεται αυτόνομα κυρίως σε ρυπασμένους χώρους με: 1) ταχύτητες μεταγωγής του υπογείου νερού <6 m/y, 2) μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης <150 m και 3) συνολικές συγκεντρώσεις χλωριωμένων διαλυτών <10 mg/L, και σε σύγκριση με όσα αναφέρονται παραπάνω για τις τιμές αυτών των μεγεθών γενικά σε χώρους ρυπασμένους χλωριωμένους διαλύτες, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η εν λόγω μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως σε χώρους χαμηλής επικινδυνότητας.

Στη δεύτερη συλλογή, με τίτλο «Multiyear temporal changes in chlorinated solvent concentrations at 23 monitored natural attenuation sites» (Newell *et al.*, 2006), περιλαμβάνονται δεδομένα για τη χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων σε 47 φρέατα παρακολούθησης που βρίσκονται κοντά στην πηγή από 23 ρυπασμένους χώρους με χλωριωμένους διαλύτες όπου η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση είναι η μοναδική μέθοδος αποκατάστασης. Οι ρυπασμένοι χώροι προέρχονται από τέσσερις πηγές δεδομένων: (1) Οι 13 ρυπασμένοι χώροι προέρχονται από τη βάση δεδομένων του McNab (2001), η οποία δημιουργήθηκε από την προαναφερθείσα έρευνα των McNab *et al.* (1999). (2) Η εταιρεία GZA GeoEnvironmental (Manchester, N.H.) παρείχε τα δεδομένα για άλλους δύο ρυπασμένους χώρους. (3) Ένας ρυπασμένος χώρος στο Νιου Τζέρσεϊ προέρχεται από τη Γεωλογική Υπηρεσία των Η.Π.Α. (United States Geological Survey– USGS). (4) Επτά ρυπασμένοι χώροι προέρχονται από το Εθελοντικό Πρόγραμμα Αποκατάστασης (Voluntary Cleanup Program - VCP) της Επιτροπής του Τέξας για την Ποιότητα του Περιβάλλοντος (Texas Commission on Environmental Quality - TCEQ). Οι μέγιστες συγκεντρώσεις του PCE, του TCE, του DCE και του τριχλωροαιθενίου (TCA) σε κάθε ρυπασμένο χώρο ποίκιλλαν από 0,059 έως 360 mg/L, με διάμεση τιμή των μέγιστων συγκεντρώσεων 11 mg/L. Με άλλα λόγια, στη βάση δεδομένων αντιπροσωπεύεται ποικιλία κατηγοριών χώρων από πολύ ρυπασμένους έως λιγότερο ρυπασμένους. Η επεξεργασία των δεδομένων οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η πηγή μπορεί να προσομοιωθεί ως μειούμενης έντασης με έναν ρυθμό απομείωσης  $1^{15}$  τάξης. Βάσει των διάμεσων τιμών των ρυθμών απομείωσης  $1^{15}$  τάξης που υπολογίστηκαν από τους Newell *et al.* (2006), προέκυψε το συμπέρασμα ότι με την προϋπόθεση ότι οι ρυθμοί θα παραμείνουν σταθεροί με τον χρόνο, μπορεί να επιτευχθεί μείωση των συγκεντρώσεων στην πηγή κατά 88% μετά από 18, 12, 9 και 6 χρόνια για το τριχλωροαιθένιο TCE, το DCE, το PCE και το TCA αντίστοιχα, χωρίς την εφαρμογή κάποιας επεμβατικής μεθόδου αποκατάστασης.

### **3.2 Συλλογή περιστατικών όπου η αποκατάσταση με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση έχει ολοκληρωθεί**

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, πραγματοποιήθηκε αναζήτηση των περιστατικών ρύπανσης με πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds - VOCs) που έχουν διαγραφεί από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α., δηλαδή των περιστατικών στα οποία οι ενέργειες αποκατάστασης έχουν ολοκληρωθεί και δεν αποτελούν πλέον απειλή για την ανθρώπινη υγεία και περιβαλλοντικούς αποδέκτες (<http://www.epa.gov/superfund/sites/query/queryhtm/npldel.htm>).

Στις 5 Ιουνίου 2014, 1322 ρυπασμένοι χώροι είχαν τοποθετηθεί στη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α και 379 είχαν διαγραφεί από τη λίστα. Επομένως, συνολικά 1701 ρυπασμένοι χώροι ήταν ή είχαν διαγραφεί από τη λίστα. Επιπλέον, άλλα 51 περιστατικά είχαν προταθεί (<http://www.epa.gov/superfund/sites/npl/index.htm>). Από τους 379 ρυπασμένους χώρους που έχουν διαγραφεί από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α., στους 341 υπάρχει κάποια υποενοότητα διαχείρισης της ρύπανσης όπου το ρυπασμένο μέσο είναι το υπόγειο νερό. Στους 157 από αυτούς, το υπόγειο νερό είναι ρυπασμένο με πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds- VOCs).

Από την αναζήτηση που έγινε στο πλαίσιο της διπλωματικής σε αυτά τα 157 περιστατικά, προέκυψε ότι στα 17 (10,8 %) υπάρχει κάποια υποενοότητα διαχείρισης με ρύπανση του υπογείου νερού με χλωροαιθένια και/ή χλωροαιθάνια, για την αποκατάσταση της οποίας εφαρμόστηκε η μέθοδος της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης αυτόνομα ή σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες. Για τα 17 αυτά περιστατικά, συλλέχθηκαν επιλεγμένα δεδομένα από τα πρακτικά απόφασης και τις αναφορές προόδου πενταετίας (five-year review reports).

Προκειμένου να έχει ο αναγνώστης μια αίσθηση της τάξης μεγέθους των μέγιστων αρχικών καταγεγραμμένων συγκεντρώσεων χλωριωμένων διαλυτών στα 17 περιστατικά (που θα παρουσιαστούν στον Πίνακα 3.4) σε σχέση με τις μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις στο πόσιμο νερό, παρατίθενται στον Πίνακα 3.3 οι τιμές τους σύμφωνα με την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. (U.S. EPA MCLs). Τα όρια αυτά διατίθενται στην ιστοσελίδα <http://water.epa.gov/drink/contaminants/>.

#### **3.2.1 Παρουσίαση δεδομένων**

Τα δεδομένα που καταγράφηκαν για κάθε περιστατικό και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4 διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία με τίτλο «Βασικά στοιχεία-Ταυτότητα Περιστατικού» περιλαμβάνει τον κωδικό της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. (EPA ID), ώστε να είναι σε θέση ο αναγνώστης να αναζητήσει πληροφορίες για το περιστατικό στη βάση δεδομένων Superfund (<http://cumulis.epa.gov/supercpad/cursites/srchsites.cfm>), τη ρυπογόνο δραστηριότητα που

σχετίζεται με τη ρύπανση του υπογείου νερού με χλωριωμένους διαλύτες, τη χρονική διάρκεια εφαρμογής της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης και τις τεχνολογίες αποκατάστασης του υπογείου νερού που μπορεί να χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό με την παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση. Η δεύτερη κατηγορία με τίτλο «καθοριστικές κύριες μεταβλητές» περιλαμβάνει όσες πληροφορίες επηρεάζουν την εξέλιξη της φυσικής εξασθένησης στο πεδίο και τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την εφαρμογή της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης, σύμφωνα με όσα αναφέρονται στο Κεφάλαιο 2 και τα συμπεράσματα από τις υπάρχουσες συλλογές περιστατικών της Ενότητας 3.1. Συγκεκριμένα, στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται οι μέγιστες αρχικές συγκεντρώσεις χλωριωμένων διαλυτών (για όσα περιστατικά δεν είναι γνωστές παρατίθεται το πρώτο σύνολο των διαθέσιμων μετρήσεων), η έκταση της ρύπανσης με χλωριωμένους διαλύτες, η ύπαρξη ή μη μεικτής ρύπανσης με πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες και η ταχύτητα μεταγωγής. Τέλος, παρατίθεται ο προβλεπόμενος χρόνος αποκατάστασης που αναφέρεται στο πρακτικό απόφασης, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθούν οι συγκεντρώσεις στους υδροφορείς κάτω από τις μέγιστες επιτρεπτές στο πόσιμο νερό (Maximum Contaminant Level - MCL).

Πίνακας 3.3 Μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις χλωριωμένων διαλυτών στο πόσιμο νερό (U.S. EPA, 2009a)

ΟΝΟΜΑ	ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΤΡΕΠΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΣΤΟ ΠΟΣΙΜΟ ΝΕΡΟ (mg/L)*
<b>ΧΛΩΡΟΑΙΘΕΝΙΑ</b>		
Τετραχλωροαιθένιο	PCE	0,005
Τριχλωροαιθένιο	TCE	0,005
cis-1,2-Διχλωροαιθένιο	cis-DCE	0,07
trans-1,2-Διχλωροαιθένιο	trans-DCE	0,1
1,1-Διχλωροαιθένιο	1,1-DCE	0,007
Βινυλοχλωρίδιο	VC	0,002
<b>ΧΛΩΡΟΑΙΘΑΝΙΑ</b>		
1,1,1-Τριχλωροαιθάνιο	1,1,1-TCA	0,2
1,1,2-Τριχλωροαιθάνιο	1,1,2-TCA	0,005
1,2-Διχλωροαιθάνιο	1,2-DCA	0,005
1,1-Διχλωροαιθάνιο	1,1-DCA	0,005*
Χλωροαιθάνιο	CA	Δ
<b>ΧΛΩΡΟΜΕΘΑΝΙΑ</b>		
Τετραχλωράνθρακας	CT	0,005
Χλωροφόρμιο	CF	0,07
Διχλωρομεθάνιο	MC	0,005
Χλωρομεθάνιο	CM	Δ

\*Επειδή δεν διατίθεται όριο από την U.S. EPA, αναφέρεται το όριο που χρησιμοποιείται στην Πολιτεία της Καλιφόρνια.

Δ= Δεν Διατίθεται όριο από την U.S. EPA



Πίνακας 3.4 Παρουσίαση επιλεγμένων δεδομένων για 17 περιστατικά ολοκληρωμένης αποκατάστασης με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α.

ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΟ	ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ-ΤΑΥΤΟΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΟΥ			
	ΚΩΔΙΚΟΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΩΝ Η.Π.Α. (EPA ID)	ΡΥΠΟΓΟΝΟΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ (Διάρκεια)	ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	ΆΛΛΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
1. A & F Material Reclaiming, Inc., OU 2, Greenup, Illinois	ILD980397079	Ανακύκλωση βιομηχανικών αποβλήτων (1977-1980)	08/1986- 04/1992	OXI
2. Agate Lake Scrapyard, OU 1, Fairview Township, Minnesota	MND980898068	Μάντρα για σίδηρο, μέταλλα και χρησιμοποιημένα αυτοκίνητα (1952-1982)	01/1994-08/1997	OXI
3. Brio Refining, Inc., OU 1, βαθύς υδροφορέας (Fifty Foot Sand Aquifer), Friendswood, Texas	TXD980625453	Αποθήκευση πρώτων υλών σε εδαφικά κοιλώματα για την ανάκτηση χημικών από χλωριωμένους υδρογονανθράκων (από τις αρχές της δεκαετίας του 1950 έως το 1982)	07/1997-12/2006	OXI
4. Cannon Engineering Corp. (CEC), OU 1, Bridgewater, Massachusetts	MAD079510780	Αποθήκευση και αποτέφρωση επικίνδυνων αποβλήτων (1974-1980)	06/1991-09/2013	OXI

Πίνακας 3.4 Παρουσίαση επιλεγμένων δεδομένων για 17 περιστατικά ολοκληρωμένης αποκατάστασης με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α. (συνέχεια)

ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΟ	ΚΑΘΟΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΥΡΙΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ					ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
	ΡΥΠΟΙ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ (mg/L) Φρέαρ (Ημερομηνία)	ΕΚΤΑΣΗ ΡΥΠΑΝΣΗΣ (Ημερομηνία)	ΜΕΙΚΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ (Συγκέντρωση πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (mg/L))	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ (m/y)	
1. A & F Material Reclaiming, Inc., OU 2, Greenup, Illinois	TCE	0,072 (1986)	ΔΑ	βενζόλιο: (0,007)	2781,3	ΔΑ
2. Agate Lake Scrapyard, OU 1, Fairview Township, Minnesota	PCE	0,044 OW-6 (23/01/1992)	πολύ μικρή έκταση, ανιχνεύθηκε μόνο σε ένα φρέαρ (OW-6)	βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλ-βενζόλιο (<MCL)	0,305-3,05	14-20 χρόνια (Στόχος: 0,007 mg/l)
3. Brio Refining, Inc., OU 1, βαθύς υδροφορέας (Fifty Foot Sand Aquifer), Friendswood, Texas	1,1,1-TCA, 1,2-DCA, VC, MC	MA	ΔΑ	ΟΧΙ	0,88-20,77	ΔΑ
4. Cannon Engineering Corp. (CEC), OU 1, Bridgewater, Massachusetts	PCE TCE cis-DCE VC 1,2-DCA	0,0055 MW-1 (T3/91) 0,85 MW-11 (T2/91) 0,55 MW-8 (T3/91) 0,012 MW-11 (T2/91) 0,0088 MW-15C (T3/91)	η ρύπανση είναι τοπική	βενζόλιο	0,61-3,05	15-20 χρόνια

1,1,1-TCA= 1,1,1-Τριχλωροαιθάνιο, 1,2-DCA= 1,2-Διχλωροαιθάνιο, PCE= Τετραχλωροαιθένιο, TCE= Τριχλωροαιθένιο, cis-DCE= cis-1,2-Διχλωροαιθένιο, VC= Βινυλοχλωρίδιο, MC= Διχλωρομεθάνιο, MCL= Μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση στο πόσιμο νερό, ΔΑ= Δεν Αναφέρεται, MA= Μη ανιχνεύσιμο, T1= 1<sup>ο</sup> Τρίμηνο, T2=2<sup>ο</sup> Τρίμηνο, T3= 3<sup>ο</sup> Τρίμηνο

Πίνακας 3.4 Παρουσίαση επιλεγμένων δεδομένων για 17 περιστατικά ολοκληρωμένης αποκατάστασης με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α. (συνέχεια)

ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΟ	ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ-ΤΑΥΤΟΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΟΥ			
	ΚΩΔΙΚΟΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΩΝ Η.Π.Α. (EPA ID)	ΡΥΠΟΓΟΝΟΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ (Διάρκεια)	ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	ΆΛΛΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
5. Charlevoix Municipal Well, OU 3, Charlevoix, Michigan	MID980794390	PCE*: Στεγνοκαθαριστήρια, κατάστημα εργαλείων και βαφών, εμπορικό κτίριο, αεροδρόμιο Charlevoix TCE*: Απολίπανση εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε σε κατασκευαστικές εργασίες στο Γυμνάσιο του Charlevoix	09/1985-12/1993	ΟΧΙ
6. Conklin Dumps, OU 1, Conklin, New York	NYD981486947	Χώρος υγειονομικής ταφής δημοτικών αποβλήτων (Upper Landfill)  (1969-1975)	03/1991-04/1997	Αεροδιασκορπισμός (air sparging)
7. Dakhue Sanitary Landfill, OU 2, Cannon Falls, Minnesota	MND981191570	Χώρος υγειονομικής ταφής για αστικά και μικρή ποσότητα βιομηχανικών αποβλήτων  (1971-1988)	06/1993-07/1995	ΟΧΙ

PCE= Τετραχλωροαιθέριο, TCE= Τριχλωροαιθέριο

\*Πρόκειται για δύο διαφορετικές εστίες ρύπανσης που υπάρχουν στον ρυπασμένο χώρο, δηλαδή το TCE που αναφέρεται εδώ δεν είναι προϊόν βιοαποδόμησης του PCE.

Πίνακας 3.4 Παρουσίαση επιλεγμένων δεδομένων για 17 περιστατικά ολοκληρωμένης αποκατάστασης με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α. (συνέχεια)

ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΟ	ΚΑΘΟΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΥΡΙΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ					ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
	ΡΥΠΟΙ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ (mg/L) Φρέαρ (Ημερομηνία)	ΕΚΤΑΣΗ ΡΥΠΑΝΣΗΣ (Ημερομηνία)	ΜΕΙΚΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ (Συγκέντρωση πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (mg/L))	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ (m/y)	
5. Charlevoix Municipal Well, OU 3, Charlevoix, Michigan	PCE	0,1 (07/1984)	ΔΑ	ΟΧΙ	ΔΑ	50 χρόνια
	TCE	0,972 (07/1984)				
6. Conklin Dumps, OU 1, Conklin, New York	CA	0,068 (1990)	ΔΑ	ξυλόλιο: (0,005)	0,014-5,56	7-9 χρόνια
7. Dakhue Sanitary Landfill, OU 2, Cannon Falls, Minnesota	PCE	0,110 MW-5A(1) (12/1992)	μήκος: 1250 m πλάτος: 625 m (1993)	βενζόλιο τολουόλιο ξυλόλιο	ρηχός υδροφορέας Sand & Gravel: 28,65	PCE: 55 χρόνια
	TCE	0,062 MW-5A(1) (12/1992)				
	cis-DCE	0,086 MW-5A(1) (12/1992)				
	VC	0,035 MW-5A(1) (12/1992)				
	1,1,1-TCA	0,019 MW-5A(1) (12/1992)				
	1,1-DCA	0,039 MW-5A(1) (12/1992)				
	1,1,2-TCA	0,010 MW-9A(1) (12/1992)				
	1,2-DCA	0,006 MW-9A(1) (12/1992)				
	CA	0,008 MW-5A(1) (12/1992)				
MC	0,009 MW-5A(1) (12/1992)					

PCE= Τετραχλωροαιθέριο TCE= Τριχλωροαιθέριο, cis-DCE= cis-1,2-Διχλωροαιθέριο, VC= Βινυλοχλωρίδιο, MC=Διχλωρομεθάνιο, 1,1,1-TCA= 1,1,1-Τριχλωροαιθάνιο, 1,1-DCA= 1,1-Διχλωροαιθάνιο, 1,2-DCA= 1,1-Διχλωροαιθάνιο, CA= Χλωροαιθάνιο, ΔΑ= Δεν Αναφέρεται

Πίνακας 3.4 Παρουσίαση επιλεγμένων δεδομένων για 17 περιστατικά ολοκληρωμένης αποκατάστασης με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α. (συνέχεια)

ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΟ	ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ-ΤΑΥΤΟΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΟΥ			
	ΚΩΔΙΚΟΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΩΝ Η.Π.Α. (EPA ID)	ΡΥΠΟΓΟΝΟΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ (Διάρκεια)	ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	ΆΛΛΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
8. Davie Landfill, OU 2, Davie, Florida	FLD980602288	Εγκατάσταση διαχείρισης αποβλήτων (1964-1987)	08/1994-08/2006	OXI
9. Fourth Street Abandoned Refinery, OU 2, Oklahoma City, Oklahoma	OKD980696470	Ανακύκλωση χρησιμοποιημένων ελαίων (αρχές δεκαετίας του '40 έως αρχές δεκαετίας του '60)	09/1993-08/2008	OXI
10. Hanford 1100-Area (USDOE), OU 1, Benton County, Washington	WA4890090075	Διαρροές, χώροι διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων, δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων και χλωριωμένων διαλυτών (1978-1988)	09/1993-09/1996	OXI
11. Marathon Battery Corp., OU 3, Cold Springs, New York	NYD010959757	Εργοστάσιο παραγωγής στρατιωτικών και εμπορικών μπαταριών (1952-1979)	09/1988-10/1996	OXI

Πίνακας 3.4 Παρουσίαση επιλεγμένων δεδομένων για 17 περιστατικά ολοκληρωμένης αποκατάστασης με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α. (συνέχεια)

ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΟ	ΚΑΘΟΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΥΡΙΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ					ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
	ΡΥΠΟΙ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ (mg/L) Φρέαρ (Ημερομηνία)	ΕΚΤΑΣΗ ΡΥΠΑΝΣΗΣ (Ημερομηνία)	ΜΕΙΚΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ (Συγκέντρωση πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (mg/L))	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ (m/y)	
8. Davie Landfill, OU 2, Davie, Florida	VC	0,003 MW 13-50	ΔΑ	ΟΧΙ	ΔΑ	16 χρόνια
9. Fourth Street Abandoned Refinery, OU 2, Oklahoma City, Oklahoma	TCE	0,02 BMW-6A (12/1996)	ΔΑ	βενζόλιο (0,19)	Άνω υδροφορέας (αλλουβιακός): 6,1	VC: 135 χρόνια
	cis-DCE	0,23 BMW-6A (12/1996)				
	VC	0,12 BMW-5 (12/1996)			Κάτω υδροφορέας (βραχώδες υπόβαθρο): 3,05	1,2- DCA: 105 χρόνια βενζόλιο: 160 χρόνια
	1,2-DCA	0,100 BMW-2 (12/1996)				
1,1-DCE	0,011 BMW-6A (12/1996)					
10. Hanford 1100-Area (USDOE), OU 1, Benton County, Washington	TCE	0,11 W 699-S31-E10A (1990)	μήκος: 1600 πλάτος: 300 m (1992)	ΟΧΙ	ΔΑ	25 χρόνια
11. Marathon Battery Corp., OU 3, Cold Springs, New York	PCE	0,0024 V 3 (04/1988)	TCE μήκος: 180 m πλάτος: 90 m (2011)	ΟΧΙ	745,4	3-10 χρόνια μετά την εκσκαφή του ρυπασμένου εδάφους
	TCE	0,1 MW-7SA (04/1988)				
	1,1,1-TCA	0,018 MW-7SA (04/1988)				
	1,2-DCA	0,015				

1,1,1-TCA= 1,1,1-Τριχλωροαιθάνιο, 1,2-DCA= 1,2-Διχλωροαιθάνιο, 1,1-DCE= 1,1-Διχλωροαιθένιο, PCE= Τετραχλωροαιθένιο, TCE= Τριχλωροαιθένιο, cis-DCE= cis-1,2-Διχλωροαιθένιο, VC= Βινυλοχλωρίδιο, ΔΑ= Δεν Αναφέρεται

Πίνακας 3.4 Παρουσίαση επιλεγμένων δεδομένων για 17 περιστατικά ολοκληρωμένης αποκατάστασης με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α. (συνέχεια)

ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΟ	ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ-ΤΑΥΤΟΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΟΥ			
	ΚΩΔΙΚΟΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΩΝ Η.Π.Α. (EPA ID)	ΡΥΠΟΓΟΝΟΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ (Διάρκεια)	ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	ΆΛΛΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
12. Mosley Road Sanitary, Landfill, OU 0, Oklahoma City, Oklahoma	OKD980620868	Χώρος υγειονομικής ταφής επικίνδυνων βιομηχανικών αποβλήτων (1971-1987)	06/1992-09/2013	ΟΧΙ
13. Oak Grove Sanitary Landfill, OU 2, Oak Grove Township, Minnesota	MND980904056	Χώρος απόρριψης δημοτικών και βιομηχανικών αποβλήτων (1967-1971) Χώρος υγειονομικής ταφής αποβλήτων (1971-1984)	12/1990-10/1996	ΟΧΙ

Πίνακας 3.4 Παρουσίαση επιλεγμένων δεδομένων για 17 περιστατικά ολοκληρωμένης αποκατάστασης με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α. (συνέχεια)

ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΟ	ΚΑΘΟΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΥΡΙΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ					ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
	ΡΥΠΟΙ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ (mg/L) Φρέαρ (Ημερομηνία)	ΕΚΤΑΣΗ ΡΥΠΑΝΣΗΣ (Ημερομηνία)	ΜΕΙΚΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ (Συγκέντρωση πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (mg/L))	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ (m/y)	
12. Mosley Road Sanitary, Landfill, OU 0, Oklahoma City, Oklahoma	PCE	0,002 MW-201 (04/1991)	ΔΑ	βενζόλιο (0,005)	ΔΑ	TCE: 25 χρόνια
	TCE	0,007 MW-201 (04/1991)				
	1,2-DCE (ολικό)	0,063 MW-11R (04/1991)				
	VC	0,017 MW-201 (04/1991)				
	1,1-DCA	0,014 MW-204 (04/1991)				
	CA	0,003 MW-201 (04/1991)				
13. Oak Grove Sanitary Landfill, OU 2, Oak Grove Township, Minnesota	TCE	0,001	ρηχός υδροφορέας: βάθος: 6 m μήκος: 488 m πλάτος: 60 m	βενζόλιο: (0,02)	ΔΑ	ΔΑ
	trans-1,2-DCE	0,0063		τολουόλιο: (0,054)		
	1,2-DCE (ολικό)	0,021		αιθυλ-βενζόλιο: (0,082)		
	VC	0,012		ξυλόλιο: (0,108)		
	1,1-DCA	0,007				
	1,2-DCA	0,0068				
	CA	0,61				
MC	0,025					

1,1-DCA= 1,1-Διχλωροαιθάνιο, 1,2-DCA= 1,2-Διχλωροαιθάνιο, CA= Χλωροαιθάνιο, PCE= Τετραχλωροαιθένιο, TCE= Τριχλωροαιθένιο, trans-DCE= trans-1,2-Διχλωροαιθένιο, VC= Βινυλοχλωρίδιο, MC= Διχλωρομεθάνιο, 1,2-DCE (ολικό)= Άθροισμα ισομερών του 1,2-Διχλωροαιθινίου, ΔΑ= Δεν Αναφέρεται



Πίνακας 3.4 Παρουσίαση επιλεγμένων δεδομένων για 17 περιστατικά ολοκληρωμένης αποκατάστασης με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α. (συνέχεια)

ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΟ	ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ-ΤΑΥΤΟΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΟΥ			
	ΚΩΔΙΚΟΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΩΝ Η.Π.Α. (EPA ID)	ΡΥΠΟΓΟΝΟΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ (Διάρκεια)	ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	ΆΛΛΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
<b>14.</b> Peter Cooper Corporation (Markhams), OU 1, Dayton, New York	NYD980592547	Διάθεση αποβλήτων (1955-1971)	12/2006-09/2010	ΟΧΙ
<b>15.</b> Petrochem Recycling Corp./Ekotek Plant, OU 1, Salt Lake City, Utah	UTD093119196	Αποθήκευση επικίνδυνων αποβλήτων (1978-1987)	09/1996-06/2003	ΟΧΙ
<b>16.</b> Sola Optical USA, Inc., OU 1, Petaluma, California	CAD981171523	Τυχαία διαρροή κοντά σε ή από τους σωλήνες πλήρωσης 6 υπόγειων δεξαμεμών αποθήκευσης διαλυτών (1978-1983)	1997-10/2013	Μέθοδος άντλησης και επεξεργασίας (pump and treat) 1988-1997
<b>17.</b> Twin Cities Air Force Reserve Base (Small Arms Range Landfill), OU 1, Minneapolis, Minnesota	MN8570024275	Χώρος υγειονομικής ταφής αποβλήτων (1963-1972)	03/1992-12/1996	ΟΧΙ

Πίνακας 3.4 Παρουσίαση επιλεγμένων δεδομένων για 17 περιστατικά ολοκληρωμένης αποκατάστασης με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α. (συνέχεια)

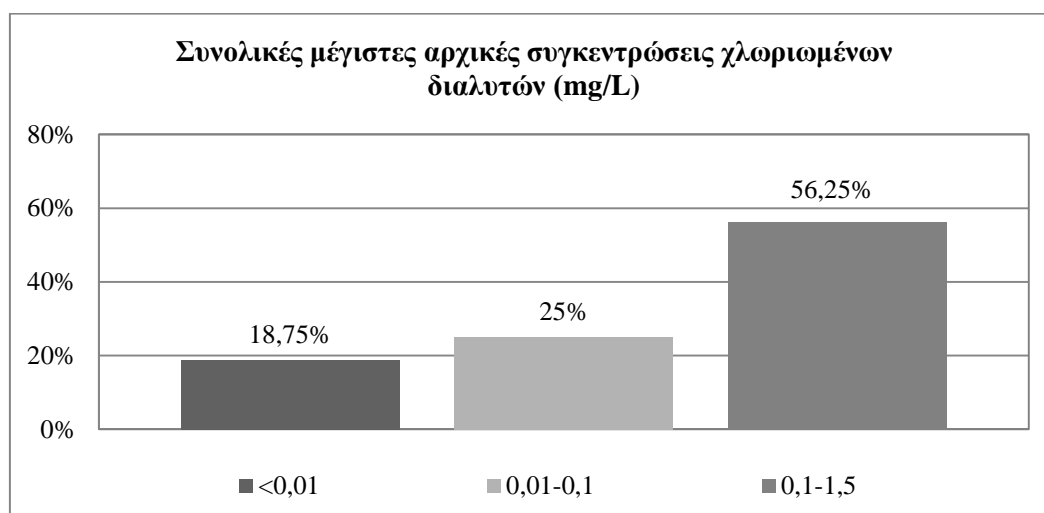
ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΟ	ΚΑΘΟΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΥΡΙΕΣ ΜΕΤΑΒΑΗΤΕΣ					ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
	ΡΥΠΟΙ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ (mg/L) Φρέαρ (Ημερομηνία)	ΕΚΤΑΣΗ ΡΥΠΑΝΣΗΣ (Ημερομηνία)	ΜΕΙΚΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ (Συγκέντρωση πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (mg/L))	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ (m/y)	
14. Peter Cooper Corporation (Markhams), OU 1, Dayton, New York	TCE, MC	ΔΑ	ΔΑ	βενζόλιο	ΔΑ	ΔΑ
15. Petrochem Recycling Corp./Ekotek Plant, OU 1, Salt Lake City, Utah	cis-DCE VC CF	0,012 0,00103 0,00931 MW-6, MW-7 (10/1994 έως 08/1995)	μήκος 300 m πλάτος 210 m (11/94)	βενζόλιο (0,002)	ΔΑ	10 χρόνια
16. Sola Optical USA, Inc., OU 1, Petaluma, California	1,1,1-TCA 1,1-DCA 1,1-DCE MC	0,052 W-14 (1997) 0,019 W-14 (1997) <0,0005 W-14 (1997) ΔΑ	107 m (2001)	ΟΧΙ	ΔΑ	ΔΑ
17. Twin Cities Air Force Reserve Base (Small Arms Range Landfill), OU 1, Minneapolis, Minnesota	TCE cis-DCE	0,006 MW 3 (01/1991) 0,003 MW 2 (01/1991)	ΔΑ	βενζόλιο (0,003) τολουόλιο (0,001)	ΔΑ	2 χρόνια

1,1,1-TCA= 1,1,1- Τριχλωροαιθάνιο, 1,1-DCA= 1,1-Διχλωροαιθάνιο, 1,1-DCE= 1,1-Διχλωροαιθένιο, TCE= Τριχλωροαιθένιο, VC= Βινυλοχλωρίδιο  
CF= Χλωροφόρμιο, MC= Διχλωρομεθάνιο, ΔΑ= Δεν Αναφέρεται

### 3.2.2 Επεξεργασία δεδομένων

Σε αυτήν την υποενότητα γίνεται παράθεση των ευρημάτων που προέκυψαν από τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν και παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 3.4 για τα 17 περιστατικά της λίστας χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α όπου η αποκατάσταση με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση έχει ολοκληρωθεί. Σκοπός της στατιστικής επεξεργασίας των δεδομένων είναι να καθοριστούν ενδεικτικές τιμές κάποιων χαρακτηριστικών των ρυπασμένων χώρων με χλωριωμένους διαλύτες που να οριοθετούν την αποτελεσματικότητα της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης και να εξεταστεί αν επαληθεύονται τα συμπεράσματα από την υπάρχουσα συλλογή περιστατικών των McGuire *et al.* (2004a, b), που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 3.1.

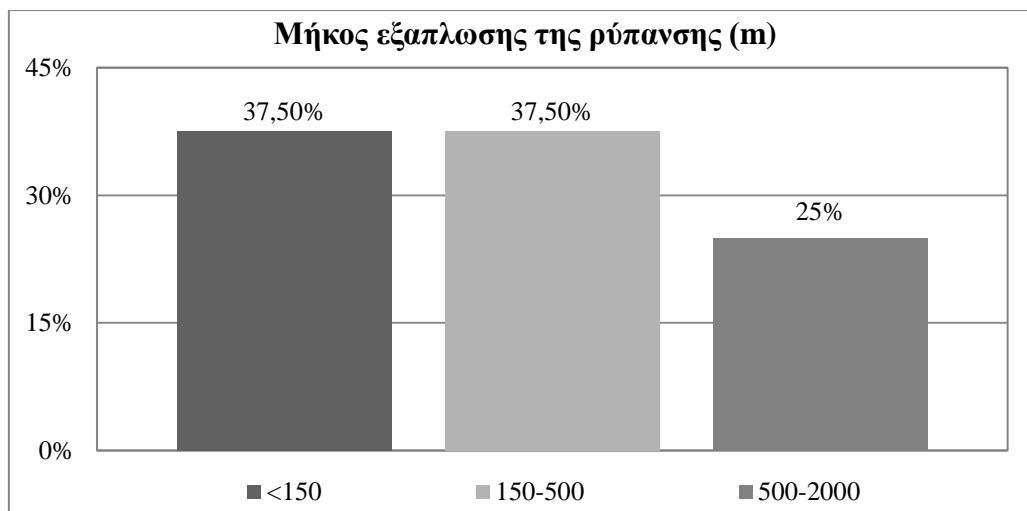
Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται, για τα 16 περιστατικά για τα οποία διατίθενται οι μετρήσεις των μέγιστων αρχικών συγκεντρώσεων των χλωριωμένων διαλυτών, το ποσοστό αυτών με άθροισμα μέγιστων αρχικών συγκεντρώσεων όλων των χλωριωμένων διαλυτών που ανήκει σε καθεμία από τις κατηγορίες: 1) <0,01 mg/L, 2) 0,01-0,1 mg/L και 3) 0,1-1,5 mg/L. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, όλα τα περιστατικά ρύπανσης του υπογείου νερού με χλωροαιθένια και/ή χλωροαιθάνια, στα οποία έχει εφαρμοστεί η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση και έχουν διαγραφεί από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α έχουν άθροισμα μέγιστων συγκεντρώσεων χλωριωμένων διαλυτών πριν την εφαρμογή της μεθόδου μικρότερο από 1,5 mg/L.



Σχήμα 3.1 Ποσοστιαία κατανομή του αθροίσματος των μέγιστων συνολικών αρχικών συγκεντρώσεων των χλωριωμένων διαλυτών στα περιστατικά (n=16)

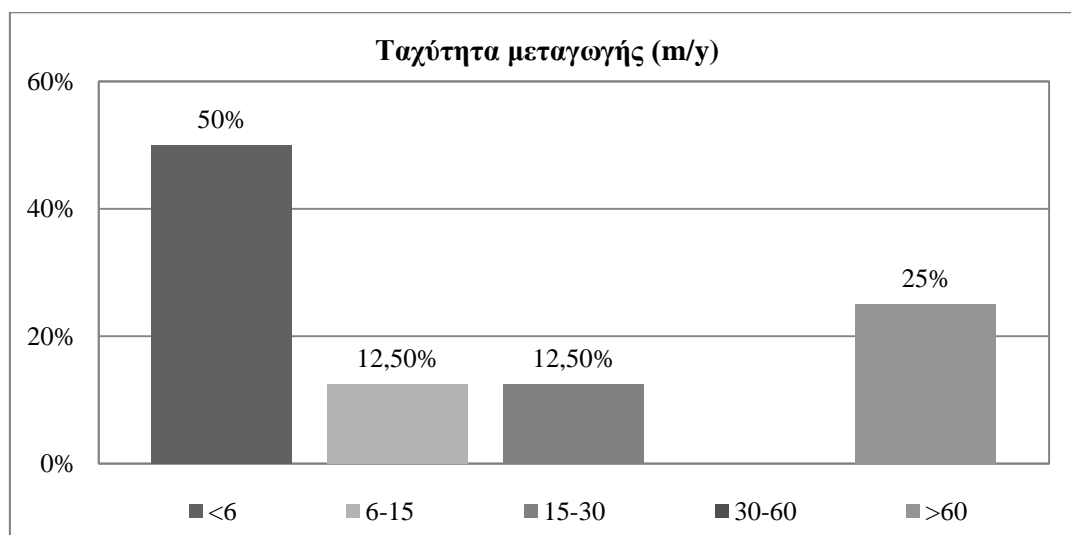
Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται, για τα οκτώ περιστατικά για τα οποία είναι γνωστό το μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης, το ποσοστό αυτών με μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης που ανήκει σε καθεμία από τις κατηγορίες: 1) <150 m, 2) 150-500 m και 3) 500-2000 m. Όπως

φαίνεται στο Σχήμα 3.2, στα περισσότερα περιστατικά το μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης είναι μικρότερο από 500 m.



Σχήμα 3.2 Ποσοστιαία κατανομή του μήκους εξάπλωσης της ρύπανσης στα περιστατικά (n=8)

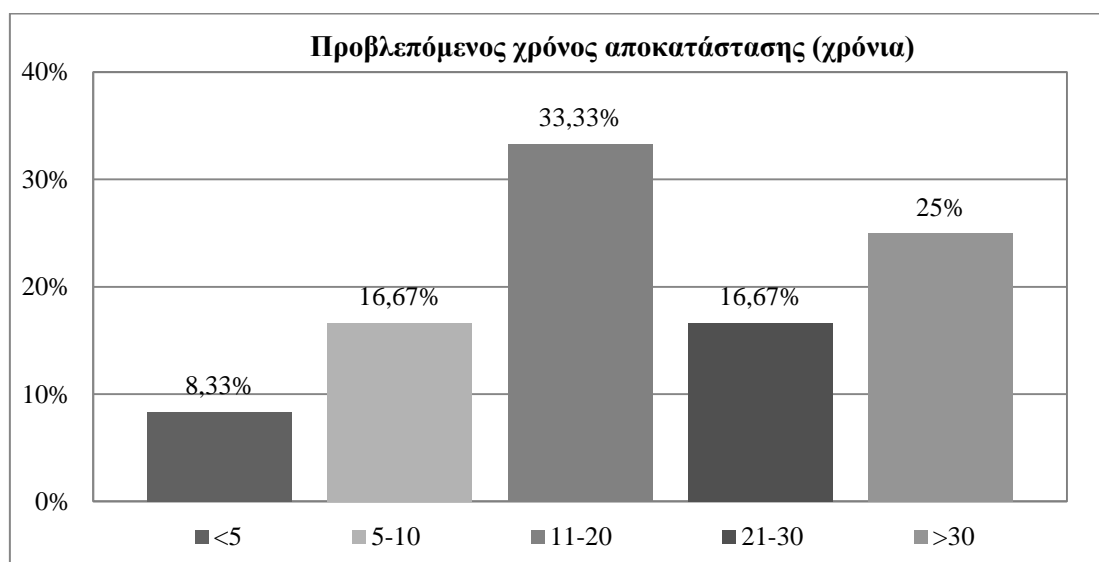
Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται, για τα οκτώ περιστατικά για τα οποία είναι γνωστή ταχύτητα μεταγωγής, το ποσοστό αυτών με ταχύτητα μεταγωγής που ανήκει σε καθεμία από τις κατηγορίες: 1) <6 m/y, 2) 6-15 m/y, 3) 15-30 m/y, 4) 30-60 m/y, 5) >60 m/y. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, στο 50% αυτών των περιστατικών η ταχύτητα μεταγωγής είναι μικρότερη από 6 m/y, που συμπίπτει ακριβώς με τα αποτελέσματα της έρευνας των McGuire *et al.* (2004a).



Σχήμα 3.3 Ποσοστιαία κατανομή της ταχύτητας μεταγωγής στα περιστατικά (n=8)

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται, για τα 12 περιστατικά για τα οποία αναφέρεται ο προβλεπόμενος χρόνος αποκατάστασης στο πρακτικό απόφασης της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α., το ποσοστό αυτών με προβλεπόμενο χρόνο αποκατάστασης που ανήκει σε καθεμία από τις κατηγορίες: 1) <5 έτη, 2) 5-10 έτη, 3) 11-20 έτη, 4) 21-30 έτη, 5)

>30 έτη. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4, μόνο στο 25% αυτών των χώρων αναμενόταν ότι απαιτούνται πάνω από 30 χρόνια για να επιτευχθούν οι στόχοι αποκατάστασης. Στα περιστατικά 2, 5, 7, 9 και 10 παρατηρήθηκε μεγάλη απόκλιση μεταξύ του προβλεπόμενου χρόνου αποκατάστασης και της χρονικής διάρκειας εφαρμογής της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης. Στα περιστατικά 2, 5 και 10 οι συγκεντρώσεις μειώθηκαν κάτω από τις μέγιστες επιτρεπτές νωρίτερα απ' ότι είχε προβλεφθεί. Στην αναφορά προόδου πενταετίας, που δημοσιεύτηκε για το περιστατικό 7 το 1999 (U.S. EPA, 1999a), αναφέρεται ότι οι ρύποι PCE, VC και 1,2-DCA ξεπερνούν τις μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις σε μικρή απόσταση από το χώρο υγειονομικής ταφής αλλά έχουν φθίνουσα τάση. Για το περιστατικό 9 δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για το αν έχουν μειωθεί οι συγκεντρώσεις κάτω από τις μέγιστες επιτρεπτές στο πόσιμο νερό (NRC, 2013).



Σχήμα 3.4 Ποσοστιαία κατανομή του προβλεπόμενου χρόνου αποκατάστασης στα περιστατικά (n=12)

Το TCE είναι ο πιο διαδεδομένος από τους χλωριωμένους διαλύτες που έχουν ρυπάνει το υπόγειο νερό στα 17 περιστατικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4, αποτελώντας ρύπο ενδιαφέροντος (Contaminant of Concern - COC) στα 11 εξ αυτών (65%). Τέλος, σύμφωνα με τα δεδομένα του Πίνακα 3.4 στην πλειοψηφία των περιστατικών (65%) υπάρχει μεικτή ρύπανση με πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες.

Συνοψίζοντας, βάσει της επεξεργασίας της συλλογής περιστατικών που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 3.2.1, η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση είναι αποτελεσματική κυρίως σε χώρους με ταχύτητες μεταγωγής μικρότερες από 6 m/y, μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης μικρότερο από 500 m και συνολικές μέγιστες καταγεγραμμένες συγκεντρώσεις χλωριωμένων διαλυτών μικρότερες από 1,5 mg/L. Ο προβλεπόμενος χρόνος αποκατάστασης για τα περισσότερα περιστατικά ήταν μικρότερος από 30 έτη. Παρόλο που τα

περιστατικά που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 3.4 ανήκαν στο παρελθόν στη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α., δεν μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικά διαφόρων κατηγοριών ρυπασμένων χώρων με χλωριωμένων διαλύτες. Τα διαθέσιμα δεδομένα για τις μέγιστες αρχικές συγκεντρώσεις, τις ταχύτητες μεταγωγής, το μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης και το προβλεπόμενο χρόνο αποκατάστασης υποδεικνύουν ότι αντιπροσωπεύονται στη συλλογή κυρίως απλά περιστατικά χαμηλής επικινδυνότητας. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο, λόγω του μεγάλου χρονικού ορίζοντα που απαιτείται για την ολοκλήρωση της αποκατάστασης ενός ρυπασμένου χώρου με χλωροαιθένια με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση. Οι χώροι που έχουν διαγραφεί από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α. και συνιστούν αυτήν τη συλλογή του Πίνακα 3.4 μπορεί να αποτελούν υποεπόμενες διαχείρισης της ρύπανσης σε ρυπασμένους χώρους μεγαλύτερης επικινδυνότητας. Η επιλογή αυτής της πηγής για αναζήτηση περιστατικών έγινε κυρίως λόγω του πλούτου των πληροφοριών που προσφέρει για περιστατικά που έχουν ολοκληρωθεί στην αγγλική γλώσσα και με ελεύθερη πρόσβαση. Ωστόσο, τα περισσότερα περιστατικά της συλλογής χαρακτηρίζονται από έλλειψη καταγεγραμμένων πληροφοριών για τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά τους, όπως την υδραυλική αγωγιμότητα και την υδραυλική κλίση, καθώς και για την έκταση της ρύπανσης.

### **3.3 Βιβλιογραφική Έρευνα - Πηγές**

Προκειμένου να δοθεί απάντηση στο ερώτημα για το τι μπορεί να πετύχει η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση, αναζητήθηκαν περιστατικά στα οποία έχει αξιολογηθεί και/ή εφαρμοστεί η εν λόγω μέθοδος για να αναλυθούν με το λογισμικό BIOCHLOR. Ο εντοπισμός των περιστατικών ήταν προϊόν μιας εκτεταμένης αναζήτησης στη διεθνή βιβλιογραφία.

Στην ενότητα αυτήν περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη διεξαγωγή της βιβλιογραφικής έρευνας και παρουσιάζεται ο κατάλογος των βιβλιογραφικών πηγών στον Πίνακα 3.5. Οι κύριες πηγές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν άρθρα από έγκριτα επιστημονικά περιοδικά, ερευνητικές μελέτες περιβαλλοντικών και στρατιωτικών υπηρεσιών των Η.Π.Α και εταιρειών που ασχολούνται με την αποκατάσταση ρυπασμένων χώρων, καθώς και πρακτικά συνεδρίων.

Αρχικά, έγινε αναζήτηση στις ιστοσελίδες έγκριτων επιστημονικών περιοδικών, που το περιεχόμενό τους αφορά τη ρύπανση του υπεδάφους και τις τεχνολογίες αποκατάστασης αυτού, με λέξεις-κλειδιά όπως: "chlorinated ethenes", "groundwater contamination", "in situ degradation", "intrinsic bioremediation", "monitored natural attenuation", "natural attenuation", "trichloroethylene". Κατόπιν, έγινε αναζήτηση στις ιστοσελίδες των κυριότερων περιβαλλοντικών και στρατιωτικών υπηρεσιών των Η.Π.Α., λόγω του πλούτου των πληροφοριών που προσφέρουν με ελεύθερη πρόσβαση στην αγγλική γλώσσα. Έτσι,

συγκεντρώθηκε ένας μεγάλος αριθμός τεχνικών κειμένων, μελετών, αναφορών επίδοσης και κόστους και πρακτικών συνεδρίων, τόσο για την αξιολόγηση της φυσικής εξασθένησης σε ρυπασμένους χώρους με χλωροαιθίνα, όσο και για περιστατικά εφαρμογής της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης.

Πίνακας 3.5 Κατάλογος βιβλιογραφικών πηγών

#### **ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

McGuire *et al.* (2004). Historical and retrospective survey of monitored natural attenuation: A line of inquiry supporting monitored natural attenuation and enhanced passive remediation of chlorinated solvents, Westinghouse Savannah River Company, Savannah River Site.

Parsons Engineering Science (ES) (1999). Natural Attenuation of Chlorinated Solvents Performance and Cost Results from Multiple Air Force Demonstration Sites. Prepared for AFCEE.

Parsons ES (2009). Final Field-Scale Evaluation of Monitored Natural Attenuation for Dissolved Chlorinated Solvent Plumes. Prepared for AFCEE.

#### **ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ ΚΥΒΕΡΝΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ**

Defense Technical Information Center (DTIC) <http://www.dtic.mil/dtic/>

Περιστατικά που διαγράφηκαν από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α. (Deleted National Priorities List Sites) <http://www.epa.gov/superfund/sites/query/queryhtm/npldel.htm>

Department of Defense (DoD) Environment, Safety and Occupational Health Network and Information Exchange <http://www.denix.osd.mil/>

Strategic Environmental Research and Development Program (SERDP)- Environmental Security Technology Certification Program (ESTCP) <http://serdp-estcp.org/>

U.S. Air Force Civil Engineer Center: Base Realignment and Closure (BRAC) <http://www.afcec.af.mil/brac/>

#### **ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ**

Groundwater

Environmental Science and Technology

Groundwater Monitoring and Remediation

Journal of Contaminant Hydrology

Journal of Hazardous Materials

Remediation Journal

Water Research

#### **ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ**

U.S. EPA (1997). Proceedings of the Symposium on Natural Attenuation of Chlorinated Organics in Ground Water. Washington, DC: EPA ORD.

### **3.4 Κριτήρια επιλογής περιστατικών προς ανάλυση με το λογισμικό BIOCHLOR**

Στην Ενότητα 3.1 αναφέρθηκε ότι σύμφωνα με τους McGuire *et al.* (2004a, b) η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση εφαρμόζεται αυτόνομα κυρίως σε ρυπασμένους χώρους με χλωριωμένους διαλύτες με τα παρακάτω χαρακτηριστικά: 1) ταχύτητες μεταγωγής μικρότερες από 6 m/y, 2) μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης μικρότερο από 150 m και 3) μέγιστες συνολικές συγκεντρώσεις χλωριωμένων διαλυτών μικρότερες από 10 mg/L. Επιπλέον, από τη συλλογή που δημιουργήθηκε και παρουσιάστηκε στην Ενότητα 3.2, βάσει δεδομένων από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α., προέκυψε ότι η αποκατάσταση με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση έχει ολοκληρωθεί κυρίως σε χώρους με ταχύτητες μεταγωγής μικρότερες από 15 m/y, μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης μικρότερο από 500 m και συνολικές συγκεντρώσεις χλωριωμένων διαλυτών μικρότερες από 1,5 mg/L.

Σύμφωνα με όσα αναφέρονται στην Ενότητα 3.1, για τα χαρακτηριστικά των ρυπασμένων χώρων με χλωριωμένους διαλύτες βάσει τεσσάρων βιβλιογραφικών πηγών: (1) Newell *et al.* (1990), (2) Wiedemeier *et al.* (1999), (3) McNab *et al.* (1999) και (4) Aziz *et al.* (2000b), τόσο τα περιστατικά εφαρμογής της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης ως μοναδικής μεθόδου αποκατάστασης στη συλλογή των McGuire *et al.* (2004a, b) όσο και αυτά στα οποία έχει ολοκληρωθεί η αποκατάσταση με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση στη συλλογή που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής αντιπροσωπεύουν κυρίως χώρους χαμηλής επικινδυνότητας. Προκειμένου να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για το τι μπορεί να πετύχει η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση σε χώρους ρυπασμένους με χλωροαιθένια, κρίθηκε σκόπιμο να αναλυθούν με το λογισμικό φυσικής εξασθένησης BIOCHLOR ρυπασμένοι χώροι που αντιπροσωπεύουν ένα ευρύτερο φάσμα περιστατικών.

Είναι γνωστό ότι η συμπεριφορά της πηγής στους ρυπασμένους χώρους με χλωροαιθένια, αν δηλαδή οι συγκεντρώσεις στην πηγή μειώνονται, παραμένουν σταθερές ή αυξάνονται με τον χρόνο, έχει καθοριστική σημασία για την αποτελεσματικότητα της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, τα περιστατικά ρύπανσης με χλωροαιθένια στα οποία θα εφαρμοστεί το λογισμικό BIOCHLOR, με σκοπό την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης επιλέχθηκαν με τα παρακάτω κριτήρια:

- 1) Οι ταχύτητες μεταγωγής του υπόγειου νερού να αντιπροσωπεύουν τα τρία παρακάτω εύρη τιμών: i) 6-30 m/y, ii) 30-60 m/y, iii) >60 m/y.
- 2) Το μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης να αντιπροσωπεύει τα δύο παρακάτω εύρη τιμών: i) 150-500 m, ii) 500-1500 m.



- 3) Οι μέγιστες συγκεντρώσεις χλωροαιθενίων του πρώτου διαθέσιμου συνόλου μετρήσεων να αντιπροσωπεύουν τα τρία παρακάτω εύρη τιμών: i) 0,1-1,5 mg/L, ii) της τάξης των 10 mg/L και iii) >100 mg/L.
- 4) Τα περιστατικά να είναι αντιπροσωπευτικά για τις περιπτώσεις πηγής μειούμενης, αυξανόμενης και σταθερής έντασης.
- 5) Να έχουν ανιχνευθεί στον χώρο όλα τα θυγατρικά προϊόντα της αναγωγικής αποχλωρίωσης της μητρικής ένωσης (PCE ή TCE).

Επιθυμητό είναι τουλάχιστον σε έναν χώρο να έχει εφαρμοστεί η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση ως μοναδική μέθοδος αποκατάστασης. Επιπλέον, ένας εκ των χώρων θα πρέπει να έχει μελετηθεί εκτενώς για τη φυσική εξασθένηση και να υπάρχει πλήθος δεδομένων για όλα τα χαρακτηριστικά του, ώστε να αποτελέσει οδηγό για την επιλογή των ελάχιστων δεδομένων που απαιτούνται για την πραγματοποίηση προβλέψεων με το BIOCHLOR. Για τους άλλους δύο χώρους θα πρέπει να υπάρχουν κάποια ελάχιστα δεδομένα που απαιτούνται ως δεδομένα εισόδου στο BIOCHLOR, ώστε η αβεβαιότητα των προβλέψεων να είναι η μικρότερη δυνατή. Για τα περιστατικά που θα αναλυθούν με το BIOCHLOR πρέπει να υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις από το πεδίο κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε δύο διαφορετικές στιγμές και στο διάστημα αυτό να μην έχουν εφαρμοστεί στον χώρο επεμβατικές μέθοδοι αποκατάστασης.

### **3.5 Συμπερασματικά σχόλια**

Μετά τη διαμόρφωση των κριτηρίων επιλογής αντιπροσωπευτικών περιστατικών ρύπανσης με χλωροαιθένια, τα οποία αφορούν τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των ρυπασμένων χώρων, το μέγεθος, την έκταση της ρύπανσης, τη μεταβολή των συγκεντρώσεων στην πηγή με τον χρόνο και την πληρότητα των διαθέσιμων πληροφοριών, ακολουθεί στο Κεφάλαιο 4 η περιγραφή του λογισμικού BIOCHLOR, ώστε να αναδειχθούν τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου στο BIOCHLOR, τα οποία ελήφθησαν υπόψη στην τελική επιλογή των τριών περιστατικών. Τα επιλεγμένα περιστατικά, βάσει των κριτηρίων που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 3.4, θα προσομοιωθούν με το BIOCHLOR στο Κεφάλαιο 5, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για την επίδοση της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης σε διαφορετικές κατηγορίες ρυπασμένων χώρων με χλωροαιθένια.



## Κεφάλαιο 4

### Το λογισμικό φυσικής εξασθένησης BIOCHLOR

Τα λογισμικά μεταφοράς ρύπων στο υπόγειο νερό διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: (1) αναλυτικά μοντέλα, δηλαδή λογισμικά που βασίζονται σε εξισώσεις, οι οποίες επιδέχονται αναλυτικές λύσεις και (2) αριθμητικά μοντέλα που βασίζονται στη χωρική διακριτοποίηση του υδροφορέα και σε αριθμητικές μεθόδους. Η εφαρμογή των αριθμητικών μοντέλων στο πεδίο απαιτεί πολύ χρόνο και προσπάθεια, λόγω της πολυπλοκότητάς τους. Αντίθετα, τα αναλυτικά μοντέλα αποτελούν μια απλή εναλλακτική για την προσομοίωση της μεταφοράς ρύπων στους υπόγειους υδροφορείς. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στο στάδιο της έρευνας πεδίου (field investigation) για τις προκαταρκτικές προσομοιώσεις που γίνονται με σκοπό την αξιολόγηση των επιπτώσεων της ρύπανσης. Επιπλέον, τα αναλυτικά μοντέλα χρησιμεύουν για την επιβεβαίωση της ακρίβειας πολύπλοκων αριθμητικών μοντέλων.

Αναλυτικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται συνήθως για την προσομοίωση της μεταφοράς και του βιομετασχηματισμού χλωριωμένων διαλυτών στους υπόγειους υδροφορείς είναι το BIOCHLOR, το REMchlor, το ART3D, το Natural Attenuation Software (NAS), το MNAtoolbox και το BioBalance Toolkit. Τα αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται πιο συχνά για τον ίδιο σκοπό βασίζονται στο μοντέλο υπόγειας ροής MODFLOW και στο μοντέλο μεταφοράς διαλυμένης ουσίας MT3D και περιλαμβάνουν τα SEAM3D, BioRedox, RT3D και PHT3D (Rifai *et al.*, 2010).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο BIOCHLOR (διαθέσιμο στην ιστοσελίδα <http://www.epa.gov/ada/csmos/models/biochlor.html>) (Aziz *et al.*, 2000a; Aziz *et al.*, 2002), αφού σύμφωνα με έρευνα των McGuire *et al.* (2004a), είναι το λογισμικό που χρησιμοποιείται πιο συχνά για την αξιολόγηση των διεργασιών φυσικής εξασθένησης σε χώρους ρυπασμένους με χλωριωμένους διαλύτες. Επιπλέον, η επιλογή αυτή έγινε διότι το BIOCHLOR είναι πολύ πιο εύχρηστο από άλλα μοντέλα μεταφοράς χλωριωμένων διαλυτών στο υπόγειο νερό (Lu *et al.*, 2006b) και απαιτεί μικρό αριθμό δεδομένων εισόδου.

Το μοντέλο BIOCHLOR αναπτύχθηκε από την εταιρεία Groundwater Services για το κέντρο της Πολεμικής Αεροπορίας για την Περιβαλλοντική Αριστεία με σκοπό την προσομοίωση της φυσικής εξασθένησης σε χώρους ρυπασμένους με χλωριωμένους διαλύτες. Λόγω των πολλών απλοποιητικών παραδοχών που ενσωματώνει, δεν υποκαθιστά τα αριθμητικά μοντέλα κατά την τελική λήψη αποφάσεων για την αποκατάσταση πολυσύνθετων ρυπασμένων χώρων, αλλά προσφέρεται ως ένα εργαλείο προκαταρκτικής αξιολόγησης ώστε να καθοριστεί αν πρέπει να επενδυθούν χρήματα σε αξιολόγηση πλήρους κλίμακας της φυσικής εξασθένησης σε έναν συγκεκριμένο ρυπασμένο χώρο.

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το λογισμικό. Αρχικά, παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο στο οποίο βασίζεται το BIOCHLOR, καθώς και οι παραδοχές και οι περιορισμοί του. Στη συνέχεια, καταγράφονται τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για το λογισμικό και τέλος, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις (δεδομένα εξόδου). Τέλος, παρατίθεται ένα παράδειγμα εφαρμογής του BIOCHLOR από τη βιβλιογραφία προκειμένου να αποκτήσει ο αναγνώστης καλύτερη εποπτεία των δυνατοτήτων του λογισμικού.

#### 4.1 Μαθηματικό μοντέλο

Το μοντέλο BIOCHLOR, που είναι προγραμματισμένο σε περιβάλλον λογιστικού φύλλου του Microsoft Excel, βασίζεται στις αναλυτικές λύσεις Domenico (1987) με τις τροποποιήσεις των Martin-Hayden & Robbins (1997) της διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς διαλυμένου ρύπου. Προσομοιώνει μονοδιάστατη μεταγωγή, τριδιάστατη μηχανική διασπορά, γραμμική ρόφηση και αναγωγική αποχλωρίωση. Η αναγωγική αποχλωρίωση θεωρείται ότι είναι μια διαδικασία διαδοχικής υποβάθμισης 1<sup>ης</sup> τάξης. Η αναλυτική λύση Domenico (1987), με τροποποιήσεις των Martin-Hayden & Robbins (1997), για υποβάθμιση 1ης τάξης στην υδατική φάση και πηγή σταθερής έντασης είναι:

$$C(x, y, z, t) = \frac{C}{8} f_x f_y f_z \quad (4.1)$$

ενώ για πηγή μειούμενης έντασης:

$$C(x, y, z, t) = \frac{C}{8} e^{-k_s t} f_x f_y f_z \quad (4.2)$$

όπου:

$$f_x = \exp\left(\frac{x\left[1 - \left(1 + \frac{4\lambda a_x}{v_s}\right)^{0,5}\right]}{2a_x}\right) \times \operatorname{erfc}\left(\frac{x\left[1 - vt\left(1 + \frac{4\lambda a_x}{v_s}\right)^{0,5}\right]}{2(a_x vt)^{0,5}}\right)$$

$$+ \exp\left(\frac{x\left[1 + \left(1 + \frac{4\lambda a_x}{v_s}\right)^{0,5}\right]}{2a_x}\right) \times \operatorname{erfc}\left(\frac{x\left[1 + vt\left(1 + \frac{4\lambda a_x}{v_s}\right)^{0,5}\right]}{2(a_x vt)^{0,5}}\right)$$

$$f_y = \operatorname{erf}\left(\frac{y + \frac{Y}{2}}{2(a_y x)^{0,5}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y - \frac{Y}{2}}{2(a_y x)^{0,5}}\right)$$

$$f_z = \operatorname{erf}\left(\frac{z + Z}{2(a_z x)^{0,5}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z - Z}{2(a_z x)^{0,5}}\right)$$

Τα σύμβολα στις εξισώσεις 4.1 και 4.2 επεξηγούνται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 Επεξήγηση των συμβόλων της λύσης Domenico (1987)

ΣΥΜΒΟΛΑ	ΜΟΝΑΔΕΣ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
x	m	Απόσταση κατάντη της πηγής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης περιοχής υπό προσομοίωση
y	m	Οριζόντια απόσταση από τον άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης
z	m	Κατακόρυφη απόσταση από την κορυφή της πηγής μέχρι το σημείο μέτρησης της συγκέντρωσης (όλες οι συγκεντρώσεις στα δεδομένα εξόδου υπολογίζονται για z=0)
t	y	Διάρκεια της ρύπανσης
C(x,y,z,t)	mg/L	Συγκέντρωση σε απόσταση x κατάντη της πηγής και οριζόντια απόσταση y από τον άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε χρόνο t
C <sub>0</sub>	mg/L	Αρχική συγκέντρωση στην πηγή (για t=0)
α <sub>x</sub>	m	Συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς
α <sub>y</sub>	m	Συντελεστής οριζόντιας εγκάρσιας μηχανικής διασποράς
α <sub>z</sub>	m	Συντελεστής κατακόρυφης εγκάρσιας μηχανικής διασποράς
n	-	Πορώδες
λ	y <sup>-1</sup>	Συντελεστής βιομετασχηματισμού
K	m/y	Υδραυλική αγωγιμότητα
i	-	Υδραυλική κλίση
R	-	Συντελεστής υστέρησης
v <sub>s</sub>	m/y	Ταχύτητα μεταγωγής (=Ki/n)
v	m/y	Ταχύτητα μεταγωγής διαιρεμένη με τον συντελεστή υστέρησης R
Y	m	Πλάτος πηγής
Z	m	Βάθος πηγής
k <sub>s</sub>	y <sup>-1</sup>	Συντελεστής απομείωσης της συγκέντρωσης στην πηγή

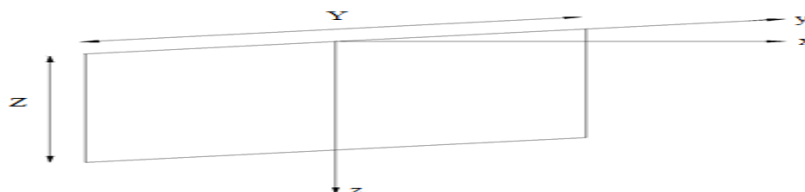
Στη μοντέλο Domenico (1987), που αναφέρεται παραπάνω, θεωρείται ότι η πηγή είναι ένα επίπεδο πλάτους Y και πάχους Z, κάθετο στη διεύθυνση της ροής, που βρίσκεται στο x=0 σε ημίαιπρο, αρχικά καθαρό υδροφορέα (Σχήμα 4.1), με συγκέντρωση η οποία είτε είναι σταθερή με τον χρόνο, δηλαδή:

$$C(0, Y, Z, t) = C_0 \quad (4.3)$$

είτε φθίνει εκθετικά με τον χρόνο, δηλαδή:

$$C(0, Y, Z, t) = C_0 e^{-k_s t} \quad (4.4)$$

Τα σύμβολα C, Y, Z, t, C<sub>0</sub>, k<sub>s</sub>, που χρησιμοποιούνται στις Σχέσεις 4.3 και 4.4, επεξηγούνται στον Πίνακα 4.1.



Σχήμα 4.1 Η πηγή της ρύπανσης προσομοιώνεται ως ένα επίπεδο πλάτους Y και πάχους Z, κάθετο στη διεύθυνση της ροής, που βρίσκεται στο x=0 σε ημίαιπρο, αρχικά καθαρό πεδίο

Η αρχική συγκέντρωση στην πηγή μπορεί να θεωρηθεί επίσης ότι μεταβάλλεται χωρικά κατά πλάτος σε τρία επίπεδα τιμών. Σε αυτήν την περίπτωση το BIOCHLOR κάνει υπέρθεση τριών μοντέλων Domenico, καθένα με διαφορετικό πλάτος πηγής που αντιστοιχεί σε διαφορετική αρχική συγκέντρωση στην πηγή και ίδιο βάθος πηγής.

Η αναλυτική λύση που χρησιμοποιεί το BIOCHLOR περιλαμβάνει κάποιες απλοποιητικές παραδοχές. Ο υδροφορέας και το πεδίο ροής θεωρούνται ομογενή και ισότροπα. Η μοριακή διάχυση στους όρους της υδροδυναμικής διασποράς ( $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$ ) θεωρείται αμελητέα ώστε  $D_x = a_x v$ ,  $D_y = a_y v$  και  $D_z = a_z v$ , όπου  $a_x$ = συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς,  $a_y$ = συντελεστής οριζόντιας εγκάρσιας μηχανικής διασποράς,  $a_z$ = συντελεστής κατακόρυφης εγκάρσιας μηχανικής διασποράς και  $v$ = ταχύτητα μεταγωγής διαιρεμένη με τον συντελεστή υστέρησης  $R$ . Άρα, το μοντέλο δεν είναι κατάλληλο για την προσομοίωση μεταφοράς ρύπων διαμέσου εδαφών χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας εκτός αν αποδειχτεί ότι τα αποτελέσματα της μοριακής διάχυσης είναι αμελητέα. Η ρόφηση των ρύπων στους εδαφικούς κόκκους θεωρείται ότι είναι μια αναστρέψιμη διαδικασία που αντιπροσωπεύεται από μια γραμμική ισόθερμη. Τέλος, ο βιομετασχηματισμός των ρύπων θεωρείται ότι συμβαίνει μόνο στην υδατική φάση.

Το μοντέλο BIOCHLOR δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ρυπασμένων χώρων όπου: (1) πραγματοποιείται άντληση υπογείων νερών που καθιστά πολύπλοκη τη ροή στο πεδίο, (2) κάθετα διανύσματα ροής επηρεάζουν τη μεταφορά των ρύπων και (3) οι υδρογεωλογικές συνθήκες παρουσιάζουν μεγάλη χωρική ετερογένεια.

## 4.2 Δεδομένα εισόδου στο BIOCHLOR

Τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για το μοντέλο BIOCHLOR, τα σύμβολα και οι μονάδες τους καταγράφονται στον Πίνακα 4.2. Τα δεδομένα εισόδου του BIOCHLOR περιλαμβάνουν την υδραυλική αγωγιμότητα, το πορώδες, την υδραυλική κλίση (για τον υπολογισμό της ταχύτητας μεταγωγής του υπόγειου νερού, τη μηχανική διασπορά στις τρεις διαστάσεις (διαμήκη, εγκάρσια κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση), τους συντελεστές διαχωρισμού, το κλάσμα οργανικού άνθρακα (για τον υπολογισμό του συντελεστή υστέρησης), τους συντελεστές βιομετασχηματισμού, τον χρόνο προσομοίωσης, τις διαστάσεις της περιοχής υπό προσομοίωση (μήκος και πλάτος), τη γεωμετρία των αρχικών συγκεντρώσεων στην πηγή (πλάτος και βάθος) και τις αρχικές συγκεντρώσεις (κατά την έναρξη της διαρροής) διαλυμένων χλωροαιθενίων σε ένα φρέαρ παρακολούθησης κοντά στην εστία της ρύπανσης. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται με περισσότερες λεπτομέρειες τα δεδομένα εισόδου και τα αντίστοιχα δεδομένα που απαιτούνται από το πεδίο.

Πίνακας 4.2 Δεδομένα εισόδου του μοντέλου BIOCHLOR

ΕΙΔΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΜΟΝΑΔΕΣ
Υδρογεωλογικά	Υδραυλική αγωγιμότητα	K	m/y
	Υδραυλική κλίση	i	-
	Πορώδες	n	-
Σχετικά με Διασπορά	Συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς	$\alpha_x$	m
	Λόγος συντελεστών οριζόντιας εγκάρσιας/διαμήκους μηχανικής διασποράς	$\alpha_y/\alpha_x$	-
	Λόγος συντελεστών κατακόρυφης εγκάρσιας/διαμήκους μηχανικής διασποράς	$\alpha_z/\alpha_x$	-
Σχετικά με Ρόφηση	Ξηρή πυκνότητα εδάφους	$\rho_d$	L/kg
	Κλάσμα οργανικού άνθρακα	$f_{oc}$	-
	Συντελεστές διαχωρισμού των PCE, TCE, DCE, VC, αιθενίου	$K_{oc}$	L/kg
Σχετικά με Βιομετασχηματισμό	Συντελεστές βιομετασχηματισμού PCE → TCE	$\lambda$	1/y
	TCE → cis-DCE		
	cis-DCE → VC		
	VC → αιθέριο		
Διάρκεια ρύπανσης	Χρόνος προσομοίωσης	t	y
Διαστάσεις περιοχής υπό προσομοίωση	Μήκος	-	m
	Πλάτος	-	m
Δεδομένα πηγής	Πάχος πηγής στην κορεσμένη ζώνη	Z	m
	Πλάτος πηγής	Y	m
	Αρχικές συγκεντρώσεις στην πηγή	$C_0$	mg/L
	Συντελεστής απομείωσης της συγκέντρωσης της πηγής	$k_s$	1/y

PCE= Τετραχλωροαιθέριο, TCE= Τριχλωροαιθέριο, cis- DCE= cis-1,2- Διχλωροαιθέριο, VC= Βινυλοχλωρίδιο

Ο χρόνος προσομοίωσης είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ της έναρξης της διαρροής των διαλυμένων χλωροαιθινίων από την πηγή μέχρι το έτος για το οποίο εκτελούνται οι προσομοιώσεις αναλόγως του σκοπού για τον οποίο γίνεται η χρήση του μοντέλου.

Τα αποτελέσματα του BIOCHLOR παρουσιάζονται με τη μορφή 1) διαγραμμάτων μεταβολής της συγκέντρωσης του κάθε χλωροαιθενίου σε σχέση με την απόσταση κατάντη της πηγής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, για τις περιπτώσεις μηδενικής υποβάθμισης των χλωροαιθινίων και υποβάθμισης 1<sup>ης</sup> τάξης ή 2) διδιάστατου διαγράμματος μεταβολής των συγκεντρώσεων στο οριζόντιο επίπεδο (διευθύνσεις x και y). Η απόσταση κατάντη της πηγής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας μέχρι την οποία παρουσιάζεται η προβλεπόμενη μεταβολή της συγκέντρωσης του κάθε χλωροαιθενίου και οι διαστάσεις x και y του διδιάστατου διαγράμματος καθορίζονται από τις τιμές που λαμβάνουν οι διαστάσεις της περιοχής υπό προσομοίωση (μήκος και πλάτος).

Το πλάτος και το βάθος της πηγής είναι η οριζόντια και κατακόρυφη εγκάρσια, αντίστοιχα, έκταση στη διεύθυνση της ροής, περί το φρέαρ παρακολούθησης της πηγής, όπου μετρήθηκαν οι μέγιστες συγκεντρώσεις διαλυμένων χλωροαιθενίων κατά την έναρξη της διαρροής τους. Οι παράμετροι αυτές δεν μπορούν να μετρηθούν απευθείας στο πεδίο. Η εκτίμηση του πλάτους και του βάθους της πηγής μπορεί να γίνει από τις καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων σε κάτοψη και τομή του πεδίου κοντά στην εστία της ρύπανσης. Αν η κατανομή της ρύπανσης κοντά στην πηγή κατακόρυφα δεν είναι διαθέσιμη, το βάθος της πηγής λαμβάνεται συντηρητικά ίσο με το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα.

Για τις ανάγκες του μοντέλου απαιτείται η εισαγωγή δύο ειδών συντελεστών. Το πρώτο είδος συντελεστών (συντελεστές βιομετασχηματισμού,  $\lambda$ ) αναφέρεται στην αναγωγική αποχλωρίωση των διαλυμένων χλωριωμένων ενώσεων κατάντη της πηγής και το δεύτερο (συντελεστής απομείωσης,  $k_s$ ) αντιπροσωπεύει τη φυσική εξασθένηση της πηγής με τον χρόνο. Αυτοί οι δύο συντελεστές είναι ιδιαίτερα σημαντικοί, καθώς αντιπροσωπεύουν τους κύριους μηχανισμούς μείωσης της μάζας των χλωροαιθενίων στο υπόγειο νερό. Η καθοριστική τους επίδραση στις προσομοιώσεις παρουσιάζεται μέσα από αναλύσεις ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκαν με το BIOCHLOR για μία υποθετική περίπτωση διαρροής PCE από τους Hausman & Rifai (2005). Γενικά, ο συντελεστής απομείωσης της πηγής μειώνει μόνο τις συγκεντρώσεις κοντά στην πηγή και δεν περιορίζει την εξάπλωση των ρύπων κατάντη της πηγής. Σχετικά υψηλοί συντελεστές απομείωσης των συγκεντρώσεων στην πηγή έχουν σαν αποτέλεσμα η αιχμή των συγκεντρώσεων να εμφανίζεται εκτός της εστίας της ρύπανσης, ένα φαινόμενο που έχει παρατηρηθεί σε κάποιους ρυπασμένους χώρους. Για μικρούς χρόνους προσομοίωσης, της τάξης των δέκα ετών, η εκθετική μείωση των συγκεντρώσεων της πηγής με τον χρόνο έχει μικρότερη επίδραση στις συγκεντρώσεις των ρύπων κατάντη της πηγής απ' ό,τι για μεγάλους χρόνους προσομοίωσης, της τάξης των 100 ετών. Η αύξηση των συντελεστών βιομετασχηματισμού οδηγεί σε μείωση των συγκεντρώσεων κατάντη της πηγής και περιορίζει την εξάπλωση των ρύπων, χωρίς να μεταβάλλονται οι συγκεντρώσεις στην πηγή. Ο συνδυασμός των δύο ειδών συντελεστών έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των συγκεντρώσεων τόσο κοντά στην πηγή όσο και κατάντη καθώς και τον περιορισμό της εξάπλωσης των ρύπων κατάντη.

Στην επιστημονική βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί τιμές για τους συντελεστές βιομετασχηματισμού των χλωροαιθενίων τόσο από μελέτες στο πεδίο όσο και από μελέτες στο εργαστήριο. Για ένα συγκεκριμένο χλωροαιθέριο οι συντελεστές βιομετασχηματισμού μπορεί να ποικίλλουν μέχρι τρεις έως τέσσερις τάξεις μεγέθους. Οι τιμές που προκύπτουν από εργαστηριακές μελέτες συνήθως υπερεκτιμούν τους συντελεστές βιομετασχηματισμού, λόγω της δυσκολίας προσομοίωσης των πραγματικών συνθηκών στο πεδίο. Οι Suarez & Rifai (1999) πραγματοποίησαν στατιστική επεξεργασία δεδομένων από 138 μελέτες για



χλωριωμένους διαλύτες προκειμένου να καθορίσουν το εύρος των συντελεστών βιομετασχηματισμού των χλωριωμένων διαλυτών κάτω από διαφορετικές οξειδοαναγωγικές συνθήκες. Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές και το εύρος των καταγεγραμμένων τιμών των συντελεστών βιομετασχηματισμού των PCE, TCE, cis-DCE και VC από μελέτες στο πεδίο για συνθήκες αναγωγικής αποχλωρίωσης.

Πίνακας 4.3 Συντελεστές βιομετασχηματισμού 1<sup>ης</sup> τάξης χλωροαιθινίων από μελέτες στο πεδίο για συνθήκες αναγωγικής αποχλωρίωσης (Suarez & Rifai, 1999)

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΒΙΟΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ (y <sup>-1</sup> )			
ΕΝΩΣΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΥΡΟΣ ΚΑΤΑΓΕΓΡΑΜΜΕΝΩΝ ΤΙΜΩΝ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΕΛΕΤΩΝ
PCE	3,65	0-29,2	13
TCE	1,095	0-8,395	32
cis-DCE	0,73	0-47,75	17
VC	1,095	0-2,555	4

PCE= Τετραχλωροαιθέριο, TCE= Τριχλωροαιθέριο, cis- DCE= cis-1,2- Διχλωροαιθέριο,  
VC= Βινυλοχλωρίδιο

Στην επιστημονική βιβλιογραφία έχουν δημοσιευτεί τιμές και για τους συντελεστές απομείωσης 1<sup>ης</sup> τάξης των συγκεντρώσεων στην πηγή. Οι Newell *et al.* (2006), όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.1, πραγματοποίησαν στατική επεξεργασία δεδομένων για τη χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων χλωριωμένων διαλυτών σε 45 φρέατα παρακολούθησης της περιοχής της πηγής 23 ρυπασμένων χώρων, όπου δεν είχαν εφαρμοστεί στο παρελθόν επεμβατικές μέθοδοι αποκατάστασης. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι ελάχιστες, μέσες και μέγιστες υπολογισμένες τιμές για τον συντελεστή απομείωσης 1<sup>ης</sup> τάξης της συγκέντρωσης των PCE, TCE και DCE στην περιοχή της πηγής.

Πίνακας 4.4 Συντελεστές απομείωσης 1<sup>ης</sup> τάξης του TCE στην περιοχή της πηγής (Newell *et al.*, 2006)

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΠΟΜΕΙΩΣΗΣ των συγκεντρώσεων στην πηγή (y <sup>-1</sup> )				
ΕΝΩΣΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΩΝ
PCE	-0,01*	0,23	0,97	9
TCE	-0,36*	0,11	0,60	13
DCE	0,15	0,16	0,17	2

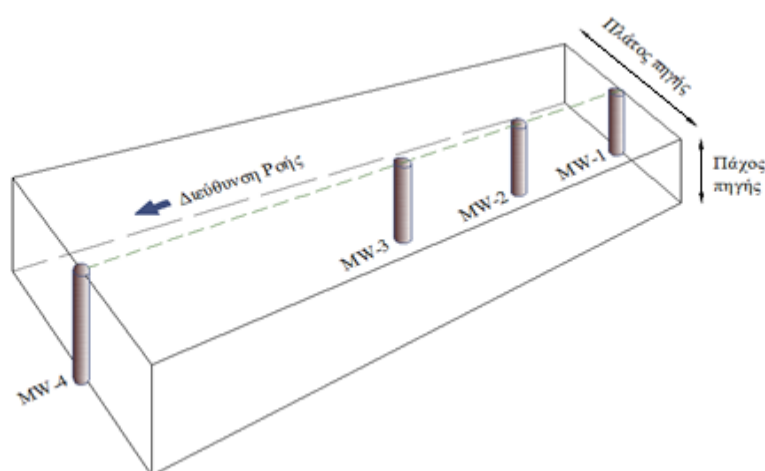
PCE= Τετραχλωροαιθέριο, TCE= Τριχλωροαιθέριο, DCE= Διχλωροαιθέριο

\*Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι οι συγκεντρώσεις στην πηγή αυξάνονται.

Οι βιβλιογραφικές τιμές των συντελεστών βιομετασχηματισμού και των συντελεστών απομείωσης των συγκεντρώσεων στην περιοχή της πηγής μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου στο BIOCHLOR για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης για την αποκατάσταση ρυπασμένων χώρων. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν προτείνεται λόγω των ιδιαίτερων συνθηκών που επικρατούν στο

εκάστοτε πεδίο και της καθοριστικής επίδρασης που έχουν αυτοί οι συντελεστές στα αποτελέσματα του μοντέλου, όπως αναφέρεται στην προηγούμενη παράγραφο.

Έτσι, σύμφωνα με τους Hausman & Rifai (2005) και οι δύο συντελεστές θα πρέπει να προσαρμόζονται (fitting parameters) μέσω δοκιμών με το μοντέλο BIOCHLOR και σύγκρισης της προβλεπόμενης κατανομής της συγκέντρωσης των χλωροαιθινίων κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης με τις πραγματικές συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν στο πεδίο μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Τα φρέατα παρακολούθησης του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης (plume centerline) είναι αυτά στα οποία μετρούνται οι μέγιστες συγκεντρώσεις και είναι εγκατεστημένα κατά τη διεύθυνση της υπόγειας ροής όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 Απεικόνιση του πεδίου μεταφοράς των ρύπων όπως προσομοιώνεται από το μοντέλο BIOCHLOR. Τα MW-1, MW-2, MW-3 και MW-4 είναι φρέατα παρακολούθησης που βρίσκονται κατά μήκος τους άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης

### 4.3 Δεδομένα εξόδου του BIOCHLOR

Το μοντέλο BIOCHLOR μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

- 1) Για τον υπολογισμό της προβλεπόμενης εξάπλωσης των διαλυμένων χλωριωμένων διαλυτών σε μια δεδομένη χρονική στιγμή (Clement *et al.*, 2002).
- 2) Για τον υπολογισμό των συντελεστών βιομετασχηματισμού των χλωριωμένων διαλυτών για το συγκεκριμένο περιστατικό (Huff *et al.*, 2000· Hausman & Rifai, 2005· Lu *et al.*, 2006a, b· Parsons ES, 2009).
- 3) Για τον υπολογισμό του χρόνου και της απόστασης σταθεροποίησης της ρυπασμένης έκτασης με χλωριωμένους διαλύτες (Clement *et al.*, 2002).
- 4) Για την εκτίμηση του χρόνου αποκατάστασης του ρυπασμένου χώρου (Hausman & Rifai, 2005· Parsons ES, 2009).

Πριν παρουσιαστεί η μεθοδολογία υπολογισμού των παραπάνω παραμέτρων κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν κάποιες έννοιες που σχετίζονται με τα δεδομένα εξόδου του BIOCHLOR (Πίνακας 4.5).

Πίνακας 4.5 Παράμετροι που σχετίζονται με τα δεδομένα εξόδου λογισμικού BIOCHLOR

ΑΓΓΛΙΚΟΣ ΟΡΟΣ	ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΟΡΟΥ ΣΤΑ ΕΛΛΗΝΙΚΑ	ΕΠΕΞΗΣΗΣΗ	ΜΟΝΑΔΕΣ
<b>Compliance Concentration (CC)</b>	Συγκέντρωση συμμόρφωσης	Το επιθυμητό όριο στο οποίο πρέπει να φτάσει η συγκέντρωση του ρύπου στα υπόγεια νερά σύμφωνα με τους κανονισμούς και τις εκάστοτε απαιτήσεις απορρύπανσης	mg/L
<b>Point of Compliance (POC)</b>	Σημείο συμμόρφωσης	Θέση ελέγχου κατάντη της πηγής στην οποία η συγκέντρωση του ρύπου θα πρέπει να είναι μικρότερη από τη συγκέντρωση συμμόρφωσης (CC)	-
<b>Time of Stabilization (TOS)</b>	Χρόνος σταθεροποίησης	Χρονικό διάστημα πέρα από το οποίο παύει να εξαπλώνεται η ρύπανση στα υπόγεια νερά	y
<b>Distance of Stabilization (DOS)</b>	Απόσταση σταθεροποίησης	Η μέγιστη απόσταση κατάντη της πηγής μέχρι την οποία φτάνει ο ρύπος σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από τη συγκέντρωση συμμόρφωσης (CC) στον χρόνο σταθεροποίησης (TOS)	m
<b>Time of Remediation (TOR)</b>	Χρόνος αποκατάστασης	Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να μειωθεί η συγκέντρωση του ρύπου στο σημείο συμμόρφωσης (POC) κάτω από τη συγκέντρωση συμμόρφωσης (CC)	y

#### 4.3.1 Υπολογισμός της προβλεπόμενης εξάπλωσης των χλωροαιθενίων σε μια δεδομένη χρονική στιγμή

Κρατώντας σταθερές όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους εισόδου αυξάνεται το μήκος της περιοχής υπό προσομοίωση μέχρις ότου η συγκέντρωση της μητρικής ένωσης στο πλέον κατάντη σημείο κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης εξισωθεί με τη συγκέντρωση συμμόρφωσης (CC). Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται διαδοχικά για καθένα από τα θυγατρικά προϊόντα της αναγωγικής αποχλωρίωσης. Ο χρόνος προσομοίωσης σε αυτήν την περίπτωση θεωρείται ίσος με το χρονικό διάστημα μεταξύ της ημερομηνίας έναρξης της διαρροής της διαλυμένης φάσης της πηγής και της ημερομηνίας για την οποία επιθυμεί ο χρήστης του BIOCHLOR να γίνουν οι προβλέψεις.

#### 4.3.2 Υπολογισμός των συντελεστών βιομετασχηματισμού κάθε χλωροαιθενίου για συγκεκριμένο περιστατικό

Για τον υπολογισμό των συντελεστών βιομετασχηματισμού των χλωροαιθενίων με το λογισμικό BIOCHLOR μέσω της μεθόδου δοκιμής-λάθους (trial and error method) θα πρέπει

να είναι γνωστές οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων των διαλυμένων χλωροαιθινίων τουλάχιστον σε ένα φρέαρ παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης κατάντη της πηγής και η αντίστοιχη ημερομηνία δειγματοληψίας. Ο χρόνος προσομοίωσης σε αυτήν την περίπτωση τίθεται ίσος με το χρονικό διάστημα μεταξύ της έναρξης της διαρροής της διαλυμένης φάσης της πηγής και της ημερομηνίας μέτρησης των συγκεντρώσεων στα φρέατα παρακολούθησης στον άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης. Το μήκος της περιοχής υπό προσομοίωση τίθεται ίσο με την απόσταση του φρέατος παρακολούθησης στην πηγή και του πλέον κατάντη φρέατος παρακολούθησης του οποίου οι μετρήσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των συντελεστών βιομετασχηματισμού. Κρατώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους εισόδου, ο συντελεστής βιομετασχηματισμού της μητρικής ένωσης μεταβάλλεται μέχρι οι προβλεπόμενες συγκεντρώσεις να προσαρμοστούν στις μετρήσεις πεδίου της μητρικής ένωσης στον άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται διαδοχικά για καθένα από τα θυγατρικά προϊόντα της αναγωγικής αποχλωρίωσης. Με αυτό τον τρόπο, υπολογίζονται εξειδικευμένοι συντελεστές βιομετασχηματισμού για το περιστατικό.

#### *4.3.3 Υπολογισμός του χρόνου (TOS) και της απόστασης σταθεροποίησης (DOS) της ρύπανσης του υπογείου νερού με χλωροαιθίνια*

Κρατώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους εισόδου αυξάνεται σταδιακά ο χρόνος προσομοίωσης μέχρι να παρατηρηθεί ότι η μέγιστη απόσταση κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, όπου φτάνει η μητρική ένωση παύει να αυξάνεται. Τότε θεωρείται ότι η ρυπασμένη με τη μητρική ένωση έκταση έχει φτάσει σε συνθήκες μόνιμης μεταφοράς (steady-state condition). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται διαδοχικά για τα θυγατρικά προϊόντα της αναγωγικής αποχλωρίωσης. Το μήκος εξάπλωσης των χλωροαιθινίων κατάντη της πηγής σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις συμμόρφωσης συγκρίνεται, στη συνέχεια, με την απόσταση της πηγής από το σημείο συμμόρφωσης (POC). Αν είναι μεγαλύτερο, τότε η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση δεν είναι κατάλληλη μέθοδος αποκατάστασης του ρυπασμένου χώρου και απαιτούνται επεμβατικές μέθοδοι αποκατάστασης.

#### *4.3.4 Υπολογισμός χρόνου αποκατάστασης (TOR)*

Κρατώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους εισόδου πραγματοποιούνται δοκιμές αυξάνοντας τον χρόνο προσομοίωσης μέχρις ότου οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθινίων στο σημείο συμμόρφωσης μειωθούν κάτω από τη συγκέντρωση συμμόρφωσης.

#### **4.4 Παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου BIOCHLOR στο περιστατικό ρύπανσης υπεδάφους με χλωροαιθένια: Πολεμική Αεροπορική Βάση στη Φλόριντα (Cape Canaveral Air Force Station, Facility 1381)**

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου BIOCHLOR στο πλαίσιο μελέτης της Rifai για την Parsons ES (2009). Το μοντέλο εφαρμόστηκε για την προσομοίωση της μεταφοράς χλωροαιθινίων στον ρυπασμένο χώρο της εγκατάστασης 1381 (Facility 1381) της βάσης της πολεμικής αεροπορίας στο Ακρωτήριο Κανάβεραλ (Cape Canaveral Air Force Station - CCAFS), στη Φλόριντα.

##### **4.4.1 Ο χώρος**

**Κατηγορία χώρου.** Η εγκατάσταση 1381 (Facility 1381) της βάσης της πολεμικής αεροπορίας στο Ακρωτήριο Κανάβεραλ, χρησιμοποιείται για έρευνα και δοκιμές για πυραύλους και το διάστημα από την κατασκευή της, το 1958. Στην υπό μελέτη περιοχή, υπάρχουν δύο κανάλια αποστράγγισης, ένα 91,4 m νοτιοδυτικά της εγκατάστασης 1381 και ένα 762 m βόρεια της εγκατάστασης 1381 (Σχήμα 4.3).

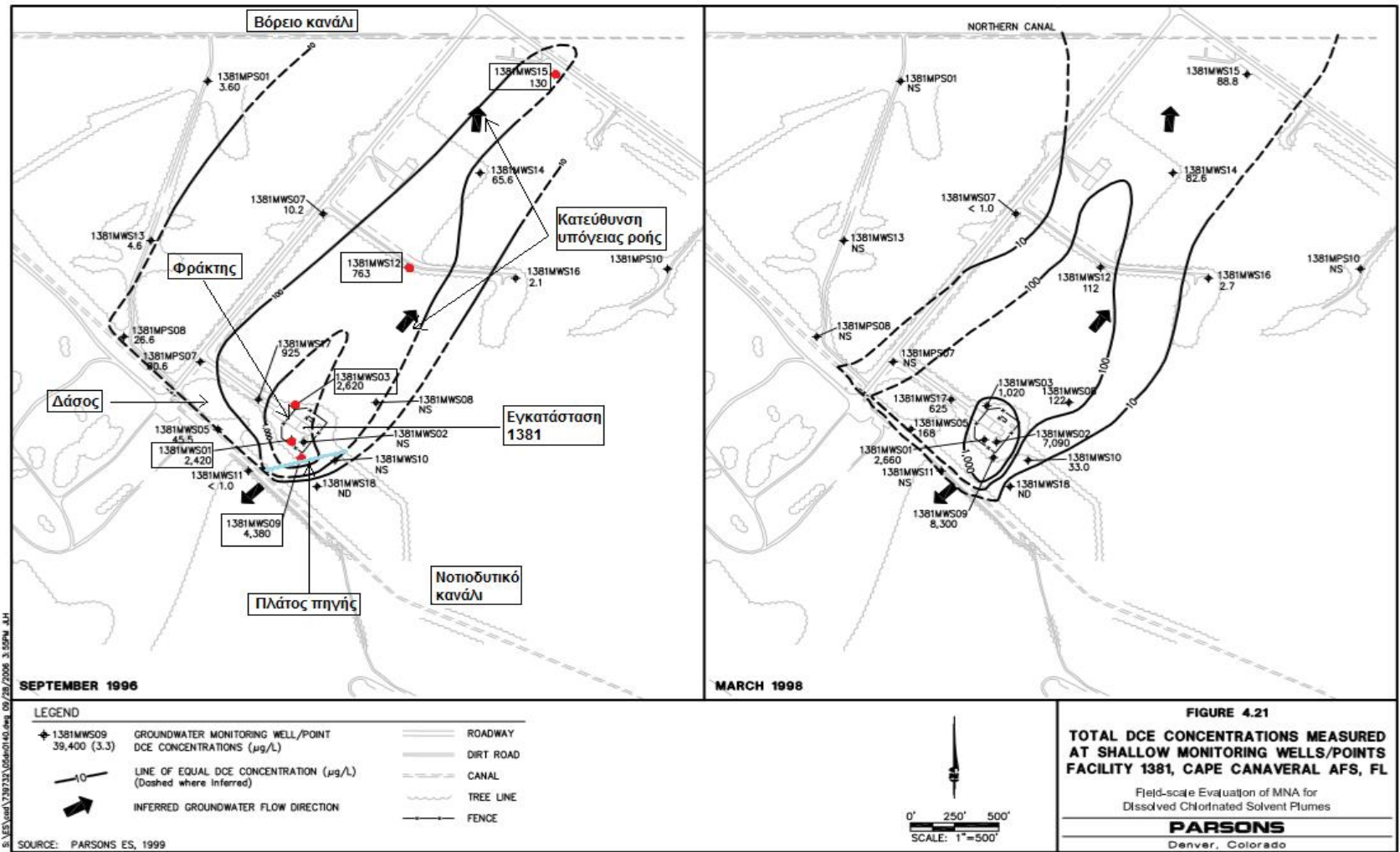
##### **4.4.2 Αίτια ρύπανσης και τύπος ρύπου**

**Ρυπογόνος δραστηριότητα.** Η ρύπανση του υπόγειου νερού με χλωροαιθένια θεωρείται ότι είναι αποτέλεσμα τυχαίων διαρροών TCE κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων απολίπανσης μετάλλων στο παρελθόν. Στην πιο παλιά φωτογραφία του χώρου από το 1967 φαίνονταν βαρέλια στην επιφάνεια του εδάφους σε διάφορες θέσεις του χώρου. Το 1998 ανακαλύφθηκαν βαρέλια έξω από την περιφραγμένη περιοχή νοτιοδυτικά της εγκατάστασης 1381. Θεωρείται ότι βαρέλια που περιείχαν χλωριωμένους διαλύτες αποθηκεύονταν σε αυτήν τη θέση περιοδικά και συνέβαλλαν στη ρύπανση του εδάφους και των υπόγειων νερών. Επίσης, χλωριωμένοι διαλύτες διέρρευσαν στον χώρο κατά την απόρριψη χλωριωμένων διαλυτών από βυτιοφόρα στο δάσος που περιβάλλει τον χώρο (Σχήμα 4.3). Η διάρκεια των ρυπογόνων δραστηριοτήτων που περιγράφονται παραπάνω είναι άγνωστη.

**Κόριοι ρύποι.** Οι ρύποι στην εγκατάσταση 1381 είναι πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες και χλωριωμένοι διαλύτες, κυρίως τριχλωροαιθένιο (TCE), cis-1,2-διχλωροαιθένιο (cis-DCE) και βινυλοχλωρίδιο (VC).

##### **4.4.3 Χαρακτηριστικά υπεδάφους**

**Υδροφόρος ορίζοντας - Υδραυλική κλίση.** Η μελέτη χαρακτηρισμού του ρυπασμένου χώρου έδειξε ότι οι υδρογεωλογικές συνθήκες στο πεδίο οδηγούν σε μεταφορά των ρύπων τόσο προς τα βορειοανατολικά, προς το βόρειο κανάλι, όσο και προς τα νοτιοδυτικά, προς το νοτιοδυτικό κανάλι, λόγω της παρουσίας ενός υπόγειου υδροκρίτη (groundwater divide) κοντά στην εστία της ρύπανσης (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3 Καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων του διχλωροαιθενίου (DCE), Σεπτέμβριος 1996 και Μάρτιος 1998, εγκατάσταση 1381, πολεμική αεροπορική βάση στο Ακρωτήριο Κανάβεραλ, Φλόριντα (Parsons ES, 2009 - τροποποιημένο)

Η οριζόντια υδραυλική κλίση στον υδροφορέα ποικίλλει από 0,00011 έως 0,00059 λόγω εποχιακών μεταβολών στη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.

**Στρωματογραφία – Υδραυλική αγωγιμότητα.** Βάσει των υδραυλικών αγωγιμοτήτων που μετρήθηκαν στο ρυπασμένο χώρο, το κορεσμένο πάχος (15,2 m) του υδροφορέα διακρίνεται σε δύο ζώνες. Η ρηχή ζώνη έχει πάχος 4,6 m και υδραυλική αγωγιμότητα που ποικίλλει από  $1,06 \times 10^{-4}$  έως  $1,06 \times 10^{-3}$  m/s. Η βαθιά ζώνη έχει πάχος 10,6 m και υδραυλική αγωγιμότητα που ποικίλλει από  $1,06 \times 10^{-6}$  έως  $1,06 \times 10^{-4}$  m/s.

#### 4.4.4 Έκταση ρύπανσης

**Κατανομή ρύπων.** Η ρύπανση επεκτείνεται βορειοανατολικά της εστίας της ρύπανσης και στις δύο ζώνες (ρηχή, βαθιά). Το 1996, η ρύπανση του υπογείου νερού με TCE περιοριζόταν σε ακτίνα περίπου 61 m από την εγκατάσταση 1381, με την εστία της ρύπανσης να βρίσκεται κοντά στο φρέαρ παρακολούθησης S09. Λόγω της ανίχνευσης του TCE σε δείγματα από φρέατα παρακολούθησης της βαθιάς ζώνης, ο ρύπος θεωρείται ότι είχε διεισδύσει μέχρι τον πυθμένα του επιφανειακού υδροφορέα κοντά στην εστία της ρύπανσης. Το cis-DCE είχε επεκταθεί περισσότερο από όλους τους χλωριωμένους διαλύτες που ανιχνεύθηκαν στο υπόγειο νερό και συγκεκριμένα σε απόσταση 975 m κατάντη της πηγής, στη διεύθυνση από τα νοτιοδυτικά προς τα βορειοανατολικά (Σχήμα 4.3). Το σχήμα και η έκταση της ρύπανσης από διαλυμένο βινυλοχλωρίδιο στο υπόγειο νερό ήταν παρόμοια με αυτά του cis-DCE. Μέχρι τον Σεπτέμβριο του 1996 δεν είχαν ανιχνευθεί χλωροαιθένια στα δείγματα από τα επιφανειακά νερά του βόρειου καναλιού (Parsons ES, 1999b).

**Τιμές συγκεντρώσεων.** Στους Πίνακες 4.6 και 4.7 παρουσιάζονται οι τιμές των συγκεντρώσεων των TCE, cis-DCE και VC που ανιχνεύθηκαν σε δείγματα του υπόγειου νερού τα έτη 1996 και 2001 αντίστοιχα. Το 1996, η μέγιστη συγκέντρωση του TCE στο υπόγειο νερό ήταν 39,4 mg/L στο φρέαρ παρακολούθησης S09, σε βάθος 2,5-4 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από το 1% της διαλυτότητας του TCE: 1100 mg/L στους 25°C. Άρα, είναι πιθανό να υπήρχε μη υδατική φάση (DNAPL) στην πηγή το 1996.

**Βιομετασχηματισμός των χλωροαιθινίων.** Παρόλο που οι συγκεντρώσεις του TCE στην εστία της ρύπανσης είχαν αυξητική τάση μέχρι το 1998 (από 39,4 mg/L τον Σεπτέμβριο του 1996 σε 210 mg/L τον Μάρτιο του 1998 στο φρέαρ παρακολούθησης S09), το εμβαδόν της ρυπασμένης έκτασης δεν αυξήθηκε και η αναγωγική αποχλωρίωση έδειχνε να περιορίζει την εξάπλωση των διαλυμένων ρύπων. Το 1996, οι συγκεντρώσεις του διαλυμένου οξυγόνου στο μεγαλύτερο μέρος της ρυπασμένης έκτασης είναι μικρότερες από 0,5 mg/L. Στο υπέδαφος υπήρχαν υψηλές συγκεντρώσεις φυσικής οργανικής ύλης. Πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες είχαν ανιχνευθεί μόνο κοντά στην εστία της ρύπανσης σε χαμηλές συγκεντρώσεις (Parsons ES, 1999b).

Πίνακας 4.6 Μετρήσεις συγκεντρώσεων σε φρέατα παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης περιοχής το 1996

ΦΡΕΑΡ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΗΓΗ (m)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (mg/L)		
		TCE	cis-DCE	VC
S09	0	39,40	4,3831	0,2400
S01	15	0,239	2,4237	0,2100
S03	53	0,001	2,6177	0,8360
S12	264	0,001	0,7632	0,5100
S15	561	0,001	0,1300	0,0163
<b><math>k/v_s</math> (<math>m^{-1}</math>) (από Σχήμα 4.4)*</b>		0,0122	0,0059	0,0050
<b>Συντελεστής βιομετασχηματισμού <math>\lambda</math> (<math>y^{-1}</math>)</b>		0,0910	0,0410	0,0330

TCE= Τριχλωροαιθέριο, cis- DCE= cis-1,2- Διχλωροαιθέριο, VC= Βινυλοχλωρίδιο

\*Ο λόγος  $k/v_s$ , επεξηγείται στο Παράρτημα Α

Πίνακας 4.7 Μετρήσεις συγκεντρώσεων σε φρέατα παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης περιοχής το 2001

ΦΡΕΑΡ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΗΓΗ (m)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (mg/L)		
		TCE	cis-DCE	VC
S09	0	4,290	0,9928	0,0420
S01	15	0,074	2,1841	0,7410
S03	53	0,001	0,1893	0,4580
S12	264	0,001	0,0010	0,0010
S15	561	0,001	0,0096	0,0044
<b><math>k/v_s</math> (<math>m^{-1}</math>) (από Σχήμα 4.5)*</b>		0,0096	0,0100	0,0086
<b>Συντελεστής βιομετασχηματισμού <math>\lambda</math> (<math>y^{-1}</math>)</b>		0,0700	0,0730	0,0610

TCE= Τριχλωροαιθέριο, cis- DCE= cis-1,2- Διχλωροαιθέριο, VC= Βινυλοχλωρίδιο

\*Ο λόγος  $k/v_s$ , επεξηγείται στο Παράρτημα Α

#### 4.4.5 Έργα αποκατάστασης

**Στόχοι αποκατάστασης.** Στόχος της αποκατάστασης είναι να περιοριστεί η εξάπλωση των TCE, cis-DCE και VC, ώστε να μην φθάσουν στο βόρειο και στο νοτιοδυτικό κανάλι σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από τις μέγιστες επιτρεπτές στο πόσιμο νερό (TCE: 0,005 mg/L, cis-DCE: 0,070 mg/L και VC: 0,002 mg/L).

**Τύπος – πρόοδος έργων.** Στον χώρο έχουν πραγματοποιηθεί πιλοτικές μελέτες για τεχνολογίες που περιλαμβάνουν τον αεροδιασκορπισμό (Οκτώβριος 1996 έως Φεβρουάριος 1997), την φυτοαποκατάσταση (phytoremediation) (Ιούνιος έως Σεπτέμβριος 1997), την ενισχυμένη βιοαποκατάσταση (1998) και τα φρέατα ανακυκλοφορίας του υπόγειου νερού (groundwater recirculation wells) (Μάιος 2000). Παρόλο που αυτές οι δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί στη ρυπασμένη έκταση, συμπεριλαμβανομένης και της περιοχής της πηγής, ήταν μικρής κλίμακας και πιστεύεται ότι έχουν μικρή έως μηδενική επίδραση στο φρέαρ



παρακολούθησης της περιοχής της πηγής (S09), καθώς και στη ρυπασμένη έκταση που εκτείνεται προς το βόρειο κανάλι. Εκτός από αυτές τις πιλοτικές μελέτες, δεν έχουν εφαρμοστεί επεμβατικές μέθοδοι αποκατάστασης στον χώρο. Σύμφωνα με τη μελέτη Parsons ES (1999b), η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση αναμένεται να είναι αποτελεσματική μέθοδος αποκατάστασης αν χρησιμοποιηθεί αυτόνομα, με προβλεπόμενο χρόνο αποκατάστασης που ξεπερνά τα 100 χρόνια.

#### 4.4.6 Προσομοίωση με το λογισμικό BIOCHLOR

**Δεδομένα εισόδου στο μοντέλο BIOCHLOR.** Η μεταφορά των διαλυμένων ρύπων από την εστία της ρύπανσης με κατεύθυνση προς τον βορρά προσομοιώθηκε με το μοντέλο BIOCHLOR, θεωρώντας όλο το πεδίο ως μια ομοιογενή αναερόβια ζώνη. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με την υπόθεση ότι στον ρυπασμένο χώρο δεν εφαρμόζονται επεμβατικές μέθοδοι αποκατάστασης.

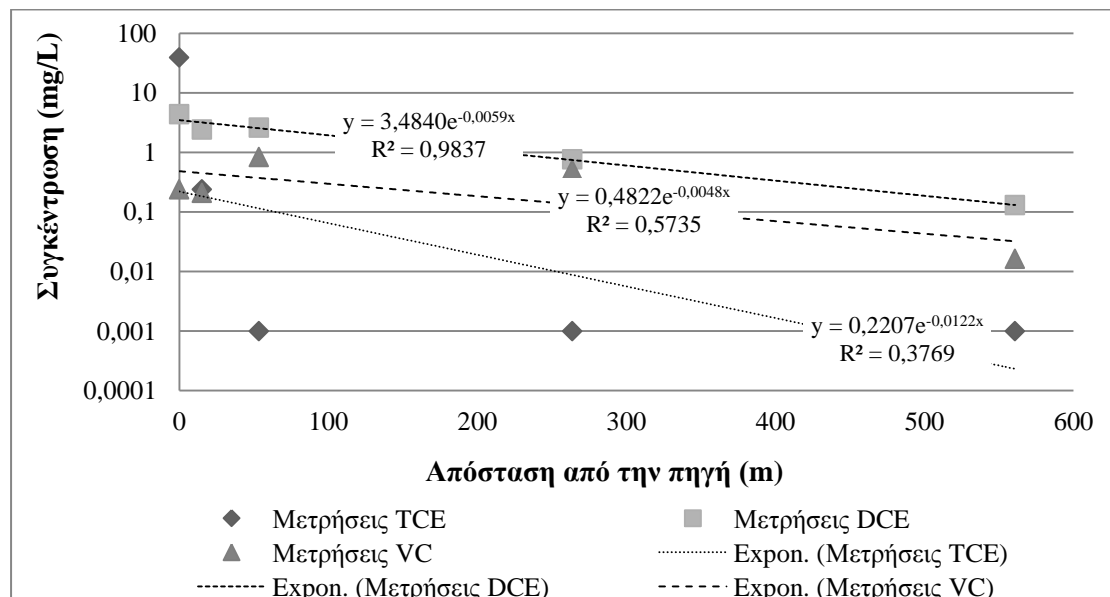
Για τις ανάγκες της προσομοίωσης η ρηχή και η βαθιά κορεσμένη ζώνη θεωρήθηκαν ως μια ενιαία υδρογεωλογική ενότητα συνολικού πάχους 15,2 m, με υδραυλική αγωγιμότητα  $K=1,06 \times 10^{-4}$  m/s και υδραυλική κλίση ίση με τη μέγιστη που μετρήθηκε  $i=0,00059$ . Το πορώδες εκτιμήθηκε ίσο με 0,25. Η ταχύτητα μεταγωγής υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση  $v_s = Ki/n$ , ίση με 7,9 m/y.

Βάσει του παρατηρούμενου μήκους εξάπλωσης της ρύπανσης με cis-1,2-DCE στο υπόγειο νερό, σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από το μέγιστο επιτρεπτό όριο στο πόσιμο νερό 0,070 mg/L το 1996, το μήκος της περιοχής υπό προσομοίωση τέθηκε ίσο με 915 m. Ο συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς υπολογίστηκε, από τη σχέση  $\alpha_x = 0,82 \times (\log L_p)^{2,446}$  (Xu & Eckstein, 1995· διόρθωση Al-Suwaiyan, 1996), για μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης  $L_p=915$  m, ίσος με  $\alpha_x=11,67$  m. Οι λόγοι οριζόντιας εγκάρσιας/διαμήκους και κατακόρυφης εγκάρσιας/διαμήκους μηχανικής διασποράς θεωρήθηκαν ίσοι με 0,01 και 0,001 αντίστοιχα.

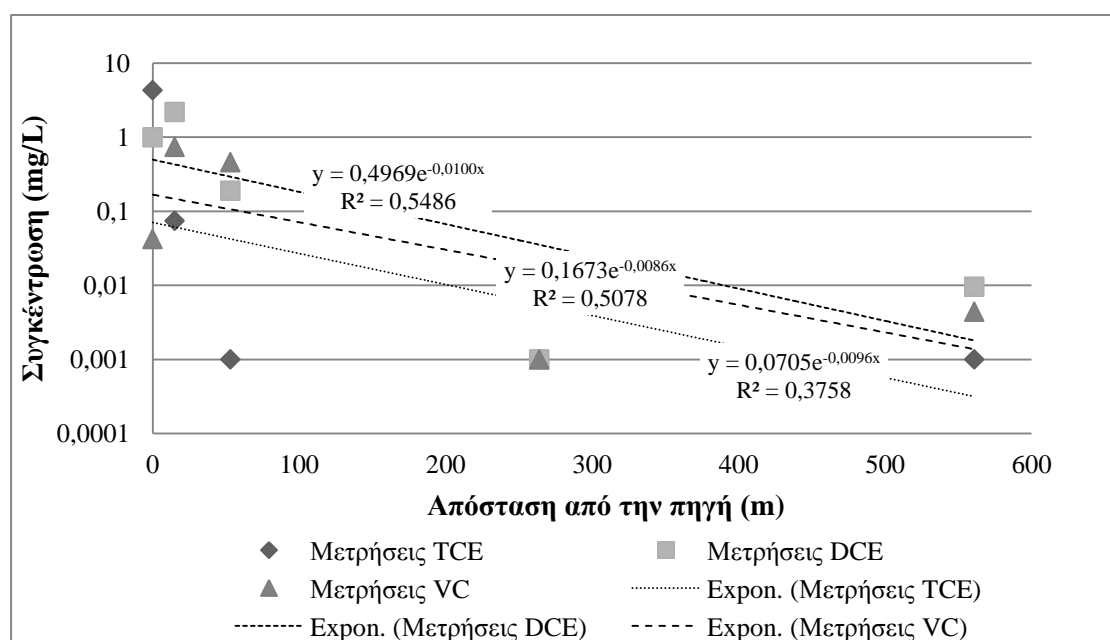
Από εδαφικές δοκιμές προέκυψαν ξηρή πυκνότητα εδάφους  $\rho_d=1,72$  kg/L και  $f_{oc}=0,00455$ . Από τα παραπάνω υπολογίστηκε μέσος συντελεστής υστέρησης των χλωροαιθινίων για το BIOCHLOR ίσος με 1,21.

Στο πλαίσιο της μελέτης Parsons ES (2009) έγινε μια αρχική εκτίμηση των συντελεστών βιομετασχηματισμού από τις μετρήσεις πεδίου των ετών 1996 και 2001 με τη μέθοδο Buscheck & Alcantar 1995, που περιγράφεται στο Παράρτημα Α. Από τις κλίσεις των εκθετικών γραμμών ελαχίστων τετραγώνων ( $k/v_s$ ) (βλέπε Παράρτημα Α) των ημιλογαριθμικών διαγραμμάτων των συγκεντρώσεων των TCE, cis-DCE και VC στα φρέατα παρακολούθησης στον άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σχέση με την απόσταση κατάντη της πηγής των ετών 1996 (Σχήμα 4.4) και 2001 (Σχήμα 4.5), για ταχύτητα

μεταγωγής  $v_s=7,2$  m/y, συντελεστή διαμήκου μηχανικής διασποράς  $\alpha_x=11,67$  m και συντελεστή υστέρησης  $R=1,21$  υπολογίστηκαν με τη Σχέση A.1 οι συντελεστές βιομετασχηματισμού ( $\lambda$ ) των χλωροαιθινίων για τα έτη 1996 (Πίνακας 4.6) και 2001 (Πίνακας 4.7).



Σχήμα 4.4 Μετρήσεις συγκεντρώσεων χλωροαιθινίων (TCE, DCE, VC) σε φρέατα παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 1996



Σχήμα 4.5 Μετρήσεις συγκεντρώσεων χλωροαιθινίων (TCE, DCE, VC) σε φρέατα παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 2001

**Βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου BIOCHLOR.** Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στο BIOCHLOR για τη βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8 Δεδομένα εισόδου στο BIOCHLOR για τη βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ
Υδραυλική αγωγιμότητα- $K$ (m/y)	3342,8
(Υδραυλική αγωγιμότητα- $K$ (m/s))	$1,06 \times 10^{-4}$
Υδραυλική κλίση- $i$	0,00059
Πορώδες- $n$	0,25
Συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_x$ (m)	11,67
Λόγος συντελεστή οριζόντιας εγκάρσιας μηχανικής διασποράς/συντελεστή διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_y/\alpha_x$	0,01
Λόγος συντελεστή κατακόρυφης εγκάρσιας μηχανικής διασποράς/συντελεστή διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_z/\alpha_x$	0,001
Ξηρή πυκνότητα εδάφους- $\rho_d$ (kg/L)	1,72
Κλάσμα οργανικού άνθρακα- $f_{oc}$	0,0046
Μέσος συντελεστής υστέρησης των χλωροαιθινίων- $R$	1,21
Συντελεστές βιομετασχηματισμού- $\lambda$ ( $y^{-1}$ ) (αρχικές εκτιμήσεις)*	
TCE $\rightarrow$ cis-DCE	0,091
cis-DCE $\rightarrow$ VC	0,031
VC $\rightarrow$ αιθέριο	0,033
Συντελεστές βιομετασχηματισμού- $\lambda$ ( $y^{-1}$ ) (τελικές τιμές)**	
TCE $\rightarrow$ cis-DCE	7
cis-DCE $\rightarrow$ VC	0,25
VC $\rightarrow$ αιθέριο	1,3
Χρόνος προσομοίωσης για τη βαθμονόμηση του μοντέλου- $t$ (y)	38
Χρόνος προσομοίωσης για την επαλήθευση του μοντέλου- $t$ (y)	43
Μήκος περιοχής υπό προσομοίωση (m)	915
Πλάτος περιοχής υπό προσομοίωση (m)	137
Πάχος πηγής στην κορεσμένη ζώνη- $Z$ (m)	15,2
Πλάτος πηγής- $Y$ (m)	137
Αρχική συγκέντρωση στην πηγή- $C_0$ (mg/L)	1100
Συντελεστής απομείωσης της συγκέντρωσης της πηγής- $k_s$ ( $y^{-1}$ )	0,0876

TCE= Τριχλωροαιθέριο, DCE= cis-1,2- Διχλωροαιθέριο, VC= Βινυλοχλωρίδιο

\*Υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Buschek & Alcantar και χρησιμοποιήθηκαν για τον αρχικό υπολογισμό των συγκεντρώσεων των χλωροαιθινίων κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 1996

\*\*Υπολογίστηκαν με το λογισμικό BIOCHLOR με τη μέθοδο δοκιμής-λάθους (Ενότητα 4.3.2) και χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου.

Οι μετρήσεις πεδίου των TCE, cis-DCE και VC των ετών 1996 (Πίνακας 4.6) και 2001 (Πίνακας 4.7) χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου, αντίστοιχα. Επειδή η ακριβής ημερομηνία της έναρξης της διαρροής του TCE στο υπόγειο νερό και η ακριβής συγκέντρωση που διέρρευσε είναι άγνωστες, θεωρήθηκε ότι διέρρευσε συγκέντρωση ίση με την υδατική διαλυτότητα του TCE ( $S_{TCE}=1100$  mg/L στους  $25^\circ\text{C}$ ) στη θέση που βρίσκεται το φρέαρ παρακολούθησης S09 από την αρχή της λειτουργίας της εγκατάστασης (1958).

Χρησιμοποιήθηκαν χρόνοι προσομοίωσης 38 έτη για τη βαθμονόμηση του μοντέλου (από το 1958 έως το 1996) και 43 έτη για την επαλήθευσή του (από το 1958 έως το 2001).

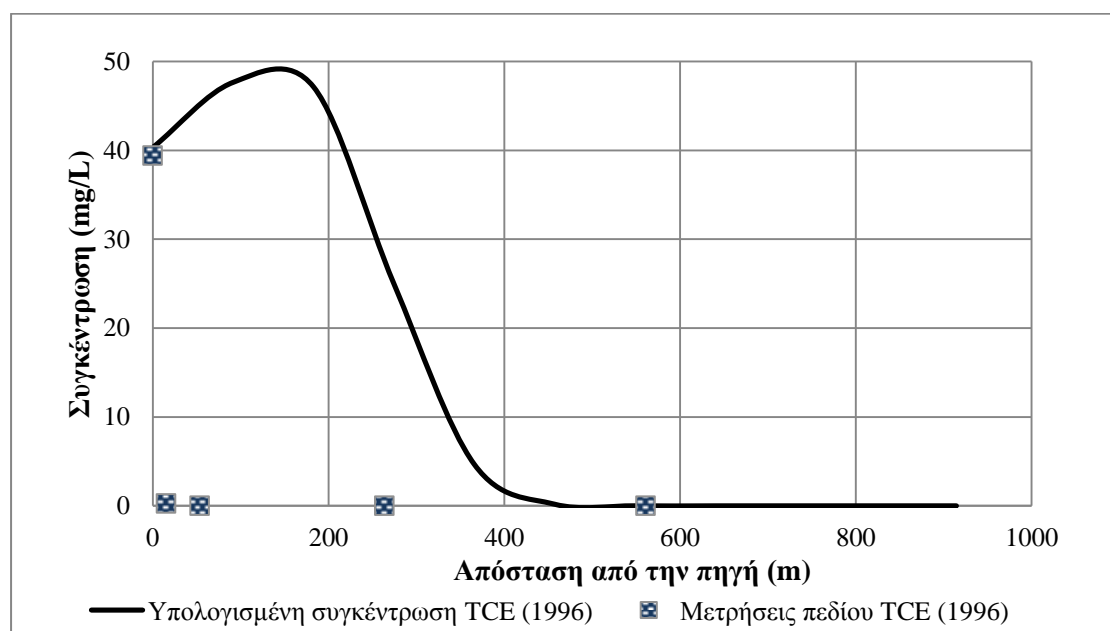
Οι διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο είναι 457 m x 915 m. Η πηγή θεωρήθηκε ότι έχει πάχος ίσο με αυτό της κορεσμένης ζώνης 15,2 m και πλάτος 137 m (γαλάζια γραμμή στο Σχήμα 4.3). Ο συντελεστής απομείωσης της συγκέντρωσης στην πηγή υπολογίστηκε από τη Σχέση 4.4:

$$C = C_o \times e^{-k_s t} \rightarrow k_s = -\frac{1}{t} \times \ln\left(\frac{C_{TCE}}{C_{0,TCE}}\right) = -\frac{1}{38} \times \ln\left(\frac{39,4}{1100}\right) = 0,0876 \text{ y}^{-1}$$

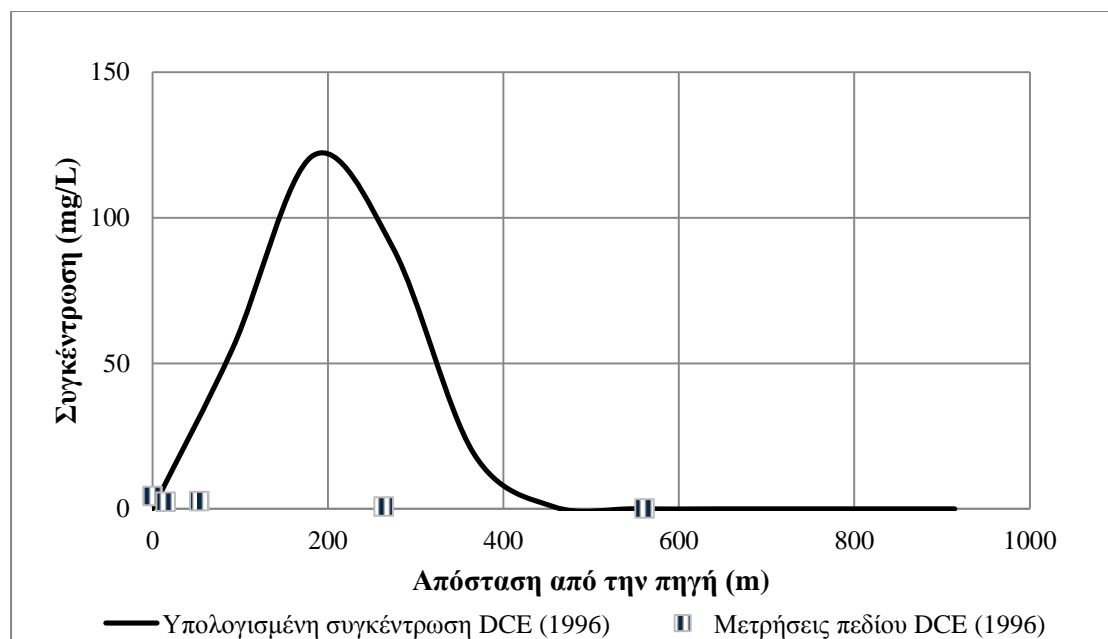
Υπενθυμίζεται ότι η τιμή  $C_{TCE}=39,4 \text{ mg/L}$  είναι η συγκέντρωση που μετρήθηκε στην πηγή (S09) το 1996, και έτσι  $t=1996-1958=38$  χρόνια.

Αρχικά υπολογίστηκαν οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθινίων κατά μήκος τους άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης για το έτος 1996 (χρόνος προσομοίωσης= 38 έτη) με τα δεδομένα εισόδου του Πίνακα 4.8, με τη χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Buscheck & Alcantar (1995).

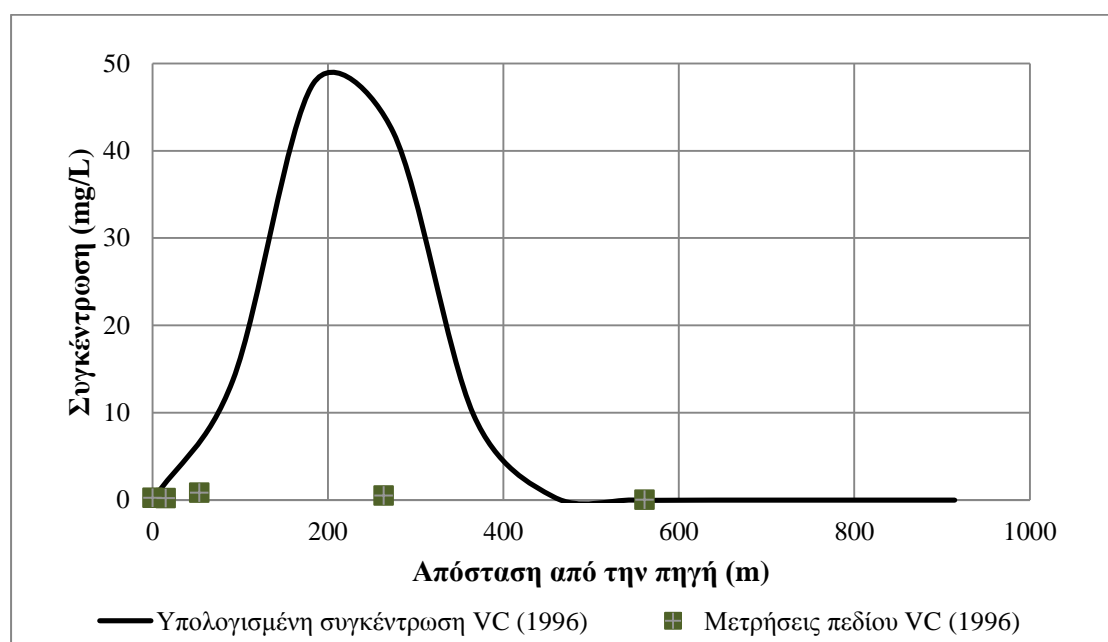
Στα Σχήματα 4.6 έως 4.8 παρουσιάζονται οι υπολογισμένες με το BIOCHLOR συγκεντρώσεις των TCE, cis-DCE και VC, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S01, S03, S09, S12 και S15 για το έτος 1996. Υπενθυμίζεται ότι οι προαναφερθείσες μετρήσεις πεδίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.



Σχήμα 4.6 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθινίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09 (πηγή), S01, S03, S12 και S15 για το έτος 1996 (με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Buscheck & Alcantar (1995))



Σχήμα 4.7 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του *cis*-1,2-διχλωροαιθενίου (DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09, S01, S03, S12 και S15 για το έτος 1996 (με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Buscheck & Alcantar (1995))

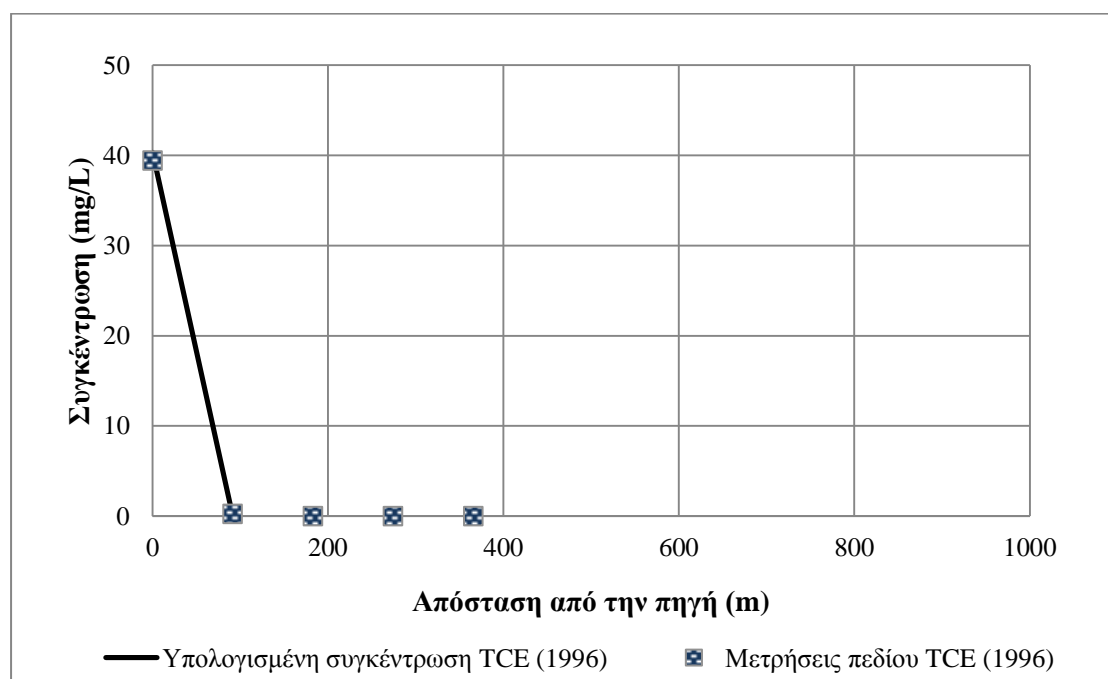


Σχήμα 4.8 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09, S01, S03, S12 και S15 για το έτος 1996 (με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Buscheck & Alcantar (1995))

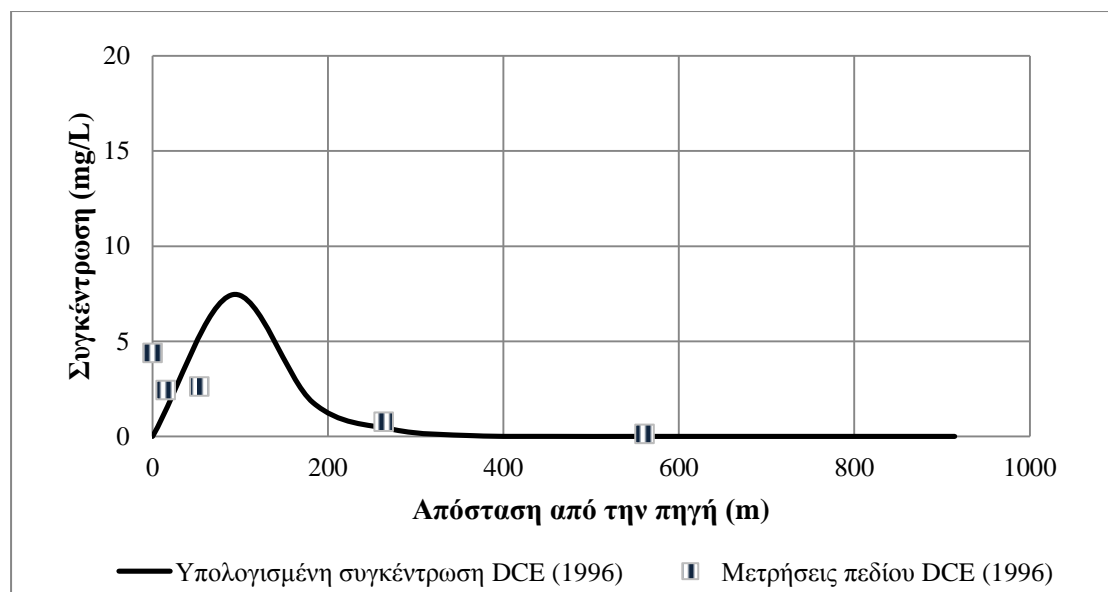
Όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.6 έως 4.8, η χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν από τη μέθοδο Buscheck & Alcantar (1995) ως δεδομένων εισόδου στο μοντέλο, έχει σαν αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση των

συγκεντρώσεων των TCE, cis-DCE και VC κατάντη της πηγής. Έτσι, χρειάστηκε να υπολογιστούν νέοι συντελεστές βιομετασχηματισμού ( $\lambda$ ) με τη μέθοδο που περιγράφεται στην Ενότητα 4.3.2 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, κρατώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους εισόδου σταθερές, ο συντελεστής βιομετασχηματισμού του TCE μεταβλήθηκε μέχρις ότου οι υπολογισμένες συγκεντρώσεις με το BIOCHLOR για το έτος 1996 (χρόνος προσομοίωσης= 38 έτη) ταιριάζουν με τις αντίστοιχες μετρήσεις πεδίου κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης. Η διαδικασία επαναλήφθηκε διαδοχικά για τις ενώσεις cis-DCE και VC. Έτσι, υπολογίστηκαν οι παρακάτω τιμές των συντελεστών βιομετασχηματισμού 1<sup>ης</sup> τάξης:  $\lambda_{TCE}=7 \text{ y}^{-1}$ ,  $\lambda_{cis-DCE}=0,25 \text{ y}^{-1}$  και  $\lambda_{VC}=1,3 \text{ y}^{-1}$ . Παρατηρείται ότι οι συντελεστές βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με το λογισμικό είναι 1-3 τάξεις μεγέθους μεγαλύτεροι από αυτούς που υπολογίστηκαν αρχικά με τη μέθοδο Buscheck & Alcantar (1995) βάσει των μετρήσεων πεδίου. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται στην επίδραση της παραδοχής που χρησιμοποιήθηκε στο BIOCHLOR ότι η πηγή είναι μειούμενης έντασης, σε αντίθεση με τη μέθοδο Buscheck & Alcantar (1995) με την οποία υπολογίζονται συντελεστές βιομετασχηματισμού για πηγή σταθερής έντασης.

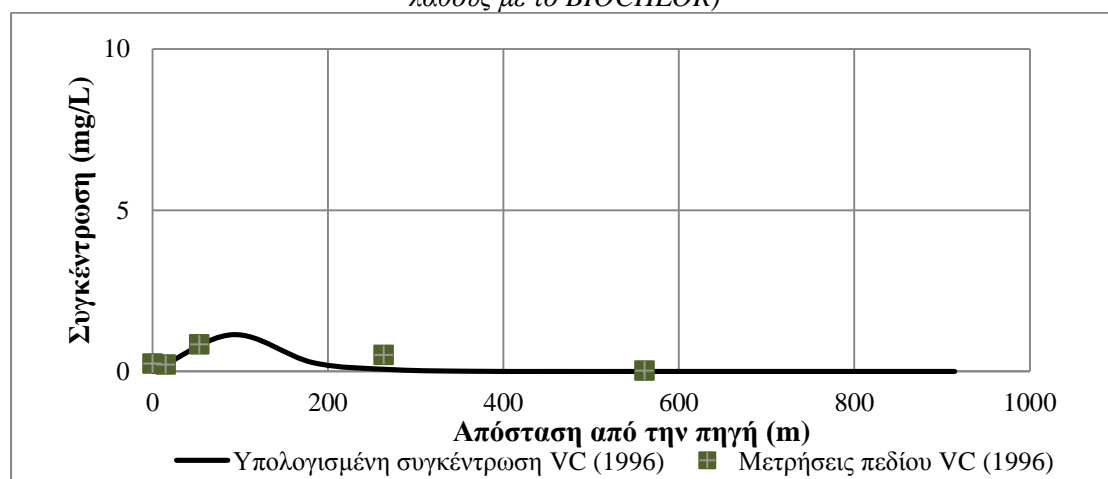
Στα Σχήματα 4.9 έως 4.11 παρουσιάζονται οι υπολογισμένες από το BIOCHLOR συγκεντρώσεις των χλωροαιθινίων κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης για το έτος 1996 με τη χρήση των παραπάνω συντελεστών βιομετασχηματισμού, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου.



Σχήμα 4.9 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθινίου (TCE) κατάντη της πηγής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09 (πηγή), S01, S03, S12 και S15 για το έτος 1996 (με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο δοκιμής-λάθους με το BIOCHLOR)



Σχήμα 4.10 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του *cis*-1,2-διχλωροαιθενίου (DCE) κατάντη της πηγής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09, S01, S03, S12 και S15 για το έτος 1996 (με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο δοκιμής-λάθους με το BIOCHLOR)

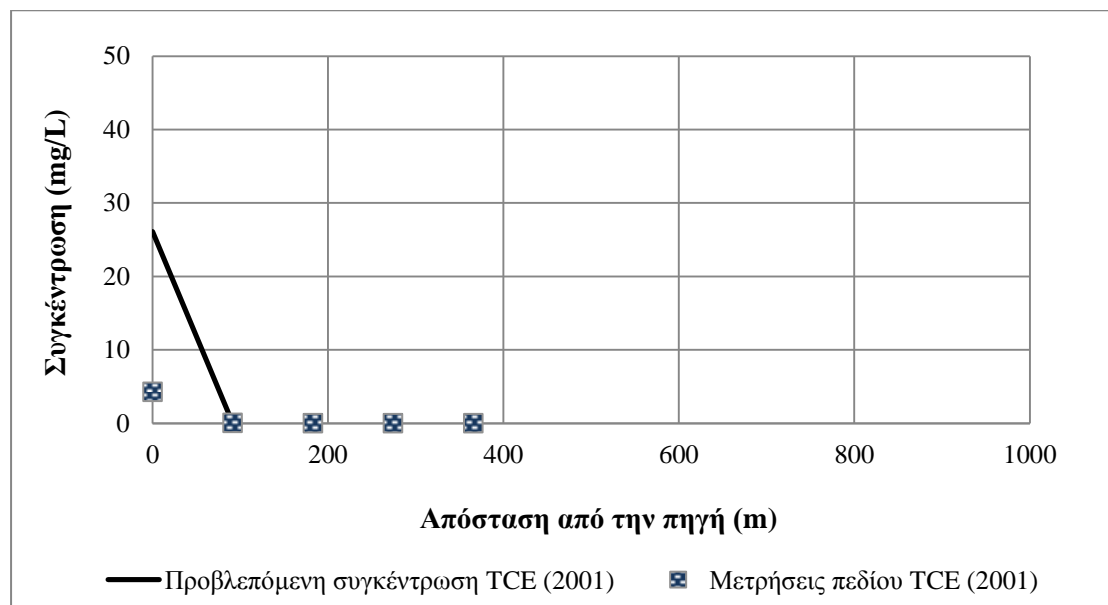


Σχήμα 4.11 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09, S01, S03, S12 και S15 για το έτος 1996 (με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο δοκιμής-λάθους με το BIOCHLOR)

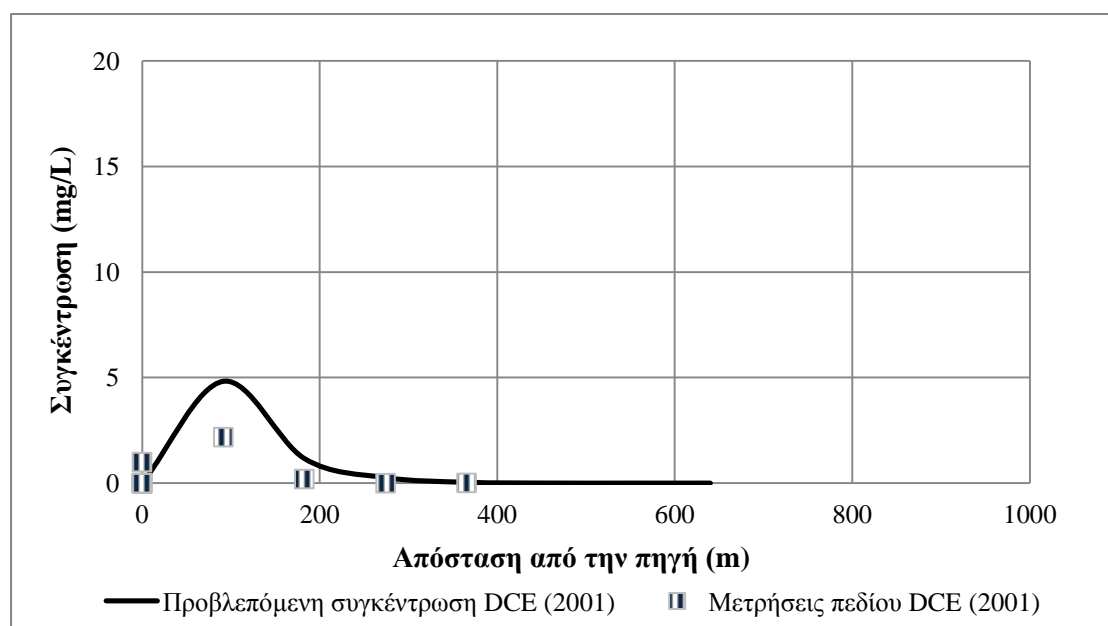
Όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.9 έως 4.11, οι υπολογισμένες συγκεντρώσεις με το BIOCHLOR ταιριάζουν με τις μετρήσεις πεδίου του 1996. Άρα, το στάδιο της βαθμονόμησης του μοντέλου ολοκληρώθηκε.

Για την επαλήθευση του μοντέλου, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με τα δεδομένα εισόδου που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8 με συντελεστές βιομετασχηματισμού των TCE, *cis*-DCE και VC, αυτούς που υπολογίστηκαν από το BIOCHLOR. Η προβλεπόμενη κατανομή των συγκεντρώσεων των χλωροαιθενίων κατάντη της πηγής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης συγκρίνεται σε αυτό το στάδιο με τις

συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν στα φρέατα παρακολούθησης S01, S03, S09, S12 και S15 το 2001 (Πίνακας 4.7), όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.12 έως 4.14.

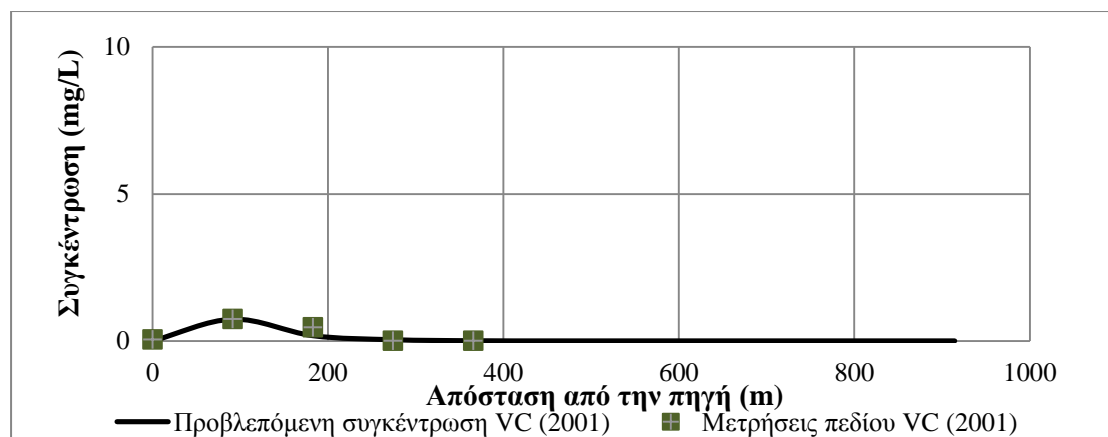


Σχήμα 4.12 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09, S01, S03, S12 και S15 για το έτος 2001 (με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο δοκιμής-λάθους με το BIOCHLOR)



Σχήμα 4.13 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (DCE) κατάντη της πηγής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09, S01, S03, S12 και S15 για το έτος 2001 (με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο δοκιμής-λάθους με το BIOCHLOR)





Σχήμα 4.14 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης S09, S01, S03, S12 και S15 για το έτος 2001 (με χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο δοκιμής-λάθους με το BIOCHLOR)

**Υπολογισμός του προβλεπόμενου χρόνου αποκατάστασης.** Προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος υπολογισμού του προβλεπόμενου χρόνου αποκατάστασης με το λογισμικό BIOCHLOR από τον αναγνώστη, θεωρήσαμε ένα υποθετικό φρέαρ άντλησης πόσιμου νερού σε απόσταση 305 m κατάντη της πηγής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε με το λογισμικό BIOCHLOR το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να μειωθούν οι συγκεντρώσεις των TCE, cis-DCE και VC σε αυτό το σημείο κάτω από τις αντίστοιχες μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις στο πόσιμο νερό (TCE: 0,005 mg/L, cis-DCE: 0,070 mg/L και VC: 0,002 mg/L). Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στο BIOCHLOR παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.9.

Τα υδρογεωλογικά δεδομένα, τα δεδομένα για τη διασπορά, τη ρόφηση, τον βιομετασχηματισμό και την πηγή είναι ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη προσομοίωση για την επαλήθευση του μοντέλου. Το μήκος της περιοχής υπό προσομοίωση λαμβάνει τιμή ίση με την απόσταση του φρέατος παρακολούθησης στην πηγή από τον υποθετικό αποδέκτη (φρέαρ άντλησης πόσιμου νερού), δηλαδή 305 m. Το πλάτος του μοντέλου παραμένει αμετάβλητο. Ο χρόνος προσομοίωσης (διάρκεια της ρύπανσης του υπογείου νερού από διαλυμένα χλωροαιθένια) μεταβάλλεται με διαδοχικές δοκιμές μέχρις ότου οι προβλεπόμενες συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθινίων σε απόσταση 305 m από την πηγή μειωθούν κάτω από τις αντίστοιχες μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις στο πόσιμο νερό. Έτσι, υπολογίστηκε ότι ο προβλεπόμενος χρόνος αποκατάστασης του ρυπασμένου χώρου είναι 75 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής (έτος 2033). Το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί με τη μελέτη Parsons ES (1999b), σύμφωνα με την οποία η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση αναμένεται να είναι αποτελεσματική μέθοδος αποκατάστασης για τον συγκεκριμένο ρυπασμένο χώρο σε χρονικό ορίζοντα 100 χρόνων.

Πίνακας 4.9 Δεδομένα εισόδου του BIOCHLOR για τη βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ
Υδραυλική αγωγιμότητα- $K$ (m/y)	3342,8
(Υδραυλική αγωγιμότητα- $K$ (m/s))	$1,06 \times 10^{-4}$
Υδραυλική κλίση- $i$	0,00059
Πορώδες- $n$	0,25
Συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_x$ (m)	11,67
Λόγος συντελεστών οριζόντιας εγκάρσιας/διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_y/\alpha_x$	0,01
Λόγος συντελεστών κατακόρυφης εγκάρσιας/διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_z/\alpha_x$	0,001
Ξηρή πυκνότητα εδάφους- $\rho_d$ (kg/L)	1,72
Κλάσμα οργανικού άνθρακα- $f_{oc}$	0,0046
Μέσος συντελεστής υστέρησης των χλωροαιθινίων- $R$	1,21
Συντελεστές βιομετασχηματισμού $\lambda$ ( $y^{-1}$ ),	
TCE $\rightarrow$ cis-DCE	7
cis-DCE $\rightarrow$ VC	0,25
VC $\rightarrow$ αιθέριο	1,3
Χρόνος προσομοίωσης- $t$ (y)*	75
Μήκος περιοχής υπό προσομοίωση (m)	305
Πλάτος περιοχής υπό προσομοίωση (m)	137
Πάχος πηγής στην κορεσμένη ζώνη- $Z$ (m)	15
Πλάτος πηγής- $Y$ (m)	137
Συγκεντρώσεις στην πηγή- $C_0$ (mg/L)	1100
Συντελεστής απομείωσης της συγκέντρωσης της πηγής- $k_s$ ( $y^{-1}$ )	0,0876

TCE= Τριχλωροαιθέριο, cis-DCE= cis-1,2-Διχλωροαιθέριο, VC=Βινυλοχλωρίδιο

\* Αποτελεί ταυτόχρονα δεδομένο εισόδου και αποτέλεσμα του BIOCHLOR καθώς προέκυψε ύστερα από διαδοχικές δοκιμές μέχρις ότου οι προβλεπόμενες συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθινίων σε απόσταση 305 m από την πηγή μειωθούν κάτω από τις αντίστοιχες μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις στο πόσιμο νερό. Είναι ίσος με τον προβλεπόμενο χρόνο αποκατάστασης.

#### 4.5 Συμπερασματικά σχόλια

Σε αυτό το κεφάλαιο, εφαρμόστηκε ενδεικτικά το BIOCHLOR στον ρυπασμένο με χλωροαιθέριο χώρο της εγκατάστασης 1381 της πολεμικής αεροπορικής βάσης στο Ακρωτήριο Κανάβεραλ, και παρουσιάστηκε: (1) ο υπολογισμός των συντελεστών βιομετασχηματισμού των χλωροαιθινίων μέσω της προσαρμογής των συγκεντρώσεων που υπολογίζονται από το BIOCHLOR κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, στις αντίστοιχες μετρήσεις πεδίου, για μια δεδομένη χρονική στιγμή μετά τη διαρροή, με διαδοχικές δοκιμές, και της επαλήθευσης του μοντέλου με τις μετρήσεις μιας μεταγενέστερης χρονικής στιγμής και (2) ο υπολογισμός του προβλεπόμενου χρόνου αποκατάστασης του ρυπασμένου χώρου για ένα υποθετικό σημείο συμμόρφωσης. Στο επόμενο κεφάλαιο, θα ακολουθήσει ανάλυση τριών ρυπασμένων χώρων, μέσω της οποίας παρουσιάζονται πιο συστηματικά οι δυνατότητες του BIOCHLOR και οι δυνατότητες της παρακολούθησης φυσικής εξασθένησης στους χώρους αυτούς.

## Κεφάλαιο 5

### **Εφαρμογή λογισμικού BIOCHLOR σε καταγεγραμμένα περιστατικά παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης**

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται με το λογισμικό BIOCHLOR τρία περιστατικά ρύπανσης με χλωροαιθένια με σκοπό την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης για την αποκατάστασή τους. Τα περιστατικά, σύμφωνα με όσα αναφέρονται αναλυτικότερα στην Ενότητα 3.4, επιλέχθηκαν ώστε να αντιπροσωπεύουν διαφορετικές κατηγορίες υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών, μεγέθους και έκτασης της ρύπανσης, καθώς και χρονικής μεταβολής των συγκεντρώσεων στην πηγή, σε μια προσπάθεια να εξαχθούν συμπεράσματα για το τι μπορεί να πετύχει η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση σε χώρους ρυπασμένους με χλωροαιθένια όταν χρησιμοποιείται αυτόνομα.

Από την αναζήτηση που πραγματοποιήθηκε στις βιβλιογραφικές πηγές που αναφέρονται στον Πίνακα 3.5, προέκυψε ότι σε λίγους από τους ρυπασμένους χώρους για τους οποίους έχει δημοσιευτεί η αξιολόγηση της φυσικής εξασθένησης σε άρθρα, μελέτες και πρακτικά συνεδρίων έχει εφαρμοστεί τελικά η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση είτε ως μοναδική μέθοδος αποκατάστασης είτε σε συνδυασμό με επεμβατικές μεθόδους αποκατάστασης. Επιπλέον, πολλά ήταν τα περιστατικά που αποκλείστηκαν λόγω υδρογεωλογικής ετερογένειας του υδροφορέα, σε βαθμό που δεν μπορεί να προσομοιωθεί με ένα αναλυτικό λογισμικό όπως το BIOCHLOR, έλλειψης δεδομένων για την υδραυλική αγωγιμότητα και την υδραυλική κλίση και ελλιπούς σκιαγράφησης της κατανομής των διαλυμένων χλωροαιθινίων. Δεδομένα για την πηγή, όπως το έτος έναρξης της διαρροής, η ποσότητα των ρύπων που διέρρευσαν και οι διαστάσεις της πηγής όπως προσομοιώνεται από το BIOCHLOR (Ενότητα 4.1), σπανίζουν στη βιβλιογραφία και η επιλογή των τιμών που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στο BIOCHLOR για τα παραπάνω βασίζεται στην εμπειρία του μελετητή. Μετά τη συνοπτική παρουσία των κριτηρίων και των δυσκολιών που προέκυψαν κατά την επιλογή, παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους τα τρία περιστατικά που θα προσομοιωθούν με το BIOCHLOR.

Το πρώτο περιστατικό που επιλέχθηκε είναι ο βιομηχανικός χώρος Bendix Corporation/Allied Automotive στο Μίσιγκαν, που ανήκει στη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α., και είναι από τα πρώτα πιο εκτενώς μελετημένα περιστατικά φυσικής εξασθένησης χλωριωμένων διαλυτών (NRC, 2000). Η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση εφαρμόστηκε αυτόνομα στον χώρο αυτόν από το 1997, όταν υπογράφηκε το πρακτικό απόφασης έως το 2009, όταν αυτό τροποποιήθηκε. Για το συγκεκριμένο περιστατικό υπάρχει πλήθος διαθέσιμων δεδομένων σχετικών με την υδρογεωλογία του

χώρου, το μήκος, το πλάτος και το βάθος εξάπλωσης της ρύπανσης, καθώς και τις γεωχημικές συνθήκες σε επιστημονικά άρθρα, πρακτικά συνεδρίων, στο πρακτικό απόφασης και στις αναφορές προόδου πενταετίας της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α., καθώς και μελέτες και αναφορές προόδου περιβαλλοντικών εταιρειών. Αυτές οι πληροφορίες έπρεπε να αναλυθούν και να επιλεγεί το κατάλληλο εννοιακό μοντέλο για την προσομοίωση της μεταφοράς των ρύπων. Επομένως, πρόκειται για ένα περιστατικό κατάλληλο για την παρουσίαση της μεθοδολογίας επιλογής των ελάχιστων απαιτούμενων δεδομένων για την ανάλυση με το λογισμικό BIOCHLOR. Ταυτόχρονα, αποτελεί ένα περιστατικό αντιπροσωπευτικό των χώρων μεγάλης επικινδυνότητας αφού 1) η μέση ταχύτητα μεταγωγής του υπόγειου νερού είναι της τάξης των 86,7 m/y, δηλαδή 3,3 έως 4,8 φορές μεγαλύτερη από τη διάμεση τιμή της ταχύτητας μεταγωγής σε ένα ρυπασμένο χώρο (Πίνακας 3.1), 2) το μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης, από την εστία της ρύπανσης μέχρι τη λίμνη Μίσιγκαν, σε συνολικές συγκεντρώσεις χλωροαιθινίων της τάξης των 0,1 mg/L ήταν 728 m το 1997 και 3) οι μέγιστες καταγεγραμμένες συνολικές συγκεντρώσεις χλωροαιθινίων είναι 250 mg/L.

Το δεύτερο περιστατικό που επιλέχθηκε είναι η περιοχή 800 στην υποενοότητα διαχείρισης της ρύπανσης SS-45 της πρώην αεροπορικής βάσης England στη Λουιζιάνα. Η εφαρμογή της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης για την αποκατάσταση του συγκεκριμένου χώρου εγκρίθηκε το 2001. Δεν έχουν εφαρμοστεί επεμβατικές μέθοδοι αποκατάστασης στον χώρο. Το περιστατικό αυτό θεωρείται αντιπροσωπευτικό των χώρων χαμηλής επικινδυνότητας αφού 1) η μέγιστη ταχύτητα μεταγωγής του υπόγειου νερού φτάνει μόλις τα 13 m/y, 2) το μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης με TCE, από την εστία της ρύπανσης, με νοτιοδυτική κατεύθυνση, σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από τη μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωσή του στο πόσιμο νερό (0,005 mg/L) ήταν 500 m το 2002 και 3) οι μέγιστες καταγεγραμμένες συνολικές συγκεντρώσεις χλωροαιθινίων είναι 0,54 mg/L.

Το τρίτο περιστατικό που επιλέχθηκε είναι η πρώην περιοχή πραγματοποίησης πυροσβεστικών ασκήσεων FTA-2 της αεροπορική βάσης Tinker στην Οκλαχόμα. Η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση εφαρμόζεται στον χώρο από το Δεκέμβριο του 1993. Τον Οκτώβριο του 2003 ξεκίνησε πιλοτική δοκιμή ενισχυμένης βιοαποκατάστασης στην περιοχή της πηγής. Ο εν λόγω ρυπασμένος χώρος επιλέχθηκε ως ένα περιστατικό ενδιάμεσης επικινδυνότητας σε σχέση με τα δύο προηγούμενα αφού 1) η ταχύτητα μεταγωγής του υπόγειου νερού είναι 46,7 m/y, 2) το μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης με TCE, από την εστία της ρύπανσης, με βορειοδυτική κατεύθυνση, σε συγκεντρώσεις της τάξης των 0,01 mg/L ήταν 465 m το 1997 και 3) οι μέγιστες καταγεγραμμένες συνολικές συγκεντρώσεις χλωροαιθινίων είναι 10,64 mg/L.

Τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για την εφαρμογή του λογισμικού BIOCHLOR και τα δεδομένα εξόδου παρουσιάστηκαν εκτενώς στο Κεφάλαιο 4. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο για την προσομοίωση των τριών περιστατικών είναι τα εξής: αρχικά βάσει των μετρήσεων πεδίου στην πηγή πραγματοποιήθηκαν κατάλληλες υποθέσεις για το αν η συγκέντρωση στην περιοχή της πηγής απομειώνεται ή όχι. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε ο συντελεστής απομείωσης για την περίπτωση πηγής μειούμενης έντασης. Υπολογίστηκαν οι συντελεστές βιομετασχηματισμού των χλωροαιθινίων, μέσω της βαθμονόμησης του μοντέλου με τις μετρήσεις πεδίου μιας δεδομένης χρονικής στιγμής όπως περιγράφεται στην Ενότητα 4.3.2. Ακολούθησε η επαλήθευση του μοντέλου με τις μετρήσεις πεδίου μιας μεταγενέστερης χρονικής στιγμής. Το βαθμονομημένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του χρόνου (TOS) και της απόστασης σταθεροποίησης (DOS) της ρύπανσης στις περιπτώσεις πηγής συνεχούς έντασης και του προβλεπόμενου χρόνου αποκατάστασης (TOR) στις περιπτώσεις πηγής μειούμενης έντασης. Οι ελλείψεις δεδομένων και οι παράμετροι για τις οποίες υπάρχει αβεβαιότητα διαφέρουν από περιστατικό σε περιστατικό και αναλόγως αυτών τροποποιήθηκαν τα παραπάνω βήματα και έγιναν διαφορετικές αναλύσεις ευαισθησίας. Συγκεκριμένα, στον χώρο Bendix Corporation/Allied Automotive, επειδή δεν διατίθενται μετρήσεις πεδίου από πολλά φρέατα παρακολούθησης σε δύο διαφορετικές στιγμές, δεν έγινε βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου, αλλά επαναληπτικές δοκιμές για την προσαρμογή των συντελεστών βιομετασχηματισμού, όπως περιγράφεται αναλυτικότερα στην Ενότητα 5.1.6. Επιπλέον, λόγω έλλειψης χρονοσειράς μετρήσεων στην περιοχή της πηγής εξετάστηκαν δύο διαφορετικά σενάρια: πηγής μειούμενης έντασης και σταθερής έντασης. Αναλύσεις ευαισθησίας δεν πραγματοποιήθηκαν γι' αυτό το περιστατικό, αφού οι περισσότερες πληροφορίες για τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου ήταν διαθέσιμες στη βιβλιογραφία. Αντιθέτως, στα άλλα δύο περιστατικά πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση και επαλήθευση των δεδομένων, οι παραδοχές για την πηγή έγιναν σύμφωνα με διαθέσιμες μετρήσεις και πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας για τις παραμέτρους που υπάρχει αβεβαιότητα.

### ***5.1 Περιστατικό ρύπανσης υπεδάφους με χλωροαιθίνια: Αυτοκινητοβιομηχανία στο Μίσιγκαν (Bendix Corporation/Allied Automotive)***

Οι γενικές πληροφορίες των Ενότητων 5.1.1 και 5.1.2 προέρχονται από το πρακτικό απόφασης της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α., που υπογράφηκε το 1997 (U.S. EPA, 1997a).

#### ***5.1.1 Ο χώρος***

**Κατηγορία χώρου.** Ο βιομηχανικός χώρος Bendix Corp./Allied Automotive, που ανήκει στη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α., βρίσκεται κοντά στην πόλη St. Joseph,

στην Πολιτεία Μίσιγκαν, σε απόσταση περίπου 750 m ανατολικά από τη λίμνη Μίσιγκαν και 500 m δυτικά από το ρυάκι συνεχούς ροής Hickory (Σχήμα 5.1). Από το 1939 έως το 1952, λειτουργούσαν στον χώρο χυτήριο σιδήρου και μηχανουργείο της εταιρείας Nylen Products. Το 1952, η εταιρεία Bendix Automotive αγόρασε την ιδιοκτησία της Nylen και ίδρυσε εργοστάσιο αυτοκινητοβιομηχανίας και αεροναυπηγικής, το οποίο λειτούργησε μέχρι το 1983. Το 1983, η εταιρεία Allied Chemical/Allied Signal Incorporated αγόρασε την ιδιοκτησία και τη χρησιμοποίησε επίσης ως εργοστάσιο αυτοκινητοβιομηχανίας και αεροναυπηγικής. Από το 1996, ο βιομηχανικός χώρος ανήκει στην εταιρεία κατασκευής συστημάτων πέδησης Bosch Braking Systems, που ανέλαβε και την ευθύνη για την αποκατάσταση του ρυπασμένου υπεδάφους. Στη βιβλιογραφία ο χώρος αναφέρεται ως επί το πλείστον με την ονομασία Bendix.

**Χρήσεις γης.** Όσον αφορά τις χρήσεις γης στην περιοχή που περιβάλλει την πρώην ιδιοκτησία Bendix (νυν Bosch) και έχει ρυπανθεί, η περιοχή ανάμεσα στην ιδιοκτησία και τη λίμνη Μίσιγκαν, χρησιμοποιείται για οικιστικούς και εμπορικούς σκοπούς, ενώ αυτή ανάμεσα στον βιομηχανικό χώρο και το ρυάκι Hickory χρησιμοποιείται για εμπορικούς και βιομηχανικούς σκοπούς. Η λίμνη Μίσιγκαν και το ρυάκι Hickory χρησιμοποιούνται για ψυχαγωγικούς σκοπούς. Η περιοχή εφοδιάζεται με πόσιμο νερό από το δημοτικό σύστημα υδροδότησης της πόλης St. Joseph, το οποίο τροφοδοτείται από τη λίμνη Μίσιγκαν, 5,6 km βόρεια του ρυπασμένου χώρου κι έτσι το ρυπασμένο υπόγειο νερό δεν χρησιμοποιείται για να καλύψει ανάγκες ύδρευσης.

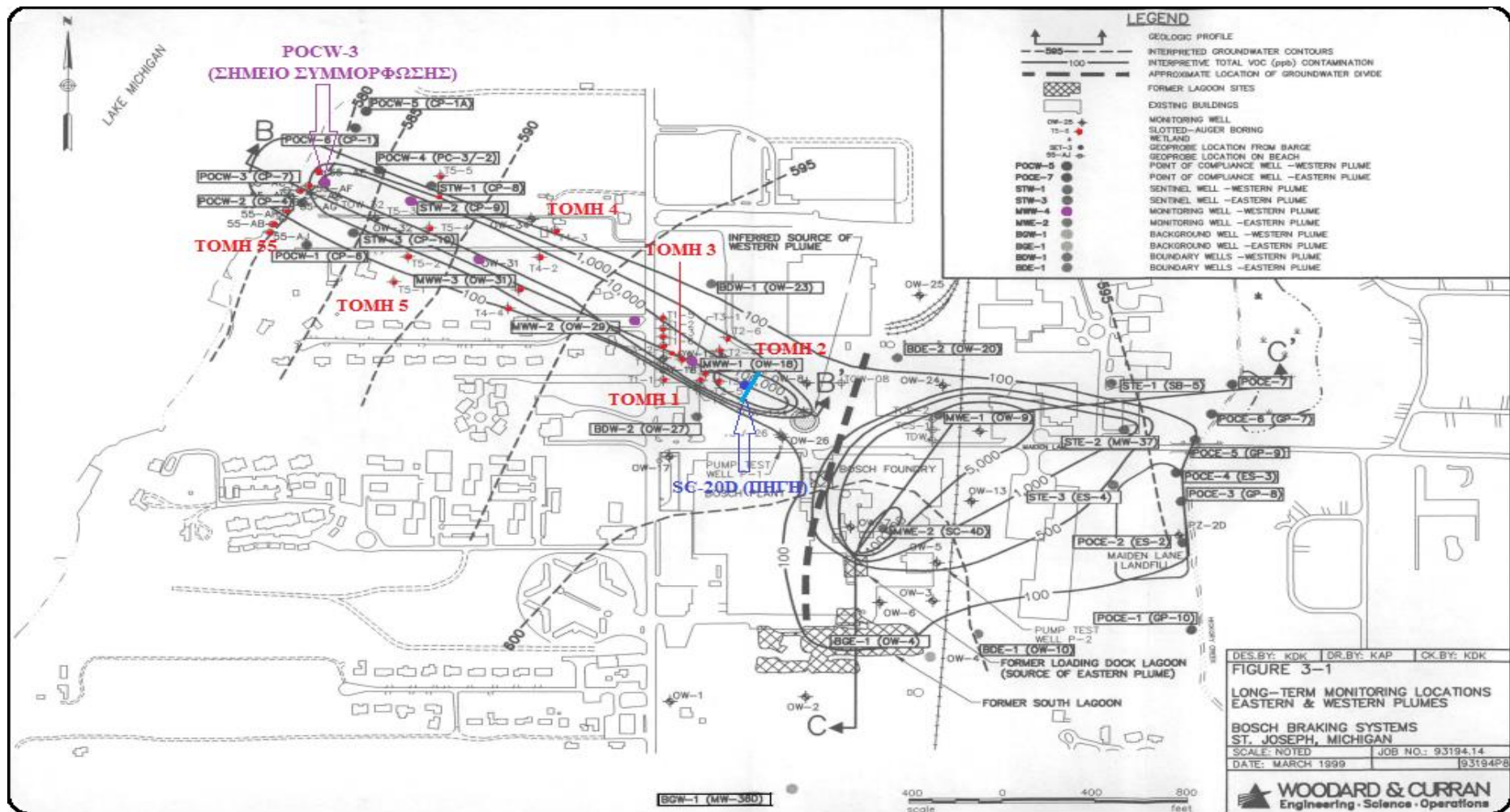
### 5.1.2 Αίτια ρύπανσης και τύπος ρύπου

**Ρυπογόνος δραστηριότητα.** Η ρύπανση του υπογείου νερού από τριχλωροαιθέριο ανιχνεύθηκε πρώτη φορά στον χώρο Bendix το 1982. Λόγω του εργοστασίου της Bendix που λειτουργούσε στον χώρο, είναι πιθανό να προέρχεται από χρησιμοποιημένους διαλύτες που απορρίφθηκαν στο υπέδαφος. Εντός των ορίων του χώρου Bendix, υπήρχαν τρεις αυτοσχέδιες υπαίθριες δεξαμενές λυμάτων: (1) του χυτηρίου, (2) στο νότιο τμήμα της ιδιοκτησίας Bendix και (3) της αποβάθρας φόρτωσης (Σχήμα 5.1), στις οποίες γινόταν απόθεση ελαιωδών αποβλήτων του χυτηρίου και του μηχανουργείου από το 1965 έως το 1975. Τότε σταμάτησε η απόθεση αποβλήτων στις αυτοσχέδιες υπαίθριες δεξαμενές λυμάτων του χυτηρίου και της αποβάθρας φόρτωσης και τα περιεχόμενά τους μεταφέρθηκαν στην αυτοσχέδια δεξαμενή λυμάτων στο νότιο τμήμα της ιδιοκτησίας. Το 1978 σταμάτησε η χρήση και αυτής της δεξαμενής, η οποία, στη συνέχεια, καλύφθηκε με αργιλική στρώση.

**Κύριοι ρύποι.** Οι κύριοι ρύποι ενδιαφέροντος του υπόγειου νερού είναι το TCE, μαζί με τα προϊόντα βιοαποδόμησής του, cis-DCE, trans-DCE, 1,1-DCE και VC. Το cis-DCE είναι το κυρίαρχο ισομερές του DCE που ανιχνεύθηκε στο υπόγειο νερό.



Σχήμα 5.1 Φωτογραφία ρυπασμένου χώρου Bendix (Bosch), St. Joseph, Michigan (από δορυφόρο, Bing maps, 2012 - τροποποιημένη)

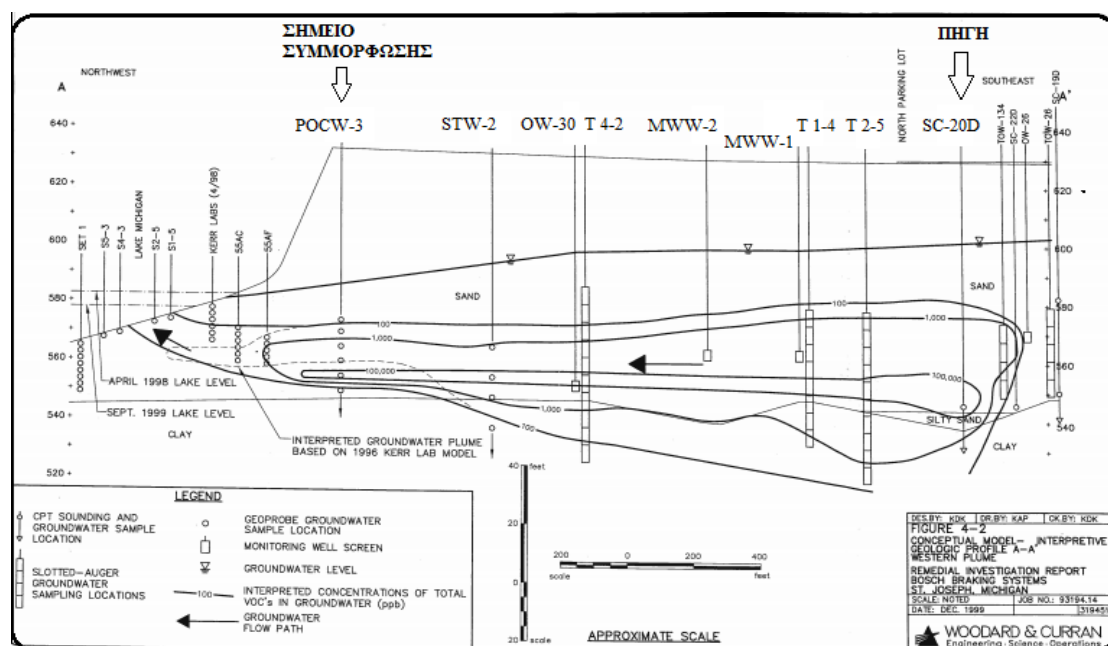


Σχήμα 5.2 Θέσεις δειγματοληψίας και καμπύλες ίσων συνολικών συγκεντρώσεων χλωροαιθενίων στον ρυπασμένο χώρο Bendix, St. Joseph, Michigan.  
 Σύμβολα: T-1= Τομή 1, T 1-2= Γεώτρηση 2 της Τομής 1 (Woodard & Curran, 1999b - τροποποιημένο)



### 5.1.3 Χαρακτηριστικά υπεδάφους

**Υδροφόρος ορίζοντας – Υδραυλική κλίση.** Λόγω της κατείσδυσης του βρόχινου νερού που τροφοδοτεί τον επιφανειακό υδροφορέα έχει διαμορφωθεί ένας υπόγειος υδροκρίτης (division), ακριβώς κάτω από την πρώην ιδιοκτησία της εταιρείας Bendix, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Το υπόγειο νερό ανατολικά του υπόγειου υδροκρίτη εκβάλλει στο ρυάκι Hickory και δυτικά εκβάλλει στη λίμνη Μίσιγκαν. Λόγω του υπόγειου υδροκρίτη, ο διαλυμένοι ρύποι έχουν επεκταθεί τόσο ανατολικά της ιδιοκτησίας, προς το ρυάκι Hickory, όσο και δυτικά της ιδιοκτησίας προς τη λίμνη Μίσιγκαν, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. (U.S. EPA, 1997a). Η ρύπανση εκατέρωθεν του χώρου Bendix έχει μελετηθεί ξεχωριστά, αφού προέρχεται από διαφορετικές πηγές. Παρακάτω θα ασχοληθούμε μόνο με τους ρύπους που μεταφέρονται προς τη λίμνη Μίσιγκαν, δυτικά του υπόγειου υδροκρίτη. Σε αυτό το κομμάτι του υδροφορέα, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται 9-17 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (Tiedeman & Gorelick, 1993) (Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3 Εννοιακό μοντέλο- Γεωλογική τομή A-A' (αντίστοιχη της τομής B-B' στο Σχήμα 5.2), στον άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης στον χώρο Bendix, St. Joseph, Μίσιγκαν. Σύμβολα: T 1-4= Γεώτρηση 4 της Τομής 1 (Woodard & Curran, 1999a - τροποποιημένο)

Από το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων στις τριμηνιαίες αναφορές προόδου της περιβαλλοντικής εταιρείας Woodard & Curran (2001a, b· 2002a, b· 2003·2004·2005a, b) για τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, από τον Απρίλιο του 2001 έως τον Ιούνιο του 2005, παρατηρήθηκε ότι κοντά στην πηγή η υδραυλική κλίση είναι πιο ήπια και μεγαλώνει κοντά στη λίμνη Μίσιγκαν. Για την εκτίμηση της οριζόντιας υδραυλικής κλίσης στο τμήμα με την ήπια υδραυλική κλίση χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα για τα φρέατα παρακολούθησης MWW-1 και MWW-3. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1, η μέση διαφορά υδραυλικού ύψους

μεταξύ των φρεάτων MWW-1 και MWW-3 είναι 0,98 m, ενώ η απόσταση μεταξύ των φρεάτων είναι 322,7 m, οπότε η μέση υδραυλική κλίση στο τμήμα αυτό είναι 0,003. Αντίστοιχα, για την εκτίμηση της οριζόντιας υδραυλικής κλίσης στο τμήμα με την απότομη υδραυλική κλίση χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα για τα φρέατα παρακολούθησης MWW-3 και POCW-3. Η μέση διαφορά υδραυλικού ύψους μεταξύ των φρεάτων MWW-3 και POCW-3 είναι 3,7 m, ενώ η απόσταση μεταξύ των φρεάτων είναι 234 m, οπότε η μέση υδραυλική κλίση στο τμήμα αυτό είναι 0,016. Συνολικά, η μέση υδραυλική κλίση στην υπό μελέτη περιοχή υπολογίζεται ίση με 0,0095 από τον μέσο όρο των μέσων υδραυλικών κλίσεων των δύο επιμέρους τμημάτων.

Πίνακας 5.1 Μετρήσεις στάθμης υδροφόρου ορίζοντα (2001-05) και υπολογισμός μέσης υδραυλικής κλίσης

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	Σ.Υ.Ο. (m) ΣΤΟ ΦΡΕΑΡ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ			ΔΙΑΦΟΡΑ Σ.Υ.Ο. (m)	
	MWW-1	MWW-3	POCW-3	μεταξύ MWW-1 και MWW-3	μεταξύ MWW-3 και POCW-3
Απρίλιος 2001	181,67	180,77	176,86	0,902	3,90
Ιούνιος 2001	181,73	180,86	176,99	0,872	3,87
Απρίλιος 2002	181,92	180,82	177,04	1,100	3,78
Ιούνιος 2002	181,75	180,97	177,29	0,780	3,68
Απρίλιος 2003	181,83	180,54	176,74	1,298	3,80
Σεπτέμβριος 2003	181,45	180,63	176,96	0,820	3,67
Σεπτέμβριος 2004	181,77	180,57	177,32	1,195	3,25
Ιούνιος 2005	181,82	180,95	177,15	0,869	3,80
<b>Μέση διαφορά Σ.Υ.Ο. (m)</b>				0,98	3,7
<b>Απόσταση (m)</b>				322,7	234
<b>Μέση υδραυλική κλίση i</b>				0,003	0,016

Σ.Υ.Ο. = Στάθμη Υδροφόρου Ορίζοντα

Οι μετρήσεις της Σ.Υ.Ο. που καταγράφονται στον Πίνακα 5.1 προέρχονται από τις ακόλουθες πηγές: Woodard & Curran (2001a), Woodard & Curran (2001b), Woodard & Curran (2002a), Woodard & Curran (2002b), Woodard & Curran (2003), Woodard & Curran (2004), Woodard & Curran (2005a), Woodard & Curran (2005b)

**Στρωματογραφία – Υδραυλική αγωγιμότητα.** Ο επιφανειακός υδροφορέας έχει πάχος 12-32 m και αποτελείται από σχετικά ομοιογενή λεπτή έως μέτρια άμμο με λίγη ιλύ (Tiedeman & Gorelick, 1993). Όσον αφορά την υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα, έχουν αναφερθεί στο παρελθόν δύο διαφορετικές τιμές: (1) Από δοκιμαστικές αντλήσεις που πραγματοποιήθηκαν τον Αύγουστο του 1985, περίπου 457 m δυτικά του ρυακιού Hickory Creek, προέκυψε ίση με  $1,21 \times 10^{-4}$  m/s που είναι λογική τιμή για μέτρια άμμο (Keck, 1986).

(2) Οι Tiedeman & Gorelick (1993), μέσω προσομοιώσεων με το μοντέλο MODFLOW, εκτίμησαν ότι η υδραυλική αγωγιμότητα είναι ίση με  $8,69 \times 10^{-5}$  m/s. Ο ελεύθερος υδροφορέας υπέρκειται ενός αργλικού στρώματος πολύ χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας.

#### 5.1.4 Έκταση ρύπανσης

**Πηγή των ρύπων.** Το 1994 ανιχνεύθηκαν με Δοκιμή Διείσδυσης Κώνου (Cone Penetration Test - CPT) στη θέση δειγματοληψίας SC-20D υψηλές συγκεντρώσεις χλωροαιθενίων (TCE: 85 mg/l και cis-DCE: 160 mg/l) σε μεγάλο βάθος (24 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους), λίγο πιο πάνω, δηλαδή, από το αργλικό στρώμα που βρίσκεται σε βάθος περίπου 27,4 m. Επειδή οι συγκεντρώσεις αυτές ξεπερνούν το 1% της διαλυτότητας των TCE: 1100 mg/L στους 25°C (LaGrega *et al.*, 1994) και cis-DCE: 3500 mg/L στους 25°C (ATSDR, 1996), θεωρείται ότι κοντά στη θέση δειγματοληψίας SC-20D μπορεί να υπάρχει μη-υδατική φάση. Άρα, βάσει και των δειγματοληψιών της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. σε γεωτρήσεις κατά μήκος τριών τομών (T-1, T-2 και T-3) το 1991 (Σχήμα 5.2), η πηγή της ρύπανσης που μεταφέρεται προς τη λίμνη Μίσιγκαν, θεωρείται ότι βρίσκεται κάτω από τον χώρο στάθμευσης, βόρεια του εργοστασίου, στη διεπιφάνεια μεταξύ άμμου και αργίλου, 24 m περίπου κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ή κοντά σε αυτή (Woodard & Curran, 1997b). Το έτος έναρξης της διαρροής είναι άγνωστο, αφού δεν υπάρχουν διαθέσιμες καταγραφές.

**Κατανομή ρύπων.** Το 1997, η ρύπανση του υπογείου νερού από χλωριωμένους αλειφατικούς υδρογονάνθρακες σε συνολικές συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 0,1 mg/l εκτεινόταν σε απόσταση 728 m κατάντη της θέσης δειγματοληψίας SC-20D, όπου θεωρείται ότι βρίσκεται η πηγή (Σχήμα 5.3). Σύμφωνα με τους An *et al.* (2004), μεταξύ του 1991 και 1995, το πλάτος της ρυπασμένης έκτασης ήταν 108, 151, 189, και 222 m στις τομές T-2, T-4, T-5 και στην τομή 55 στην όχθη της λίμνης (Σχήμα 5.2).

Πίνακας 5.2 Μέγιστες συγκεντρώσεις χλωροαιθενίων σε θέσεις δειγματοληψίας κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης

ΘΕΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	ΕΤΟΣ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΗΓΗ (m)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (mg/L)		
			TCE	cis-DCE	VC
SC-20D*	1994	0	85	160	5
T 2-5	1991	88	55,4	128	4,43
T 1-4	1991	140	21,3	31,3	11
T 4-2	1992	345	8,72	9,76	1,66
55-AF	1995	635	0,224	0,023	0,0018

TCE= Τριχλωροαιθένιο, cis-DCE= cis-1,2- Διχλωροαιθένιο, VC= Βινυλοχλωρίδιο

\*Η δειγματοληψία έγινε το 1994 με Δοκιμή Διείσδυσης Κώνου (Cone Penetration Test – CPT)

**Τιμές συγκεντρώσεων.** Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν σε θέσεις δειγματοληψίας κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης από το 1991 έως το 1995 (An *et al.*, 2004· Semprini *et al.*, 1995· Woodard & Curran, 1997b). Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των συντελεστών βιομετασχηματισμού, όπως περιγράφεται παρακάτω, στην Ενότητα 5.1.6.

**Βιομετασχηματισμός των ρύπων.** Αναλύσεις της ποιότητας του υπόγειου νερού που πραγματοποιήθηκαν το 1991 και 1992 υποδεικνύουν ότι στο πεδίο επικρατούν συνθήκες αναγωγικής αποχλωρίωσης, λόγω της παρουσίας στα δείγματα όλων των προϊόντων του βιομετασχηματισμού καθώς και ανιχνεύσιμων συγκεντρώσεων αιθενίου (Wilson *et al.*, 1994). Οι Weaver *et al.* (1996), συνδυάζοντας δεδομένα μετρήσεων των ετών 1991-95 και ροές μάζας που προκύπτουν από την εξίσωση μονοδιάστατης ροής-διδιάστατης μεταφοράς με υποβάθμιση 1<sup>ης</sup> τάξης, υπολόγισαν τους συντελεστές βιομετασχηματισμού που φαίνονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3 Συντελεστές βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν από τους Weaver *et al.*, (1996)

ΕΝΩΣΗ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΒΙΟΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ λ (y <sup>-1</sup> )	
	ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΜΩΝ 1-4	ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΜΩΝ 4-5
TCE	0,3	1,7
cis-DCE	0,54	1,1
VC	2,6	3,1

TCE= Τριχλωροαιθέριο, cis-DCE=cis-1,2-Διχλωροαιθέριο, VC= Βινυλοχλωρίδιο

#### 5.1.5 Έργα αποκατάστασης

**Στόχοι αποκατάστασης.** Στόχος της αποκατάστασης είναι η μείωση των συγκεντρώσεων των διαλυμένων χλωροαιθινίων στο υπόγειο νερό, στο σημείο συμμόρφωσης (Point of Compliance-POC) POCW-3, ανάντη της όχθης της λίμνης Μίσιγκαν, σε απόσταση 567 m κατάντη της πηγής κάτω από τη μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση στο πόσιμο νερό (TCE: 0,005 mg/L, cis-DCE: 0,070 mg/L και VC: 0,002 mg/L).

**Τύπος – πρόοδος έργων.** Ο χώρος μπήκε επίσημα στη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α. στις 15 Φεβρουαρίου 1990. Στο πρακτικό απόφασης που υπογράφηκε τον Σεπτέμβριο του 1997, αποφασίστηκε να εφαρμοστεί η μέθοδος της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης για την αποκατάσταση της ρύπανσης που έχει εξαπλωθεί δυτικά του υπόγειου υδροκρίτη (U.S. EPA, 1997a). Σύμφωνα με το πρακτικό απόφασης αναμένεται ότι οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθινίων θα μειωθούν σε όλα τα σημεία, από τα ανάντη έως τα κατάντη, στα επίπεδα των μέγιστων επιτρεπόμενων στο πόσιμο νερό σε χρονικό διάστημα 150 έως 250 ετών (Woodard & Curran, 1997a· U.S. EPA, 1997a). Όμως, μετά τις αρχές της

δεκαετίας 2000 άρχισαν να παρατηρούνται αυξητικές τάσεις στις συγκεντρώσεις των cis-DCE και VC, ιδιαίτερα στα φρέατα παρακολούθησης MWW-2 και MWW-3, μεταξύ της πηγής και του σημείου συμμόρφωσης. Έτσι, η αναφορά τροποποίησης του πρακτικού απόφασης, που υπογράφηκε τον Φεβρουάριο του 2009, περιέλαβε μέτρα έκτακτης ανάγκης λόγω υπέρβασης των κριτηρίων συμμόρφωσης στα φρέατα παρακολούθησης ανάντη της όχθης της λίμνης. Τα μέτρα προβλέπουν την εγκατάσταση συστήματος άντλησης και επεξεργασίας στην περιοχή της πηγής για τη μείωση του ρυπαντικού φορτίου στην πηγή και την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας των διεργασιών φυσικής εξασθένησης. Η λειτουργία του συστήματος θα συνεχιστεί μέχρις ότου θεωρηθεί ότι θα μπορούν να επιτευχθούν οι στόχοι αποκατάστασης μέσω της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης (U.S. EPA, 2009b).

#### 5.1.6 Προσομοίωση με το λογισμικό BIOCHLOR

**Δεδομένα εισόδου στο μοντέλο BIOCHLOR.** Η μεταφορά των διαλυμένων ρύπων από την εστία της ρύπανσης με κατεύθυνση προς τη λίμνη Μίσιγκαν προσομοιώθηκε με το μοντέλο BIOCHLOR, θεωρώντας όλο το πεδίο ως μία ομοιογενή αναερόβια ζώνη. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με την υπόθεση ότι στον ρυπασμένο χώρο δεν εφαρμόζονται επεμβατικές μέθοδοι αποκατάστασης.

Το πορώδες θεωρήθηκε ίσο με  $n=0,3$ . Για μέση υδραυλική κλίση  $i=0,0095$  και υδραυλική αγωγιμότητα  $K=8,69 \times 10^{-5}$  m/s, η ταχύτητα μεταγωγής του υπόγειου νερού υπολογίστηκε από τη σχέση  $v_s = Ki/n$ , ίση με 86,68 m/y.

Βάσει του παρατηρούμενου μήκους εξάπλωσης της ρύπανσης με χλωριωμένους αλειφατικούς υδρογονάνθρακες σε συνολικές συγκεντρώσεις πάνω από 0,1 mg/L το 1997,  $L_p=728$  m, και χρησιμοποιώντας τη διορθωμένη σχέση των Xu & Eckstein (1995):  $\alpha_x = 0,82 \times (\log L_p)^{2,446}$  (διόρθωση: Al-Suwaiyan, 1996), υπολογίστηκε συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς ίσος με  $\alpha_x=10,73$  m. Ο λόγος των συντελεστών οριζόντιας εγκάρσιας/διαμήκους μηχανικής διασποράς θεωρήθηκε ίσος με 0,1 (Gelhar *et al.*, 1992). Ο λόγος των συντελεστών κατακόρυφης εγκάρσιας/διαμήκους μηχανικής διασποράς θεωρήθηκε ίσος με μια μικρή τιμή 0,001 για να προσομοιωθεί συντηρητικά η κατακόρυφη εγκάρσια μηχανική διασπορά.

Ο συντελεστής υστέρησης κάθε ρύπου υπολογίζεται από τη σχέση  $R = 1 + \rho_d K_p/n$ , όπου  $\rho_d$ =ξηρή πυκνότητα του εδάφους,  $K_p$ =συντελεστής διαχωρισμού και  $n$ =πορώδες. Ο συντελεστής  $K_p$  προσδιορίζεται μέσω της σχέσης:  $K_p = K_{oc} \times f_{oc}$ , όπου  $K_{oc}$ =συντελεστής διαχωρισμού μεταξύ της υδατικής φάσης και του οργανικού κλάσματος της στερεάς φάσης και  $f_{oc}$ =κλάσμα οργανικού άνθρακα. Η ξηρή πυκνότητα του εδάφους θεωρήθηκε ίση με  $\rho_d=1,86$  kg/L. Για το κλάσμα οργανικού άνθρακα  $f_{oc}$  μετρήθηκαν μέσω εδαφικών δοκιμών το

2012 κοντά στην κοινότητα Churchill Farms τιμές που ποικίλλουν από 0,00032 έως 0,00065 (Mannik & Smith, 2012). Για το BIOCHLOR χρησιμοποιήθηκε μια ενδιάμεση τιμή  $f_{oc}=0,0005$ . Οι τιμές των συντελεστών διαχωρισμού  $K_{oc}$  των ενώσεων TCE, cis-DCE και VC λήφθηκαν ίσες με 107, 49 και 98 L/kg, αντίστοιχα (ATSDR, 1996· ATSDR, 1997· ATSDR, 2006). Ο συντελεστής διαχωρισμού  $K_{oc}$  του αιθενίου υπολογίστηκε ίσος με 8 L/kg από τη σχέση:  $\log K_{oc} = 0,7919 \log K_{ow} + 0,00784$  (U.S. EPA, 2012b), όπου  $K_{ow}$ =συντελεστής διαχωρισμού μεταξύ οκτανόλης και νερού, με  $\log K_{ow}=1,13$  (<http://www.inchem.org/documents/sids/sids/74851.pdf>). Ο κοινός συντελεστής υστέρησης των χλωροαιθενίων για το BIOCHLOR προέκυψε ίσος με 1,225 από τη διάμεση τιμή των επιμέρους συντελεστών υστέρησης κάθε ένωσης (Πίνακας 5.4).

Πίνακας 5.4 Εκτίμηση της τιμής του κοινού συντελεστή υστέρησης των χλωροαιθενίων

ΕΝΩΣΗ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ $K_{oc}$ (L/kg)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ <b>R</b>
TCE	107	1,33
cis-DCE	49	1,15
VC	98	1,30
Αιθένιο	8	1,02
<b>Διάμεση τιμή (κοινός συντελεστής υστέρησης R των χλωροαιθενίων)</b>		<b>1,225</b>

TCE= Τριχλωροαιθένιο, cis-DCE= cis-1,2- Διχλωροαιθένιο, VC= Βινυλοχλωρίδιο

Η ακριβής ημερομηνία έναρξης της διαρροής του TCE στο υπόγειο νερό και η ακριβής συγκέντρωση που διέρρευσε είναι άγνωστες. Αυτά τα χαρακτηριστικά της διαρροής καθορίζουν την πηγή του ρύπου και στο λογισμικό BIOCHLOR καθορίζουν τις συνοριακές συνθήκες του προβλήματος. Επομένως, το πραγματικό σύστημα που θέλουμε να προσομοιώσουμε δεν είναι πλήρως γνωστό. Έτσι, θεωρήθηκε ότι η διαρροή ξεκίνησε από την αρχή λειτουργίας του εργοστασίου (1952) σε εγκάρσιο επίπεδο περί τη θέση δειγματοληψίας SC-20D και διαμορφώθηκαν δύο διαφορετικά σενάρια για την ένταση της πηγής:

➤ **Σενάριο A: Πηγή μειούμενης έντασης.** Σε αυτήν την περίπτωση θεωρήθηκε ότι η συγκέντρωση στην πηγή απομειώνεται σύμφωνα με έναν συντελεστή απομείωσης 1<sup>ης</sup> τάξης (Σχέση 4.4). Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, σύμφωνα με τη θεώρηση της Rifai στη μελέτη της Parsons ES (2009), η αρχική συγκέντρωση του TCE στην πηγή ελήφθη ίση με την υδατική του διαλυτότητα:  $S_{TCE}=1100$  mg/L στους 25°C (LaGrega *et al.*, 1994). Ο συντελεστής απομείωσης της συγκέντρωσης στην πηγή υπολογίστηκε από τη Σχέση 4.4:

$$k_s = -\frac{1}{t} \times \ln \left( \frac{C_{TCE}}{C_{0,TCE}} \right) = -\frac{1}{42} \times \ln \left( \frac{85}{1100} \right) = 0,061 \text{ y}^{-1}$$

Υπενθυμίζεται ότι η τιμή  $C_{TCE}=85\text{mg/L}$  είναι η συγκέντρωση που μετρήθηκε στην πηγή (SC-20D) το 1994, και έτσι  $t=1994-1952=42$  χρόνια. Όπως αναφέρεται στην Ενότητα 4.2, οι Newell *et al.* (2006) υπολόγισαν για τον συντελεστή απομείωσης 1<sup>ης</sup> τάξης του TCE στην περιοχή της πηγής εύρος τιμών από -0,36 έως 0,60  $\text{y}^{-1}$  (Πίνακας 4.4), όπου το αρνητικό πρόσημο σημαίνει αύξηση των συγκεντρώσεων. Η τιμή  $k_s=0,061 \text{ y}^{-1}$  ανήκει σε αυτό το εύρος. Επειδή ο συντελεστής απομείωσης  $k_s$  που χρησιμοποιεί το BIOCHLOR είναι κοινός για όλες τις ενώσεις, θεωρήθηκε ότι η αρχική συγκέντρωση του cis-DCE στην πηγή ήταν ίση με:

$$C_{DCE} = C_{0,DCE} e^{-k_s t} \rightarrow C_{0,DCE} = \frac{C_{DCE}}{e^{-k_s t}} = \frac{160}{e^{-0,061 \times 42}} = 2070 \text{ mg/l},$$

τιμή που είναι μικρότερη από τη υδατική διαλυτότητα του cis-DCE:  $S=3500 \text{ mg/L}$  στους 25° C (ATSDR, 1996).

➤ **Σενάριο B: Πηγή σταθερής έντασης.** Σε αυτήν την περίπτωση θεωρήθηκε ότι διέρρευσαν το 1952 χλωροαιθένια σε συγκεντρώσεις ίσες με αυτές που ανιχνεύθηκαν το 1994 στη θέση δειγματοληψίας SC-20D (Πίνακας 4.6), δηλαδή ότι η συγκέντρωση στην πηγή παραμένει σταθερή με τον χρόνο.

Το πάχος της πηγής καθορίστηκε από το βάθος όπου έχουν μετρηθεί οι μέγιστες συγκεντρώσεις και υπολογίστηκε ίσο με 7,6 m (Παράρτημα Β). Το πλάτος της πηγής εκτιμήθηκε από την κατανομή της μάζας των διαλυμένων χλωριωμένων αλειφατικών υδρογονανθράκων του 1999 (Σχήμα 5.2), σχεδιάζοντας μια γραμμή κατά πλάτος της καμπύλης των μέγιστων συνολικών συγκεντρώσεων (100 mg/L), εγκάρσια στον καθορισμένο άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης. Έτσι, το πλάτος της πηγής τέθηκε ίσο με 38,7 m (γαλάζια γραμμή στο Σχήμα 5.2).

Χρησιμοποιήθηκαν χρόνοι προσομοίωσης 39, 40 και 43 έτη (από το 1952 έως το 1991, 1992 και 1995 αντίστοιχα) για την προσαρμογή των συντελεστών βιομετασχηματισμού. Οι διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο είναι 222 m x 728 m.

#### 5.1.6.1 Σενάριο A: Πηγή μειούμενης έντασης

**Εκτίμηση συντελεστών βιομετασχηματισμού των χλωροαιθινίων.** Αρχικά, έγινε μια προσπάθεια εκτίμησης των συντελεστών βιομετασχηματισμού των TCE, cis-DCE και VC, μέσω της προσαρμογής των υπολογισμένων από το BIOCHLOR συγκεντρώσεων κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης στις μετρήσεις πεδίου των ετών 1991 (γεωτρήσεις T 2-5, T 1-4), 1992 (γεώτρηση T 4-2) και 1995 (γεώτρηση 55-AF). Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.2, δεν διατίθενται μετρήσεις σε πολλές θέσεις δειγματοληψίας, σε διαστήματα που να καλύπτουν τη ρυπασμένη έκταση από τα ανάντη έως τα κατόντη και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Πίνακας 5.5 Δεδομένα εισόδου του BIOCHLOR για την εκτίμηση των συντελεστών βιομετασχηματισμού για το Σενάριο A

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ
Υδραυλική αγωγιμότητα- K (m/y)	2737,3
(Υδραυλική αγωγιμότητα- K (m/s))	$8,68 \times 10^{-5}$
Υδραυλική κλίση- i	0,0095
Πορώδες- n	0,3
Συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_x$ (m)	10,73
Λόγος συντελεστών οριζόντιας εγκάρσιας/διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_y/\alpha_x$	0,1
Λόγος συντελεστών κατακόρυφης εγκάρσιας/διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_z/\alpha_x$	0,001
Ξηρή πυκνότητα εδάφους- $\rho_d$ (kg/L)	1,86
Κλάσμα οργανικού άνθρακα- $f_{oc}$	0,0005
Μέσος συντελεστής υστέρησης των χλωροαιθινίων- R	1,225
Συντελεστές βιομετασχηματισμού- $\lambda$ ( $y^{-1}$ )*	
TCE → DCE	0,77
DCE → VC	1,7
VC → αιθέριο	5,5
Χρόνος προσομοίωσης- t (y)	39, 40, 43
Μήκος περιοχής υπό προσομοίωση (m)	140, 345, 635 (για χρόνους προσομοίωσης 39, 40, 43 έτη αντίστοιχα)
Πλάτος περιοχής υπό προσομοίωση (m)	222
Πάχος πηγής στην κορεσμένη ζώνη- Z (m)	7,6
Πλάτος πηγής- Y (m)	38,7
Αρχικές συγκεντρώσεις στην πηγή- $C_0$ (mg/L)	
TCE	1100
cis-DCE	2070
Συντελεστής απομείωσης της συγκέντρωσης της πηγής- $k_s$ ( $y^{-1}$ )	0,061

TCE= Τριχλωροαιθέριο, DCE= cis-1,2- Διχλωροαιθέριο, VC= Βινυλοχλωρίδιο

\*Οι συντελεστές υπολογίστηκαν με επαναληπτική διαδικασία

Επομένως, οι συντελεστές βιομετασχηματισμού που προέκυψαν από αυτή τη διαδικασία περιέχουν μεγάλη αβεβαιότητα και θα συγκριθούν με τους αντίστοιχους συντελεστές βιομετασχηματισμού των Weaver *et al.* (1996) στον Πίνακα 5.3. Οι συντελεστές βιομετασχηματισμού του Πίνακα 5.5 προσδιορίστηκαν με διαδοχικές δοκιμές ώστε να προσαρμόζονται, κατά το δυνατόν, οι προβλεπόμενες συγκεντρώσεις στις μετρήσεις πεδίου, ταυτόχρονα και στις τρεις χρονικές στιγμές:

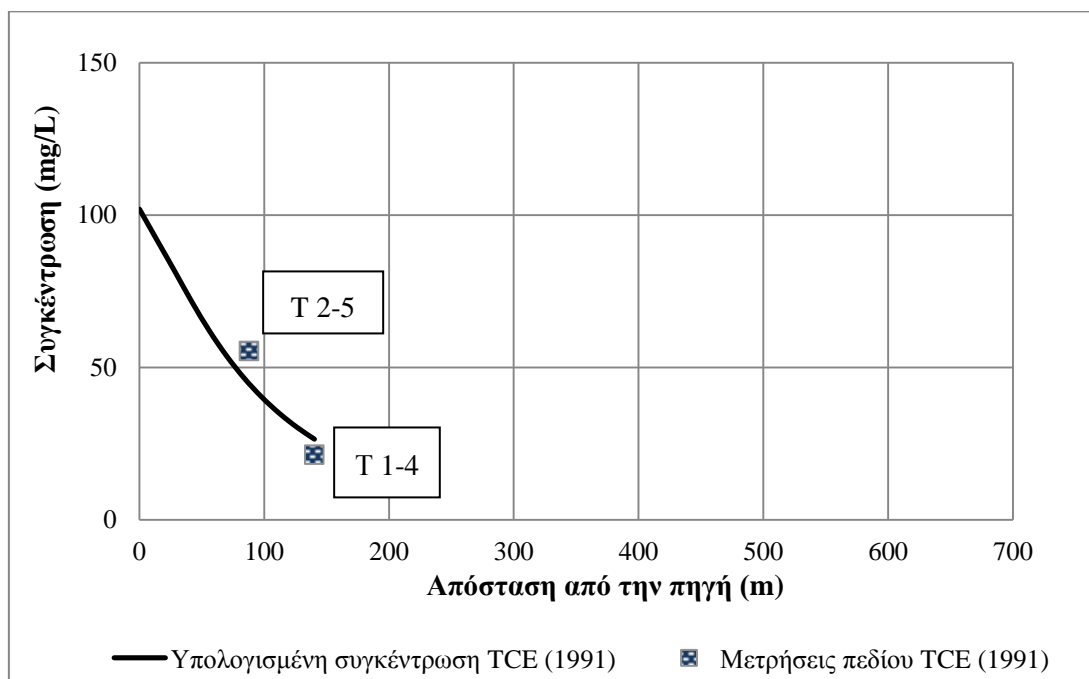
- 1) για χρόνο προσομοίωσης 39 έτη (1952-1991) και μήκος περιοχής υπό προσομοίωση 140 m (απόσταση μεταξύ των θέσεων δειγματοληψίας SC-20D και T 1-4)
- 2) για χρόνο προσομοίωσης 40 έτη (1952-1992) και μήκος περιοχής υπό προσομοίωση 345 m (απόσταση μεταξύ των θέσεων δειγματοληψίας SC-20D και T 4-2) και



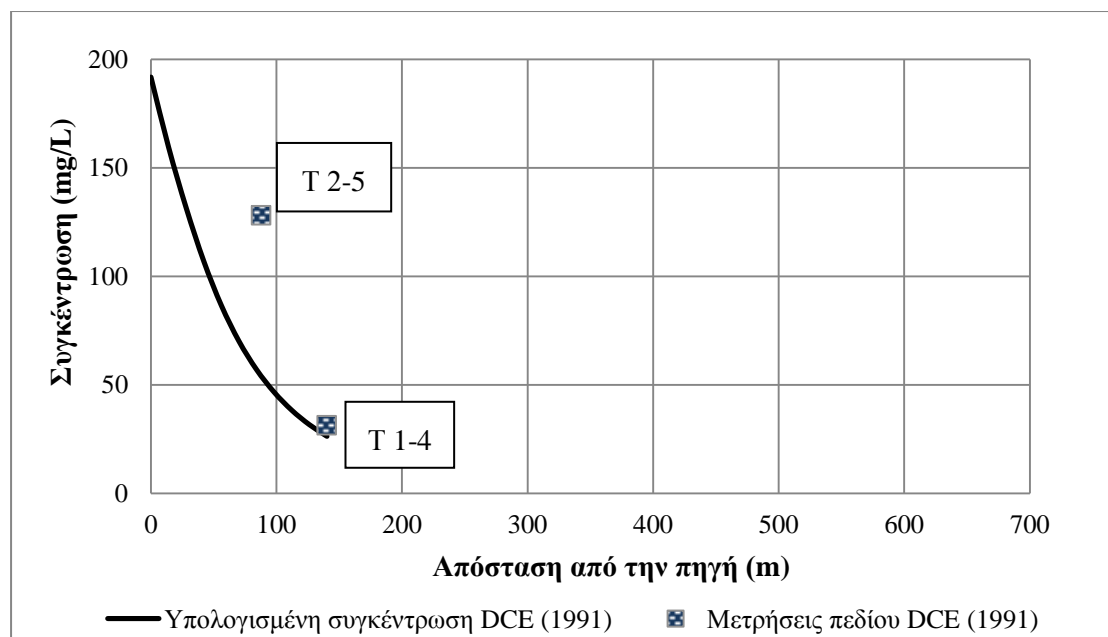
3) για χρόνο προσομοίωσης 43 έτη (1952-1995) και μήκος περιοχής υπό προσομοίωση 635 m (απόσταση μεταξύ των θέσεων δειγματοληψίας SC-20D και 55-AF)

Οι τιμές που υπολογίστηκαν μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας είναι οι ακόλουθες:  $\lambda_{TCE}=0,77 \text{ y}^{-1}$ ,  $\lambda_{cis-DCE}=1,7 \text{ y}^{-1}$  και  $\lambda_{VC}=5,5 \text{ y}^{-1}$ . Συγκρίνοντας με τις αντίστοιχες τιμές των Weaver *et al.* (1996) που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3, παρατηρούμε ότι οι τιμές που εκτιμήθηκαν με το BIOCHLOR για το TCE είναι εντός του εύρους των τιμών που υπολογίστηκαν από τους Weaver *et al.* (1996), ενώ για τις ενώσεις cis-DCE και VC είναι μεγαλύτεροι, αλλά της ίδιας τάξης μεγέθους.

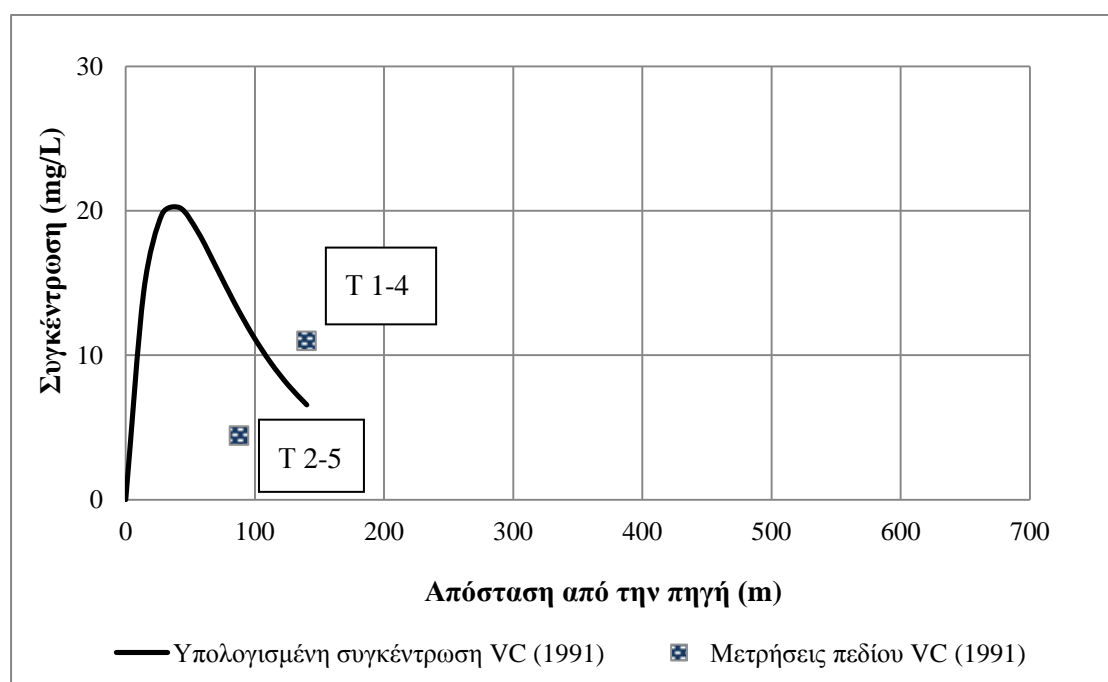
Στα Σχήματα 5.4 έως 5.6 παρουσιάζονται οι υπολογισμένες κατανομές των συγκεντρώσεων των χλωροαιθενίων κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας T 2-5 και T 1-4 το 1991, με τη χρήση των παραπάνω συντελεστών βιομετασχηματισμού.



Σχήμα 5.4 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας T 2-5 και T 1-4 για το έτος 1991

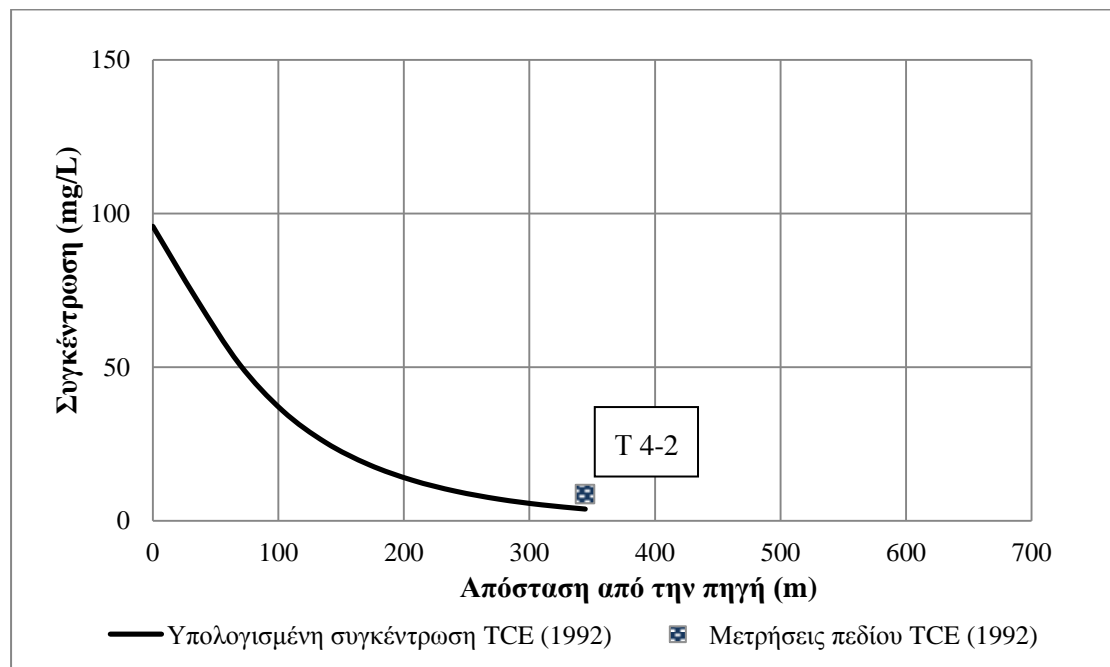


Σχήμα 5.5 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του *cis*-1,2- διχλωροαιθενίου (*cis*-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας T 2-5 και T 1-4 για το έτος 1991

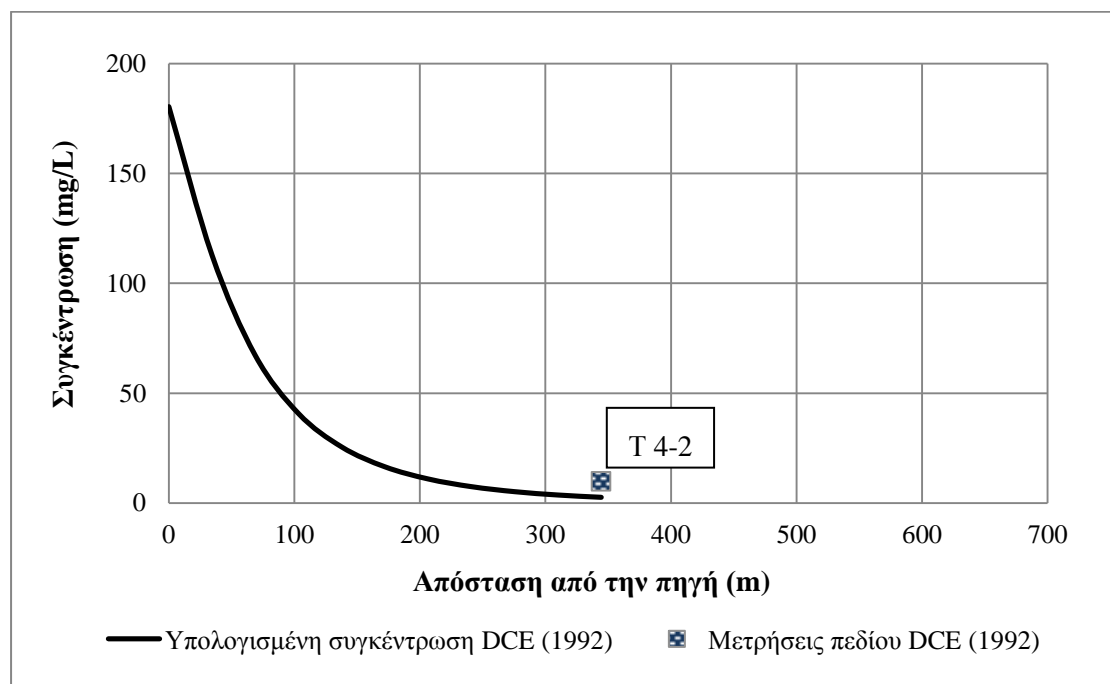


Σχήμα 5.6 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας T 2-5 και T 1-4 για το έτος 1991

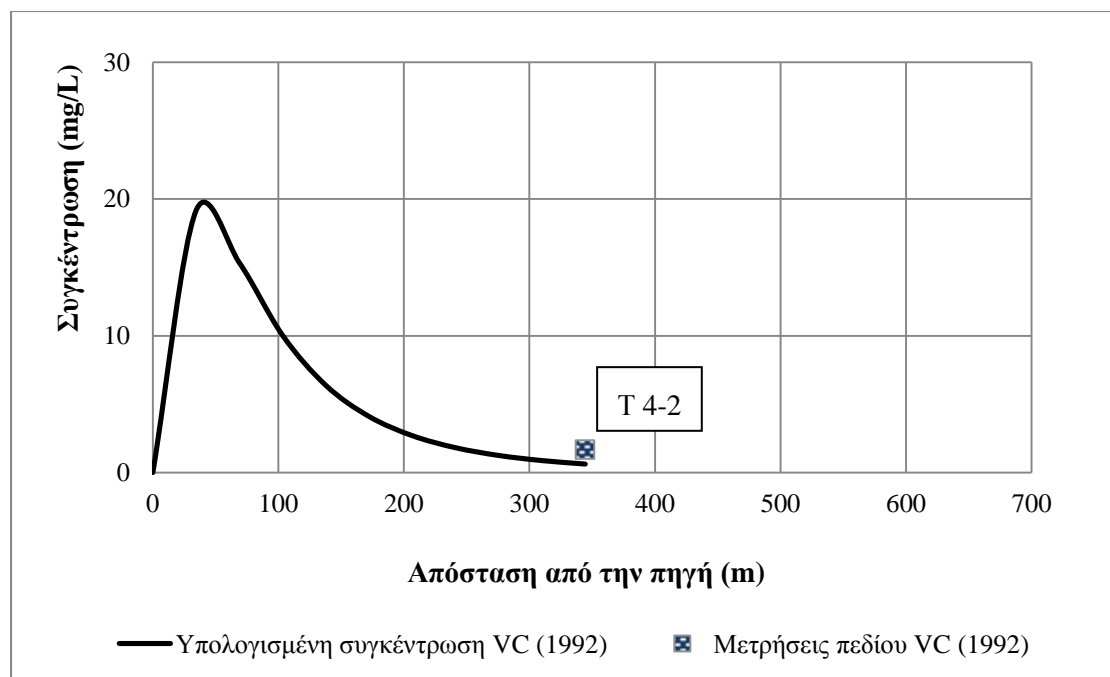
Στα Σχήματα 5.7 έως 5.9 παρουσιάζονται οι υπολογισμένες κατανομές των συγκεντρώσεων των χλωροαιθενίων κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τη μέτρηση πεδίου στο φρέαρ παρακολούθησης T 4-2 το 1992, με τη χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν παραπάνω.



Σχήμα 5.7 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στη θέση δειγματοληψίας T 4-2 για το έτος 1992

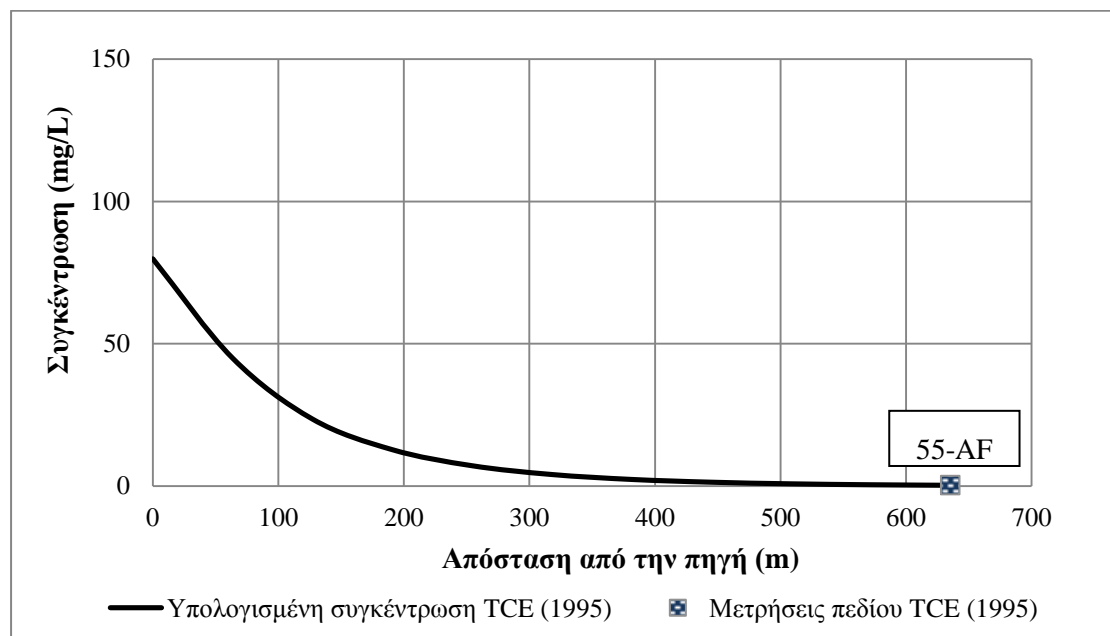


Σχήμα 5.8 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στη θέση δειγματοληψίας T 4-2 για το έτος 1992

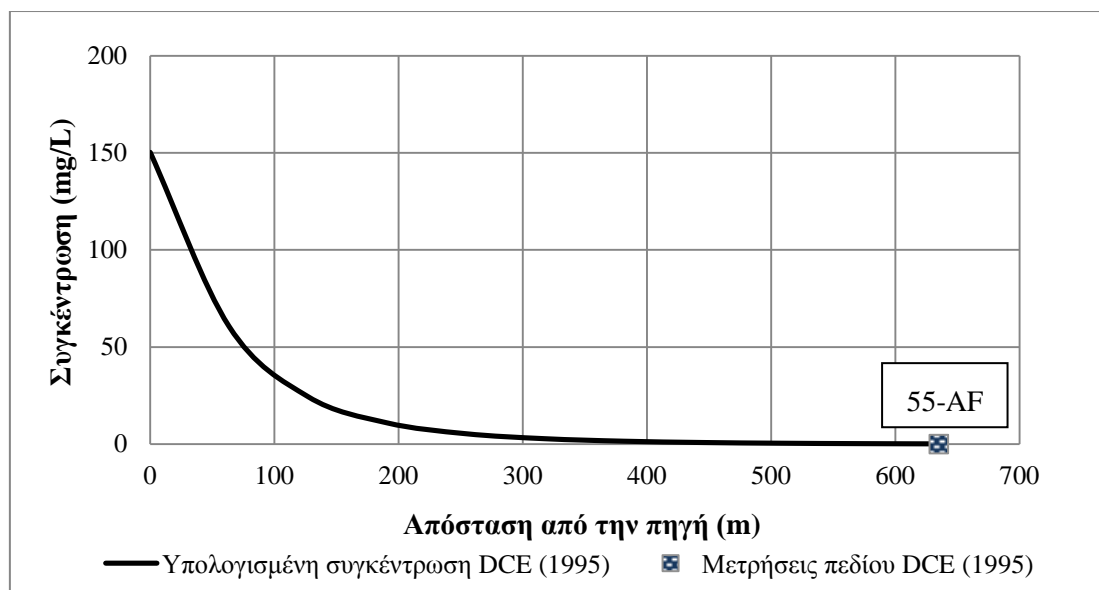


Σχήμα 5.9 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στη θέση δειγματοληψίας T 4-2 για το έτος 1992

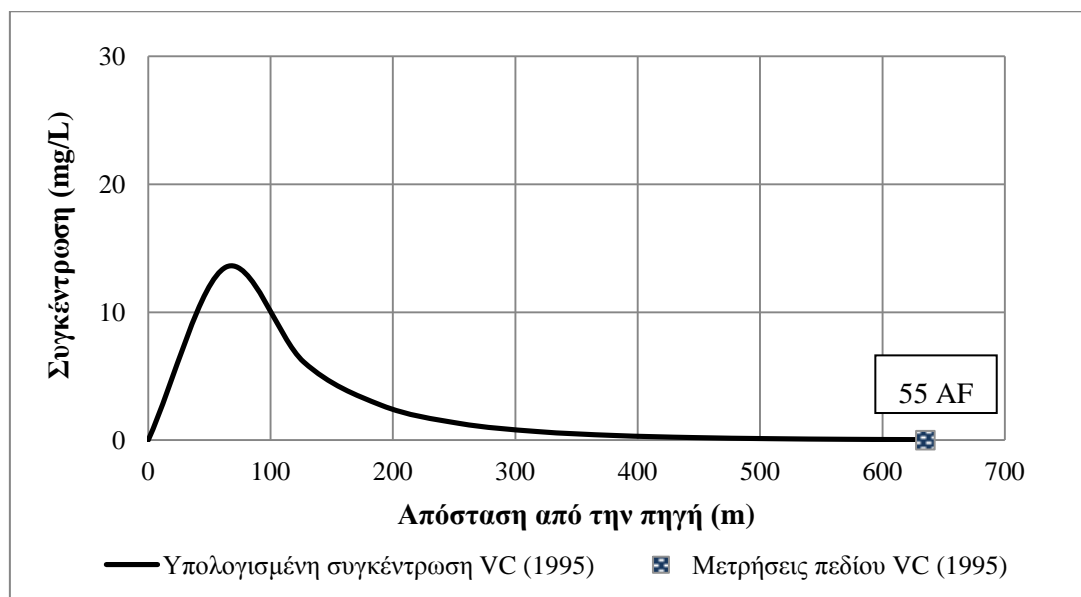
Στα Σχήματα 5.10 έως 5.12 παρουσιάζονται οι προβλεπόμενες κατανομές των συγκεντρώσεων των χλωροαιθενίων κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τη μέτρηση πεδίου στη θέση δειγματοληψίας 55-AF το 1995, με τη χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν παραπάνω.



Σχήμα 5.10 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στη θέση δειγματοληψίας 55-AF για το έτος 1995



Σχήμα 5.11 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του *cis*-1,2-διχλωροαιθενίου (*cis*-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στη θέση δειγματοληψίας 55-AF για το έτος 1995

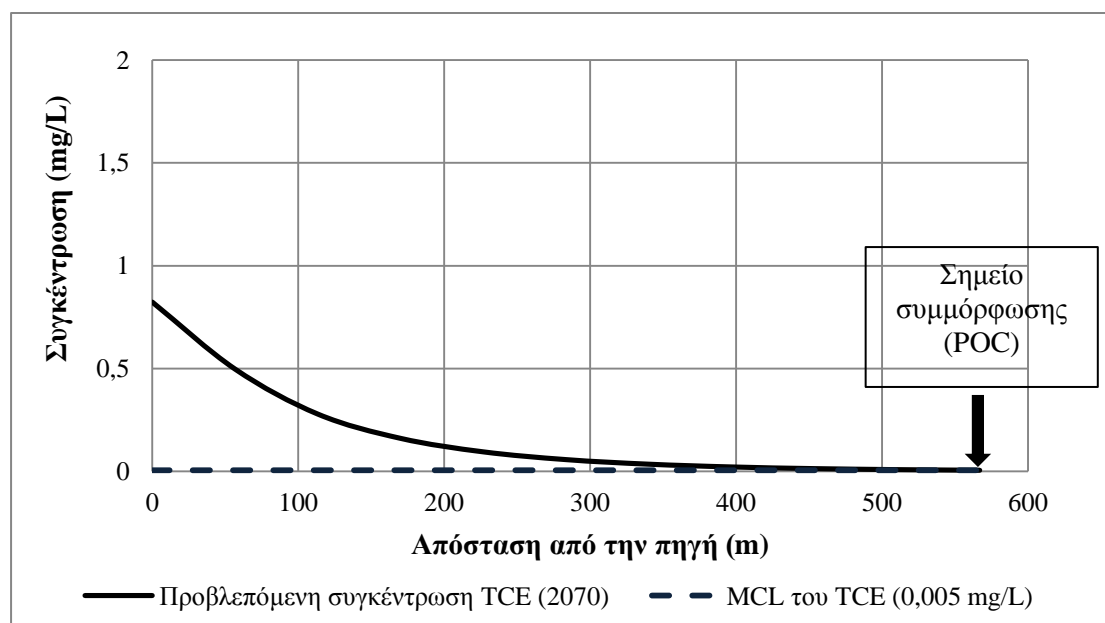


Σχήμα 5.12 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στη θέση δειγματοληψίας 55-AF για το έτος 1995

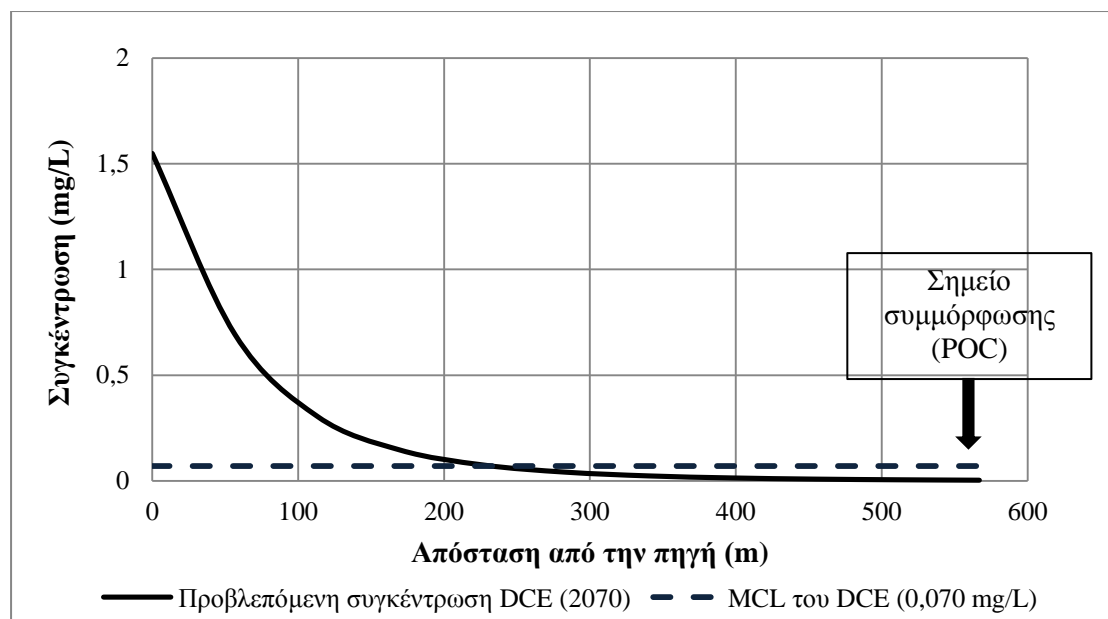
**Υπολογισμός του προβλεπόμενου χρόνου αποκατάστασης.** Στη συνέχεια, υπολογίστηκε με το λογισμικό BIOCHLOR το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να μειωθούν οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθενίων στο σημείο συμμόρφωσης POCW-3 κάτω από τις μέγιστες επιτρεπτές στο πόσιμο νερό (TCE: 0,005 mg/L, *cis*-DCE: 0,070 mg/L και VC: 0,002 mg/L). Τα υδρογεωλογικά δεδομένα, τα δεδομένα για τη διασπορά, τη ρόφιση, τον βιομετασχηματισμό και την πηγή είναι ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στις προηγούμενες προσομοιώσεις (Πίνακας 5.5). Το μήκος της περιοχής υπό προσομοίωση έλαβε τιμή ίση με την απόσταση της θέσης δειγματοληψίας SC-20D (πηγή) και του φρέατος

παρακολούθησης POCW-3 (σημείο συμμόρφωσης), δηλαδή 567 m. Το πλάτος της περιοχής υπό προσομοίωση παρέμεινε αμετάβλητο. Ο χρόνος προσομοίωσης (διάρκεια της ρύπανσης) αυξήθηκε σταδιακά μέχρις ότου οι προβλεπόμενες συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθενίων σε απόσταση 567 m από την πηγή μειωθούν κάτω από το αντίστοιχο επιτρεπόμενο όριο στο πόσιμο νερό. Με αυτόν τον τρόπο προέκυψε ότι ο ρύπος που θα παραμείνει για περισσότερα χρόνια στο υπόγειο νερό σε συγκέντρωση μεγαλύτερη από τη μέγιστη επιτρεπτή είναι το TCE. Οι στόχοι αποκατάστασης θα επιτευχθούν μέσω της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης 118 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής, δηλαδή το έτος 2070. Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται σε συμφωνία με το πρακτικό απόφασης της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. του 1997, σύμφωνα με το οποίο οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθενίων σε όλα τα σημεία του υδροφορέα προβλέπεται να μειωθούν στα επίπεδα των μέγιστων επιτρεπτών συγκεντρώσεων στο πόσιμο νερό σε 150 έως 250 χρόνια. Έτσι, η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση αναμένεται να είναι αποτελεσματική μέθοδος αποκατάστασης, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με την τροποποίηση του πρακτικού απόφασης το 2009 (Ενότητα 5.1.5).

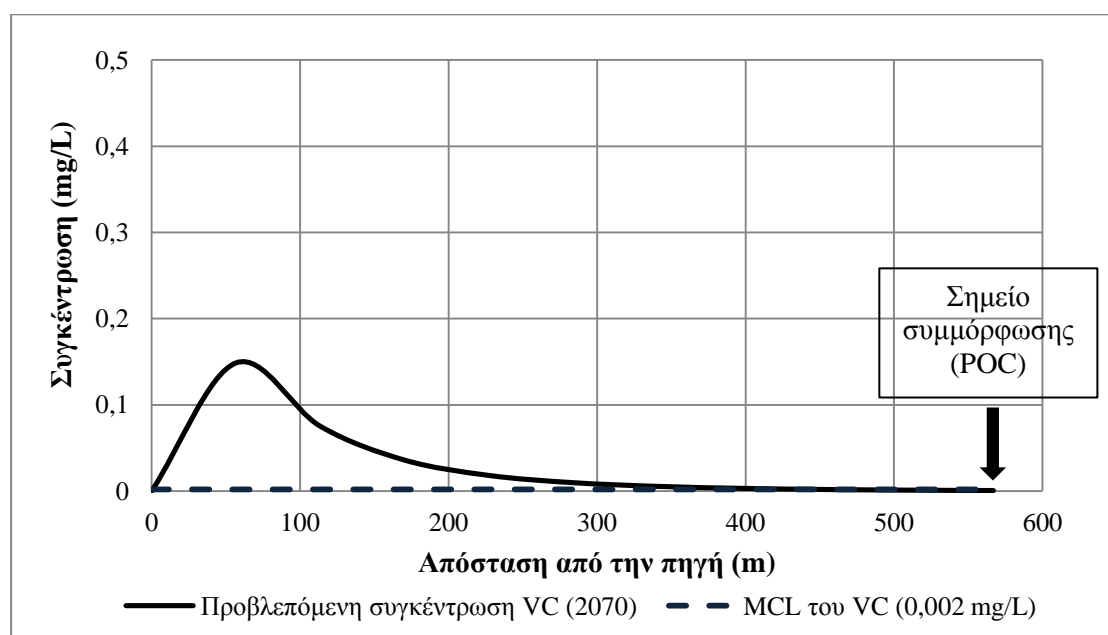
Όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.13 έως 5.15, 118 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής (2070), οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθενίων στο σημείο συμμόρφωσης είναι μικρότερες ή ίσες των αντίστοιχων μέγιστων επιτρεπτών συγκεντρώσεων στο πόσιμο νερό.



Σχήμα 5.13 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, 118 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής



Σχήμα 5.14 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του *cis*-1,2-διχλωροαιθενίου (*cis*-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, 118 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής



Σχήμα 5.15 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, 118 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής

#### 5.1.6.2 Σενάριο Β: Πηγή σταθερής έντασης

**Εκτίμηση συντελεστών βιομετασχηματισμού των χλωροαιθενίων.** Αρχικά, έγινε μια προσπάθεια εκτίμησης των συντελεστών βιομετασχηματισμού των TCE, *cis*-DCE και VC, μέσω της προσαρμογής των προβλεπόμενων συγκεντρώσεων κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης στις μετρήσεις πεδίου των ετών 1991, 1992 και 1995

ακολουθώντας τα ίδια βήματα που περιγράφηκαν για το σενάριο Α. Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6 Δεδομένα εισόδου του BIOCHLOR για την εκτίμηση των συντελεστών βιομετασχηματισμού για το Σενάριο Β

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ
Υδραυλική αγωγιμότητα- K (m/y)	2737,3
(Υδραυλική αγωγιμότητα- K (m/s))	$8,68 \times 10^{-5}$
Υδραυλική κλίση- i	0,0095
Πορώδες- n	0,3
Συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_x$ (m)	10,73
Λόγος συντελεστών οριζόντιας εγκάρσιας/διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_y/\alpha_x$	0,1
Λόγος συντελεστών κατακόρυφης εγκάρσιας/διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_z/\alpha_x$	0,001
Ξηρή πυκνότητα εδάφους- $\rho_d$ (kg/L)	1,86
Κλάσμα οργανικού άνθρακα- $f_{oc}$	0,0005
Μέσος συντελεστής υστέρησης των χλωροαιθινίων- R	1,225
Συντελεστές βιομετασχηματισμού- $\lambda$ ( $y^{-1}$ )*	
TCE $\rightarrow$ DCE	0,62
DCE $\rightarrow$ VC	1,3
VC $\rightarrow$ αιθέριο	4,2
Χρόνος προσομοίωσης- t (y)	39, 40, 43
Μήκος περιοχής υπό προσομοίωση (m)	140, 345, 635 (για χρόνους προσομοίωσης 39, 40, 43 έτη αντίστοιχα)
Πλάτος περιοχής υπό προσομοίωση (m)	222
Πάχος πηγής στην κορεσμένη ζώνη- Z (m)	7,6
Πλάτος πηγής- Y (m)	38,7
Αρχικές συγκεντρώσεις στην πηγή- $C_0$ (mg/L)	
TCE	85
cis-DCE	160
VC	5
Συντελεστής απομείωσης της συγκέντρωσης της πηγής- $k_s$ ( $y^{-1}$ )	0

TCE= Τριχλωροαιθέριο, DCE= cis-1,2- Διχλωροαιθέριο, VC=Βινυλοχλωρίδιο

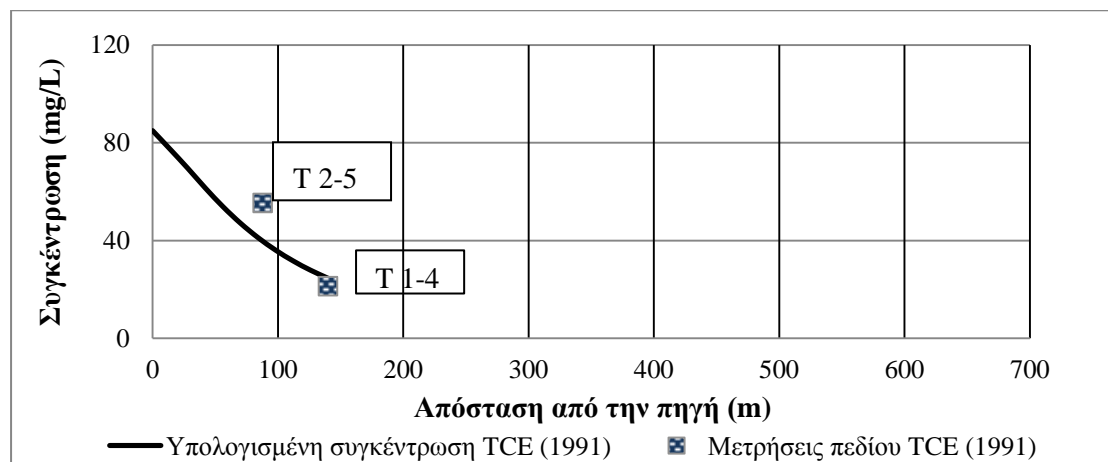
\*Οι συντελεστές υπολογίστηκαν με διαδοχικές δοκιμές.

Έτσι, προέκυψαν οι συντελεστές βιομετασχηματισμού:  $\lambda_{TCE}=0,62 y^{-1}$ ,  $\lambda_{cis-DCE}=1,3 y^{-1}$  και  $\lambda_{VC}=4,2 y^{-1}$ . Συγκρίνοντας με τις αντίστοιχες τιμές των Weaver *et al.* (1996) (Πίνακας 5.3), παρατηρούμε ότι για το TCE οι τιμές που εκτιμήθηκαν με το BIOCHLOR είναι εντός του εύρους των τιμών που υπολογίστηκαν από τους Weaver *et al.* (1996), ενώ για τα cis-DCE και VC είναι μεγαλύτεροι, αλλά της ίδιας τάξης μεγέθους.

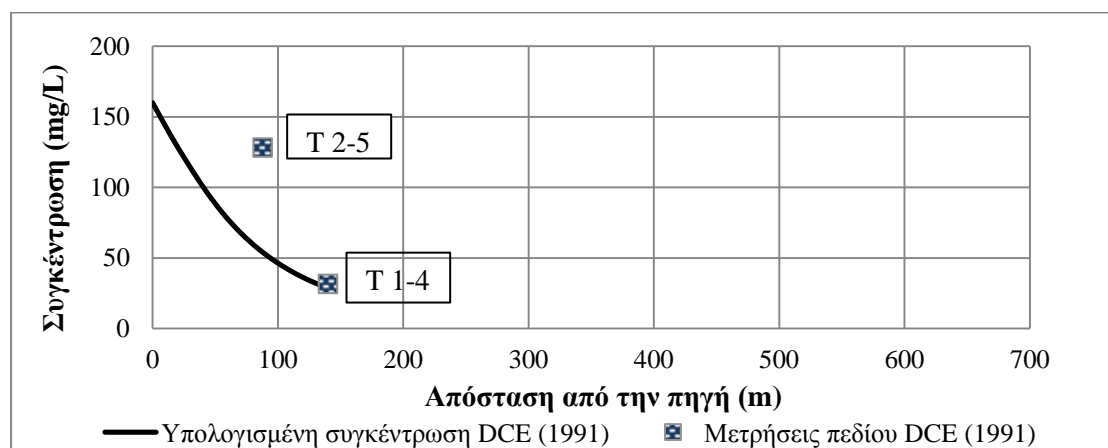
Στα Σχήματα 5.16 έως 5.18 παρουσιάζονται οι υπολογισμένες κατανομές των συγκεντρώσεων των χλωροαιθινίων κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης



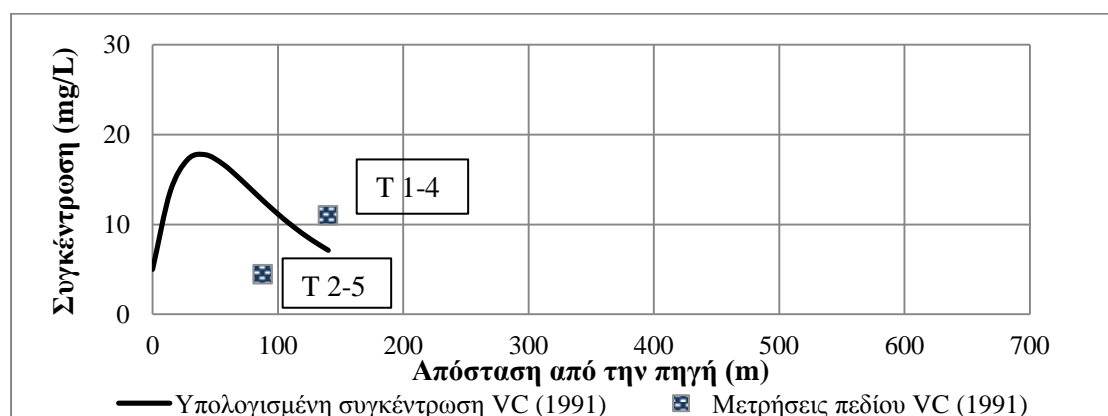
έκτασης σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας T 2-5 και T 1-4 το 1991, με τη χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν παραπάνω.



Σχήμα 5.16 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας T 2-5 και T 1-4 για το έτος 1991

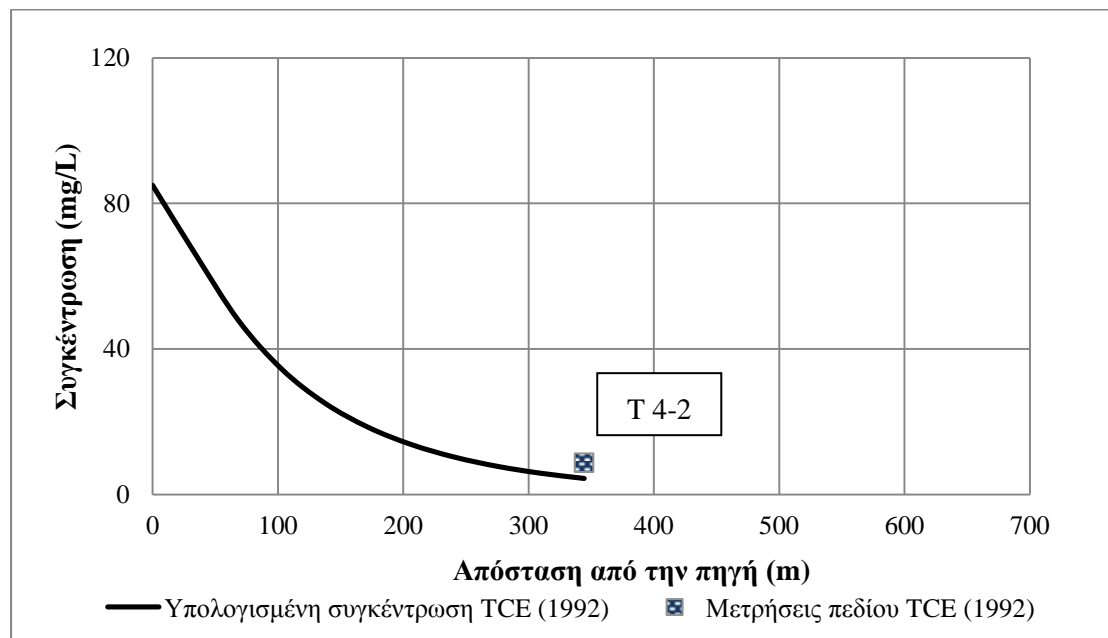


Σχήμα 5.17 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2- διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας T 2-5 και T 1-4 για το έτος 1991

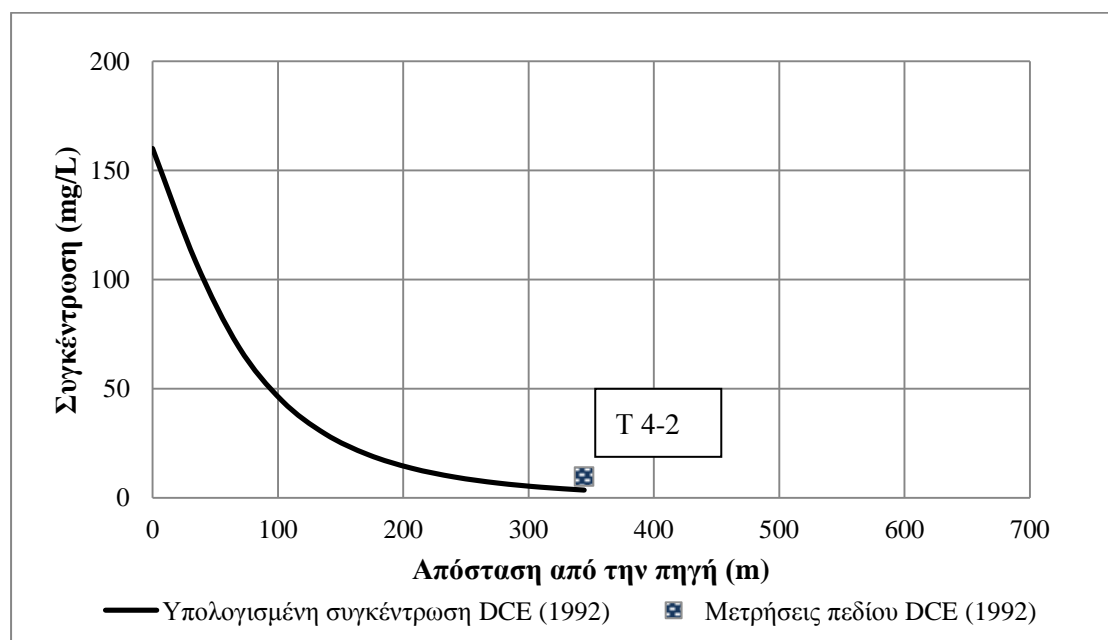


Σχήμα 5.18 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας T 2-5 και T 1-4 για το έτος 1991

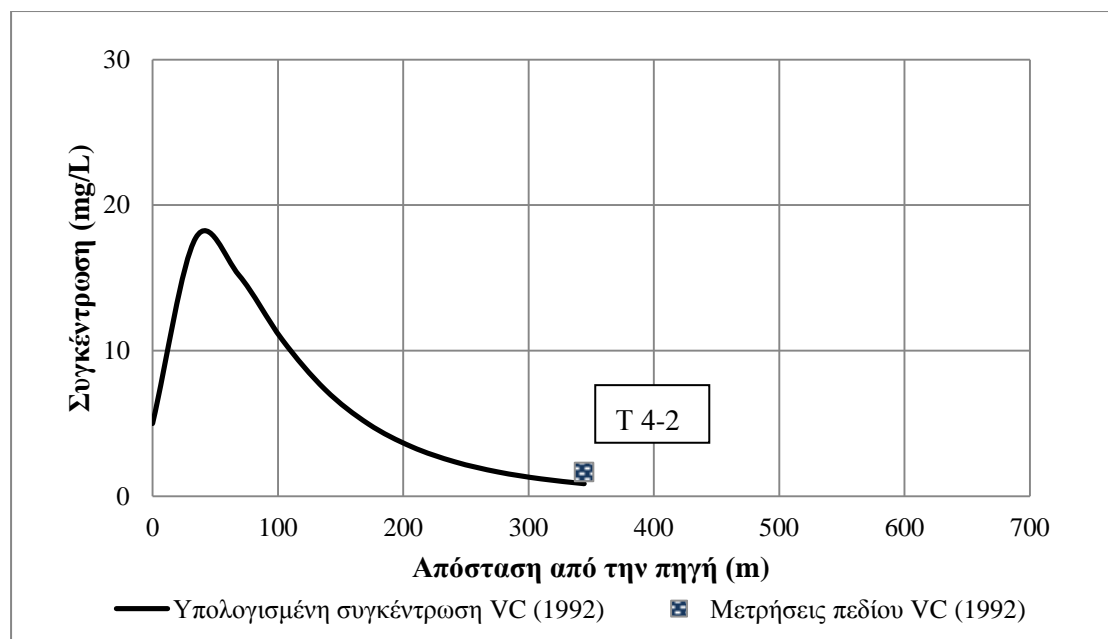
Στα Σχήματα 5.19 έως 5.21 παρουσιάζονται οι υπολογισμένες κατανομές των συγκεντρώσεων των χλωροαιθινίων κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τη μέτρηση πεδίου στη θέση δειγματοληψίας T 4-2 το 1992, με τη χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν παραπάνω.



Σχήμα 5.19 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθινίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τη μέτρηση πεδίου στη θέση δειγματοληψίας T 4-2 για το έτος 1992

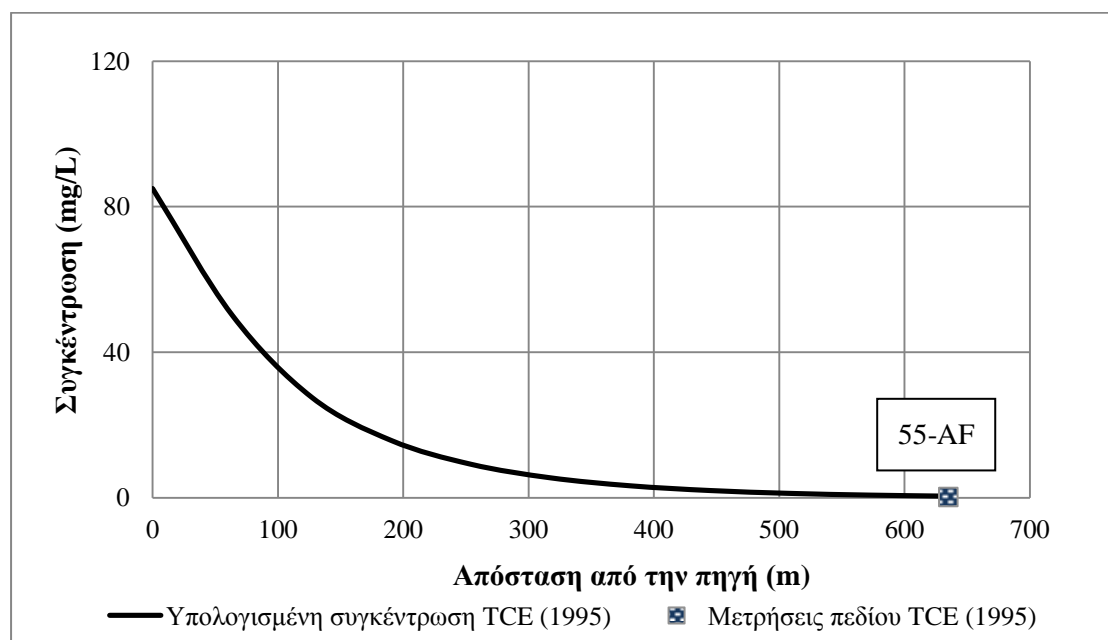


Σχήμα 5.20 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθινίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τη μέτρηση πεδίου στη θέση δειγματοληψίας T 4-2 για το έτος 1992

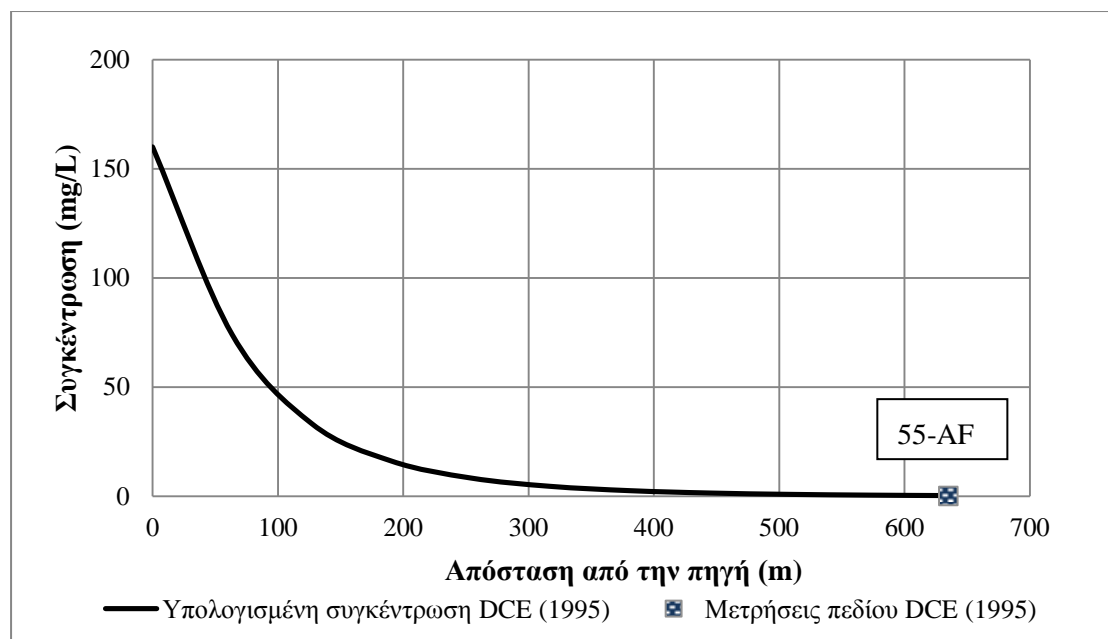


Σχήμα 5.21 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στη θέση δειγματοληψίας T 4-2 για το έτος 1992

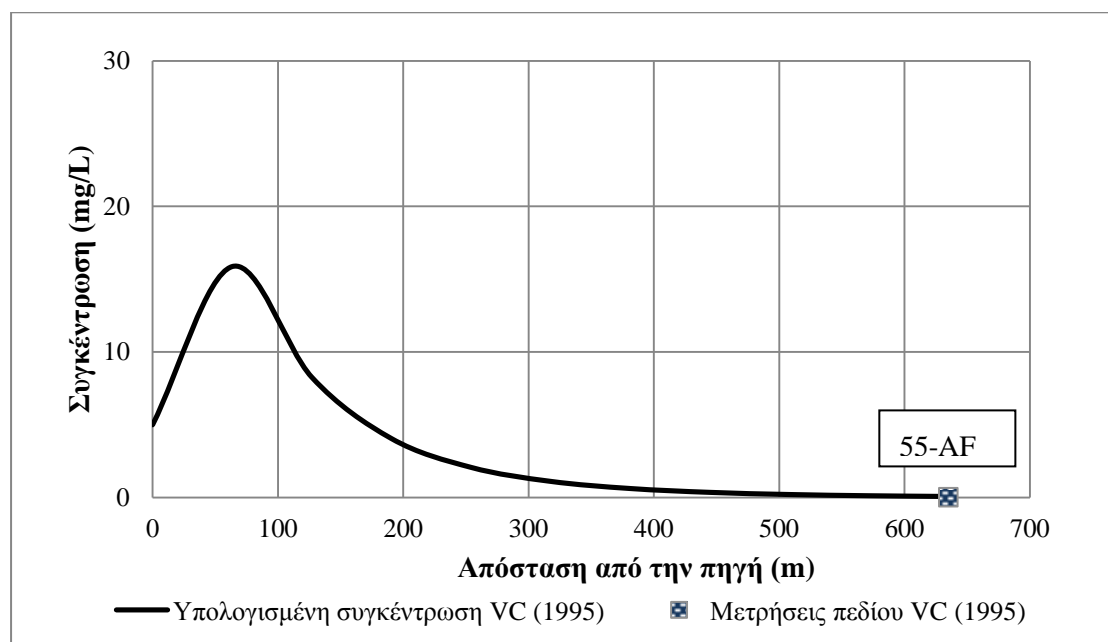
Στα Σχήματα 5.22 έως 5.24 παρουσιάζονται οι προβλεπόμενες κατανομές των συγκεντρώσεων των χλωροαιθενίων κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τη μέτρηση πεδίου στη θέση δειγματοληψίας 55-AF το 1995, με τη χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν παραπάνω.



Σχήμα 5.22 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τη μέτρηση πεδίου στη θέση δειγματοληψίας 55-AF για το έτος 1995



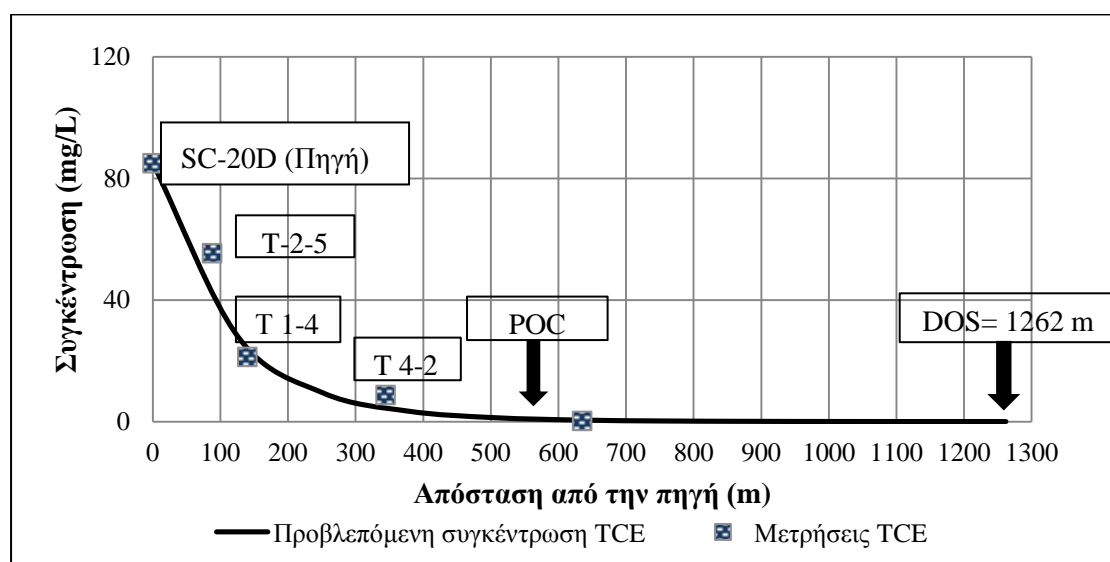
Σχήμα 5.23 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του *cis*-1,2-διχλωροαιθενίου (*cis*-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τη μέτρηση πεδίου στη θέση δειγματοληψίας 55-AF για το έτος 1995



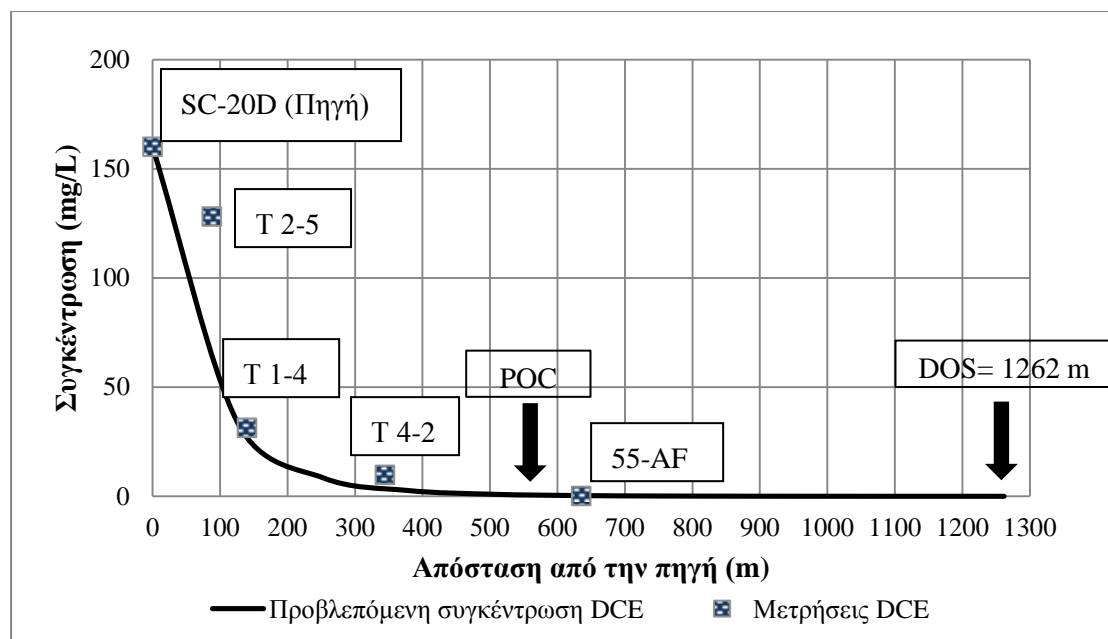
Σχήμα 5.24 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τη μέτρηση πεδίου στη θέση δειγματοληψίας 55-AF για το έτος 1995

**Υπολογισμός του χρόνου (TOS) και της απόστασης σταθεροποίησης (DOS) της ρυπασμένης έκτασης.** Τα υδρογεωλογικά δεδομένα, τα δεδομένα για τη διασπορά, τη ρόφηση, τον βιομετασχηματισμό και την πηγή είναι ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στις προηγούμενες προσομοιώσεις (Πίνακας 5.6). Το μήκος της περιοχής υπό προσομοίωση τέθηκε αρκετά μεγάλο ώστε να καλύπτει όλη τη ρυπασμένη έκταση. Το πλάτος του μοντέλου παρέμεινε αμετάβλητο. Κρατώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους εισόδου αυξάνεται

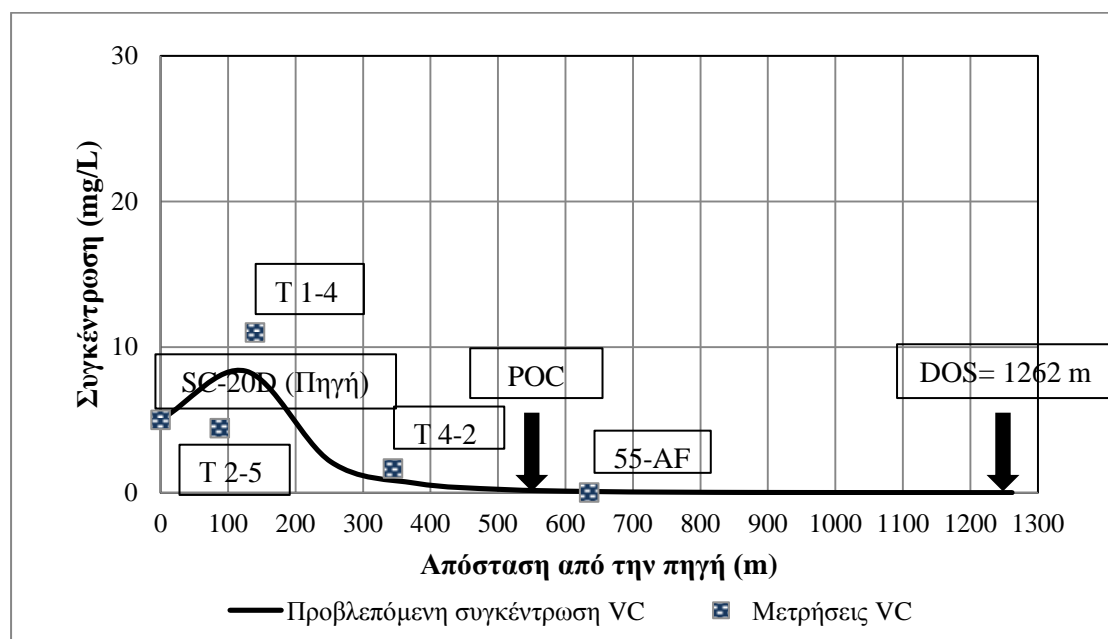
σταδιακά ο χρόνος προσομοίωσης από το μηδέν μέχρι να παρατηρηθεί ότι το TCE παύει να εξαπλώνεται κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε συγκέντρωση μεγαλύτερη από τη μέγιστη επιτρεπτή. Τότε θεωρείται ότι η ρυπασμένη με TCE έκταση έχει φτάσει σε συνθήκες μόνιμης μεταφοράς. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται διαδοχικά για τα cis-DCE και VC. Με αυτόν τον τρόπο, προέκυψε ότι ο χρόνος σταθεροποίησης της ρυπασμένης έκτασης είναι TOS= 25 χρόνια, δηλαδή η ρύπανση έχει σταθεροποιηθεί από το 1977. Στη συνέχεια, μεταβλήθηκε σταδιακά το μήκος της περιοχής υπό προσομοίωση, μέχρις ότου οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθενίων στο πλέον κατάντη σημείο του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης γίνουν μικρότερες ή ίσες με τα μέγιστα επιτρεπτά όρια στο πόσιμο νερό (TCE: 0,005 mg/L, cis-DCE: 0,070 mg/L και VC:0,002 mg/L). Έτσι, προέκυψε ότι το TCE έχει εξαπλωθεί περισσότερο σε συγκέντρωση μεγαλύτερη από τη μέγιστη επιτρεπτή. Η απόσταση σταθεροποίησης της ρυπασμένης με TCE έκτασης υπολογίστηκε ίση με DOS= 1262 m, που είναι διπλάσια της απόστασης μεταξύ της πηγής και του σημείου συμμόρφωσης POCW-3. Άρα, σε αντίθεση με το σενάριο πηγής μειούμενης έντασης, προκύπτει ότι απαιτείται η εφαρμογή επεμβατικών μεθόδων για την αποκατάσταση του ρυπασμένου χώρου Bendix. Αυτό το αποτέλεσμα είναι σύμφωνο με τα τωρινά δεδομένα, αφού από το 2009 εφαρμόζεται στην περιοχή της πηγής η μέθοδος άντλησης και επεξεργασίας, όπως προαναφέρθηκε στην Ενότητα 5.1.5. Στα Σχήματα 5.25 έως 5.27 παρουσιάζονται οι προβλεπόμενες κατανομές των συγκεντρώσεων των χλωροαιθενίων κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης (Πίνακας 4.6) μετά το 1977, οπότε σταθεροποιείται η ρύπανση.



Σχήμα 5.25 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας SC-20D, T 2-5, T 1-4, T 4-2 και 55-AF μετά το 1977, οπότε σταθεροποιήθηκε η ρύπανση



Σχήμα 5.26 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του *cis*-1,2-διχλωροαιθενίου (*cis*-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας SC-20D, T 2-5, T 1-4, T 4-2 και 55-AF μετά το 1977, οπότε σταθεροποιήθηκε η ρύπανση



Σχήμα 5.27 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στις θέσεις δειγματοληψίας SC-20D, T 2-5, T 1-4, T 4-2 και 55-AF μετά το 1977, οπότε σταθεροποιήθηκε η ρύπανση

#### 5.1.7 Σύνοψη-Συμπεράσματα

Στην Ενότητα 5.1 εξετάστηκε η αποκατάσταση ενός γνωστού χώρου που ανήκει στο πρόγραμμα Superfund, του βιομηχανικού χώρου Bendix Corp./ Allied Automotive στην Πολιτεία Μίσιγκαν, με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση. Το υπόγειο νερό της υπό

μελέτη περιοχής έχει ρυπανθεί με χλωροαιθένια και εκβάλλει στη λίμνη Μίσιγκαν. Αρχικά, συλλέχθηκαν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την κατάστρωση του προβλήματος και την επιλογή των παραμέτρων εισόδου στο λογισμικό BIOCHLOR. Στην περίπτωση που αυτές δεν ήταν διαθέσιμες έγιναν υποθέσεις βάσει βιβλιογραφικών αναφορών. Για τις συγκεντρώσεις στην πηγή υπάρχουν μετρήσεις μόνο από μία δειγματοληψία του 1994. Έτσι, εξετάστηκαν δύο διαφορετικά σενάρια για τη συγκέντρωση στην πηγή: (1) ότι φθίνει με το χρόνο σύμφωνα με έναν συντελεστή απομείωσης 1<sup>ης</sup> τάξης  $k_s=0,061 \text{ y}^{-1}$  και (2) ότι παραμένει σταθερή με το χρόνο. Για κάθε σενάριο εκτιμήθηκαν οι συντελεστές βιομετασχηματισμού των χλωροαιθινίων με το BIOCHLOR, μέσω της προσαρμογής των υπολογισμένων συγκεντρώσεων στις μετρήσεις πεδίου των ετών 1991, 1992 και 1995. Οι τιμές που υπολογίστηκαν για το σενάριο πηγής μειούμενης έντασης είναι:  $\lambda_{\text{TCE}}=0,77 \text{ y}^{-1}$ ,  $\lambda_{\text{cis-DCE}}=1,7 \text{ y}^{-1}$  και  $\lambda_{\text{VC}}=5,5 \text{ y}^{-1}$  (δηλαδή χρόνοι ημιζωής: 328,6 ημέρες, 148,8 ημέρες και 46 ημέρες για τις ενώσεις TCE, cis-DCE και VC αντίστοιχα). Οι τιμές που υπολογίστηκαν για το σενάριο πηγής σταθερής έντασης είναι:  $\lambda_{\text{TCE}}=0,62 \text{ y}^{-1}$ ,  $\lambda_{\text{cis-DCE}}=1,3 \text{ y}^{-1}$  και  $\lambda_{\text{VC}}=4,2 \text{ y}^{-1}$  (δηλαδή χρόνοι ημιζωής: 1,12 έτη, 194,6 ημέρες και 60,2 ημέρες για τις ενώσεις TCE, cis-DCE και VC αντίστοιχα). Ωστόσο, οι εκτιμήσεις αυτές εμπεριέχουν μεγάλη αβεβαιότητα, αφού δεν διατίθενται μετρήσεις από πολλά φρέατα παρακολούθησης, σε διαστήματα τέτοια που να καλύπτουν όλη την απόσταση από τα ανάντη μέχρι τα κατόντη της ρυπασμένης έκτασης, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της, την ίδια χρονική στιγμή. Στην περίπτωση της πηγής μειούμενης έντασης, υπολογίστηκε ότι οι προβλεπόμενος χρόνος αποκατάστασης, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθούν οι συγκεντρώσεις των TCE, cis-DCE και VC κάτω από τις μέγιστες επιτρεπτές στο πόσιμο νερό στο σημείο συμμόρφωσης, 567 m κατόντη της πηγής είναι 118 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής (έτος 2070). Αυτή η τιμή είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτή που προβλέπεται από το ίδιο το πρακτικό απόφασης (150 έως 250 χρόνια) για την επίτευξη των μέγιστων επιτρεπτών συγκεντρώσεων των ενώσεων TCE, cis-DCE και VC στο πόσιμο νερό σε όλο τον υδροφόρο. Με τα δεδομένα αυτά, προκύπτει ότι η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση αναμένεται να είναι αποτελεσματική μέθοδος αποκατάστασης. Από το σενάριο πηγής σταθερής έντασης υπολογίστηκε ότι η ρύπανση έχει σταθεροποιηθεί από το 1977 και θα έφτανε σε απόσταση 1262 m κατόντη της πηγής- αν δεν υπήρχε η λίμνη- σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από τις συγκεντρώσεις συμμόρφωσης σε διπλάσια απόσταση από την απόσταση του σημείου συμμόρφωσης από την πηγή (567 m). Επομένως, σε αντίθεση με το σενάριο πηγής μειούμενης έντασης, αναμένεται ότι η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση δεν είναι αποτελεσματική μέθοδος αποκατάστασης. Συμπερασματικά, από τα δύο σενάρια που εξετάστηκαν για την πηγή, αυτό της πηγής σταθερής έντασης οδηγεί σε προβλέψεις συμβατές με την τροποποίηση του πρακτικού απόφασης το 2009, με την προσθήκη συστήματος άντλησης και επεξεργασίας στην περιοχή της πηγής (Ενότητα 5.1.5).

## 5.2 Περιστατικό ρύπανσης υπεδάφους με χλωροαιθένια: Πρώην αεροπορική βάση England στη Λουιζιάνα (Site SS-45)

Οι γενικές πληροφορίες των Ενοτήτων 5.2.1, 5.2.2 και 5.2.3 προέρχονται από τις μελέτες Parsons ES (2009) και Lu *et al.* (2006a).

### 5.2.1 Ο χώρος

**Κατηγορία χώρου.** Η πρώην αεροπορική βάση England, βρίσκεται 8 km δυτικά των πόλεων Alexandria και Pineville, στην Πολιτεία Λουιζιάνα. Βόρεια του ρυπασμένου χώρου ρέει ο ποταμός Red River και νότια του χώρου υπάρχει ένας βάλτος (Bayou Rapides) (Σχήμα 5.28). Η εγκατάσταση έκλεισε τον Δεκέμβριο του 1992. Σήμερα, αποτελεί το Διεθνές Αεροδρόμιο της Αλεξάνδρειας. Ο χώρος περιλαμβάνει 37 υποενοότητες διαχείρισης της ρύπανσης (OUs). Σε αυτήν την ενότητα θα ασχοληθούμε με την OU 07, η οποία αναφέρεται στη βιβλιογραφία με την ονομασία SS-45 (Site Spill 45) ή AOC 39 (Area of Concern 39).



Σχήμα 5.28 Φωτογραφία του νυν Διεθνούς Αεροδρομίου της Αλεξάνδρειας, Λουιζιάνα (πρώην Αεροπορική Βάση England) (από δορυφόρο, Bing maps, 2014 - τροποποιημένη)

### 5.2.2 Αίτια ρύπανσης και τύπος ρύπου

**Ρυπογόνος δραστηριότητα.** Οι χλωριωμένοι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες έχουν ανιχνευθεί στο υπέδαφος στην υποενοότητα διαχείρισης της ρύπανσης SS-45 κοντά σε πρώην εγκαταστάσεις συντήρησης αεροσκαφών, διαχωριστές ελαίων/ νερού και αποχετευτικούς αγωγούς.



**Κύριοι ρύποι.** Ο κύριοι ρύποι ενδιαφέροντος στην υποενότητα διαχείρισης της ρύπανσης SS-45 είναι το τριχλωροαιθυλένιο (TCE), το *cis*-1,2-διχλωροαιθυλένιο (*cis*-1,2-DCE) και το βινυλοχλωρίδιο (VC).

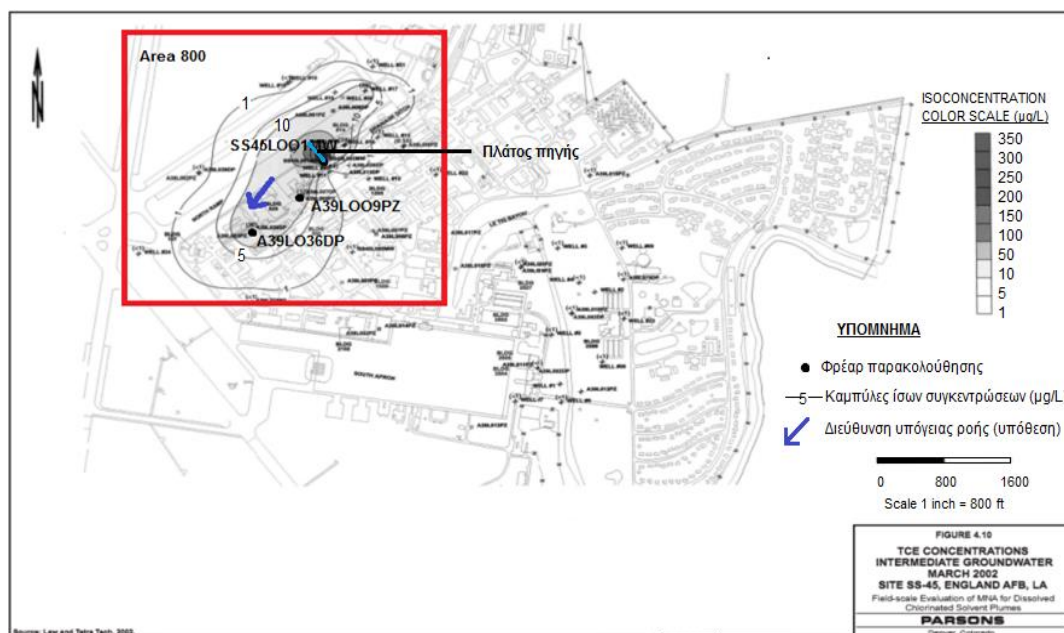
### 5.2.3 Χαρακτηριστικά υπεδάφους

**Στρωματογραφία – Υδραυλική αγωγιμότητα.** Ο υδροφορέας στην υποενότητα διαχείρισης της ρύπανσης SS-45 διακρίνεται σε τρεις ζώνες: ρηχή (ιλύς/ άργιλος), ενδιάμεση (άμμος) και βαθιά (άμμος). Στην ενδιάμεση ζώνη έχει μετρηθεί υδραυλική αγωγιμότητα  $K$  που ποικίλλει από  $5,64 \times 10^{-7}$  έως  $1,23 \times 10^{-4}$  m/s, με γεωμετρικό μέσο  $K=1,31 \times 10^{-5}$  m/s.

**Υδροφόρος ορίζοντας – Υδραυλική κλίση.** Η κατεύθυνση της ροής του υπόγειου νερού στον χώρο SS-45 δεν είναι σταθερή. Ο χώρος βρίσκεται στην πλημμυρική κοίτη του ποταμού Red River και η διεύθυνση της ροής του υπόγειου νερού μεταβάλλεται πολύ με τις εποχές. Οι υδραυλικές κλίσεις που μετρήθηκαν ήταν σημαντικές σε όλες τις θέσεις (μέχρι και  $i=0,001$ ). Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (Σ.Υ.Ο.) δεν αναφέρεται στη διαθέσιμη βιβλιογραφία. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης θεωρήθηκε ότι η Σ.Υ.Ο. βρίσκεται στη ρηχή ζώνη και ότι το υπόγειο νερό κινείται προς τα νοτιοδυτικά (μπλε βέλος στο Σχήμα 5.29), όπου παρατηρείται η μέγιστη εξάπλωση του TCE, με τη μέγιστη υδραυλική κλίση που έχει μετρηθεί  $i=0,001$ .

### 5.2.4 Έκταση ρύπανσης

**Κατανομή ρύπων.** Η σημερινή κατανομή της ρύπανσης είναι πιθανόν αποτέλεσμα της διαρροής χημικών από πολλαπλές και πολύ διεσπαρμένες πηγές κατά τις δεκαετίες '60 και '70. Η ρύπανση του υπογείου νερού που σχετίζεται με τον χώρο SS-45 περιορίζεται κυρίως στην ενδιάμεση αμμώδη ζώνη του υδροφορέα, που εκτείνεται σε βάθος 12,2 έως 24,4 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Ρύποι έχουν ανιχνευθεί επίσης στη ρηχή και στη βαθιά ζώνη. Στον χώρο SS-45 διακρίνονται δύο ξεχωριστές ρυπασμένες εκτάσεις με χλωροαιθένια, οι οποίες αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως βορειοδυτική ή περιοχή 800 (Area 800) και νοτιοανατολική ή περιοχή 2500 (Area 2500). Σύμφωνα με τη θεώρηση της Parsons ES (2009), η πηγή της ρυπασμένης έκτασης στην περιοχή 800 βρίσκεται κοντά στο φρέαρ παρακολούθησης SS45LOO1MW, ενώ η πηγή της ρυπασμένης έκτασης 2500 δεν μπορεί να αντιπροσωπευθεί από κάποιο φρέαρ παρακολούθησης. Έτσι, αντικείμενο της παρούσας ενότητας είναι η περιοχή 800. Το 2002, στην περιοχή 800, το TCE ήταν ο ρύπος που είχε επεκταθεί περισσότερο σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από τη μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση στο πόσιμο νερό, έως και 500 m κατάντη της εστίας της ρύπανσης (Σχήμα 5.29).



Σχήμα 5.29 Θέσεις φρεάτων παρακολούθησης και καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων του τριχλωροαιθενίου (TCE), Μάρτιος 2002, υποενοότητα διαχείρισης της ρύπανσης SS-45, πρώην αεροπορική βάση England, Αλεξάνδρεια, Λουιζιάνα (Parsons ES, 2009 – τροποποιημένο)

**Τιμές συγκεντρώσεων.** Στην περιοχή 800, στη νοτιοδυτική διεύθυνση κατά την οποία θεωρούμε ότι κινείται το υπόγειο νερό όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.29, υπάρχουν τρία φρέατα παρακολούθησης (SS45LOO1MW, A39LOO9PZ, A39LO36PZ) της ενδιάμεσης αμμώδους ζώνης, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε διαστήματα τέτοια που καλύπτουν τη ρυπασμένη έκταση από τα ανάντη προς τα κατόντη. Στη μελέτη Parsons ES (2009) διατίθενται μετρήσεις πεδίου των TCE, cis-DCE και VC, που πραγματοποιήθηκαν και στα τρία φρέατα παρακολούθησης τα έτη 1997, 2000 και 2002. Για το 1997 είναι διαθέσιμα δεδομένα από τρεις δειγματοληψίες (ανά τρίμηνο), για το 2000 δύο δειγματοληψίες και το 2002 μία δειγματοληψία. Για τα 1997 και 2000 υπολογίστηκαν οι μέσες συγκεντρώσεις από τις δειγματοληψίες ώστε να ενσωματώνονται τυχόν εποχιακές αλλαγές από τη μεταβολή της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, όπως φαίνεται στους Πίνακες 5.7 και 5.8 αντίστοιχα. Το 1997, η μέγιστη συγκέντρωση του TCE στο υπόγειο νερό ήταν 0,582 mg/L στο φρέαρ παρακολούθησης SS45LOO1MW. Η τιμή αυτή είναι ίση με το 0,05 % της διαλυτότητας του TCE: 1100 mg/L στους 25°C (LaGrega *et al.*, 1994). Άρα, σύμφωνα με τον εμπειρικό «κανόνα του 1%», το 1997 είναι πιθανόν να μην υπήρχε μη υδατική φάση (DNAPL) στην πηγή.

Πίνακας 5.7 Μέσες συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν σε φρέατα παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 1997

ΦΡΕΑΡ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΗΓΗ (m)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (mg/L)*		
		TCE	cis-DCE	VC
SS45LOO1MW	0	0,5820	0,0119	0,0004
A39LOO9PZ	168	0,0172	0,0853	0,0007
A39LO36PZ	396	0,0132	0,0028	0,0003

TCE= Τριχλωροαιθέριο, cis-DCE= cis-1,2- Διχλωροαιθέριο, VC= Βινυλοχλωρίδιο

\*Στις περιπτώσεις που η συγκέντρωση ήταν κάτω του ορίου ανίχνευσης, θεωρήθηκε ίση με το μισό του ορίου ανίχνευσης.

Πίνακας 5.8 Μέσες συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν σε φρέατα παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 2000

ΦΡΕΑΡ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΗΓΗ (m)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (mg/L)*		
		TCE	cis-DCE	VC
SS45LOO1MW	0	0,5250	0,0110	0,0009
A39LOO9PZ	168	0,0210	0,0500	0,0019
A39LO36PZ	396	0,0275	0,0043	0,0003

TCE= Τριχλωροαιθέριο, cis-DCE= cis-1,2- Διχλωροαιθέριο, VC= Βινυλοχλωρίδιο

\*Στις περιπτώσεις που η συγκέντρωση ήταν κάτω του ορίου ανίχνευσης, θεωρήθηκε ίση με το μισό του ορίου ανίχνευσης.

**Βιομετασχηματισμός των ρύπων.** Οι Downey *et al.* (2001) αναφέρουν ότι: (1) Οι γεωχημικές συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο στο συγκεκριμένο περιστατικό ευνοούν την αναγωγική αποχλωρίωση. (2) Το έδαφος έχει υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, που παρέχει δότες ηλεκτρονίων. (3) Το TCE στο υπόγειο νερό στον χώρο SS-45 αποχλωριώνεται πλήρως σε αιθέριο μέσω της αναγωγικής αποχλωρίωσης (σύμφωνα με τους McGuire *et al.*, 2004a).

#### 5.2.5 Έργα αποκατάστασης

**Στόχοι αποκατάστασης.** Οι συγκεκριμένοι στόχοι της αποκατάστασης δεν αναφέρονται στη διαθέσιμη βιβλιογραφία. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, θεωρείται ως σημείο συμμόρφωσης το πλέον κατάντη φρέαρ παρακολούθησης του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης (A39LO36PZ), σε απόσταση 396 m από το φρέαρ παρακολούθησης της πηγής (SS45LOO1MW). Στόχος της αποκατάστασης θεωρείται ότι είναι η μείωση των συγκεντρώσεων των χλωροαιθινίων στο υπόγειο νερό στο σημείο συμμόρφωσης κάτω από τις αντίστοιχες μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις στο πόσιμο νερό (TCE: 0,005 mg/L, cis-DCE: 0,070 mg/L και VC: 0,002 mg/L).

**Τύπος – πρόοδος έργων.** Οι Downey *et al.* (2001) αναφέρουν ότι η Υπηρεσία Ποιότητας Περιβάλλοντος της Λουιζιάνα (Louisiana Department of Environmental Quality – LDEQ) και η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. έχουν εγκρίνει την εφαρμογή της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης για την αποκατάσταση της ρύπανσης με χλωροαιθένια στην υποενότητα διαχείρισης της ρύπανσης SS-45 της πρώην αεροπορικής βάσης England, με προβλεπόμενο χρόνο αποκατάστασης 48 έτη (σύμφωνα με τους McGuire *et al.*, 2004a). Λόγοι που συντέιναν στην έγκριση της μεθόδου είναι ότι 1) οι μέγιστες συγκεντρώσεις TCE στο υπόγειο νερό ήταν μικρότερες από 1 mg/L, 2) το έδαφος έχει υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη που παρέχει δότες ηλεκτρονίων και 3) το μονοπάτι αναγωγικής αποχλωρίωσης από TCE σε αιθένιο είναι ολοκληρωμένο. Η αποκατάσταση είναι σε εξέλιξη.

#### 5.2.6 Προσομοίωση με το λογισμικό BIOCHLOR

**Δεδομένα εισόδου στο μοντέλο BIOCHLOR.** Η μεταφορά των διαλυμένων ρύπων, στην ενδιάμεση αμμώδη ζώνη του υδροφορέα, από την εστία της ρύπανσης μέχρι το σημείο συμμόρφωσης (A39LO36PZ) προσομοιώθηκε με το μοντέλο BIOCHLOR, θεωρώντας όλο το πεδίο ως μία ομοιογενή αναερόβια ζώνη. Στόχος της προσομοίωσης είναι η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης για την αποκατάσταση της υποενότητας διαχείρισης της ρύπανσης SS-45 της πρώην αεροπορικής βάσης England.

Το πορώδες θεωρήθηκε ίσο με  $n=0,3$ . Επειδή τα δεδομένα για την υδραυλική κλίση και την κατεύθυνση της ροής είναι ελλιπή, χρησιμοποιήθηκαν συντηρητικά ως δεδομένα εισόδου, για την προσομοίωση του συγκεκριμένου περιστατικού, οι μέγιστες τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και της υδραυλικής κλίσης που έχουν μετρηθεί. Για τη μέγιστη υδραυλική κλίση  $i=0,001$  και τη μέγιστη υδραυλική αγωγιμότητα  $K=1,23 \times 10^{-4}$  m/s, η ταχύτητα μεταγωγής του υπόγειου νερού υπολογίστηκε από τη σχέση  $v_s = Ki/n$ , ίση με 13 m/y.

Το μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης ορίζεται γι' αυτό το περιστατικό ίσο με τη μέγιστη απόσταση μεταξύ του φρέατος παρακολούθησης που αντιπροσωπεύει την πηγή (SS45LOO1MW) και της καμπύλης ίσων συγκεντρώσεων των 0,005 mg/L, που είναι η μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση του TCE στο πόσιμο νερό. Το 2002, το μήκος της ρυπασμένης έκτασης ήταν  $L_p=500$  m. Βάσει αυτής της τιμής και χρησιμοποιώντας τη διορθωμένη σχέση των Xu & Eckstein (1995):  $\alpha_x = 0,82 \times (\log L_p)^{2,446}$  (διόρθωση: Al-Suwaiyan, 1996), υπολογίστηκε συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς ίσος με  $\alpha_x=9,3$  m. Ο λόγος των συντελεστών οριζόντιας εγκάρσιας/διαμήκους μηχανικής διασποράς θεωρήθηκε ίσος με 0,1 (Gelhar *et al.*, 1992). Ο λόγος των συντελεστών κατακόρυφης εγκάρσιας/διαμήκους μηχανικής διασποράς θεωρήθηκε συντηρητικά πρακτικά μηδέν ( $1 \times 10^{-99}$ ).

Ο συντελεστής υστέρησης κάθε ρύπου υπολογίζεται από τη σχέση  $R = 1 + \rho_d K_p / n$ , όπου  $\rho_d$ = ξηρή πυκνότητα του εδάφους,  $K_p$ = συντελεστής διαχωρισμού και  $n$ =πορώδες. Ο συντελεστής  $K_p$  προσδιορίζεται μέσω της σχέσης:  $K_p = K_{oc} \times f_{oc}$ , όπου  $K_{oc}$ = συντελεστής διαχωρισμού μεταξύ της υδατικής φάσης και του οργανικού κλάσματος της στερεάς φάσης και  $f_{oc}$ = κλάσμα οργανικού άνθρακα. Η ξηρή πυκνότητα του εδάφους θεωρήθηκε ίση με  $\rho_d=1,7$  kg/L. Για το κλάσμα οργανικού άνθρακα επιλέχθηκε μια μετρίως υψηλή τιμή  $f_{oc}=0,001$ . Οι τιμές των συντελεστών διαχωρισμού  $K_{oc}$  είναι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για τον χώρο Bendix στην Ενότητα 5.1.6. Ο κοινός συντελεστής υστέρησης των χλωροαιθινίων για το BIOCHLOR προέκυψε ίσος με 1,42 από τη διάμεση τιμή των επιμέρους συντελεστών υστέρησης (Πίνακας 5.9).

Πίνακας 5.9 Εκτίμηση της τιμής του κοινού συντελεστή υστέρησης των χλωροαιθινίων

ΕΝΩΣΗ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ $K_{oc}$ (L/kg)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ $R$
TCE	107	1,61
cis-DCE	49	1,28
VC	98	1,56
Αιθένιο	8	1,05
<b>Διάμεση τιμή (κοινός συντελεστής υστέρησης R των χλωροαιθινίων)</b>		1,42

*TCE= Τριχλωροαιθένιο, cis-DCE= cis-1,2- Διχλωροαιθένιο, VC= Βινυλοχλωρίδιο*

**Βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου BIOCHLOR.** Οι συγκεντρώσεις του 1997 (Πίνακας 5.7) χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου και αυτές του 2000 (Πίνακας 5.8) για την επαλήθευσή του, αφού γι' αυτά τα έτη υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα από περισσότερες δειγματοληψίες. Η ακριβής ημερομηνία έναρξης της διαρροής του TCE στο υπόγειο νερό και η ακριβής συγκέντρωση που διέρρευσε είναι άγνωστες. Γνωρίζουμε ότι η ρύπανση είναι αποτέλεσμα της χρήσης TCE τις δεκαετίες '60 και '70. Το 1962 θεωρήθηκε ως μια συντηρητική επιλογή έναρξης της διαρροής. Επιπλέον, όπως αναφέρεται παραπάνω, σύμφωνα με τη θεώρηση της Parsons ES (2009), η πηγή της ρυπασμένης έκτασης στην Περιοχή 800 αντιπροσωπεύεται από το φρέαρ παρακολούθησης SS45LOO1MW.

Το πάχος της πηγής θεωρήθηκε ίσο με το πάχος της ενδιάμεσης αμμώδους ζώνης, δηλαδή  $Z=12,2$  m. Το πλάτος της πηγής υπολογίστηκε γραφικά από τις καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων του TCE του 2002, σχεδιάζοντας μια γραμμή κατά πλάτος της καμπύλης ίσων συγκεντρώσεων 0,1 mg/L, εγκάρσια στον καθορισμένο άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης (γαλάζια γραμμή στο Σχήμα 5.29). Έτσι, το πλάτος της πηγής τέθηκε ίσο με  $Y=90$  m.

Ο συντελεστής απομείωσης της συγκέντρωσης στην πηγή υπολογίστηκε από τις συγκεντρώσεις TCE που ανιχνεύθηκαν σε δείγματα του υπογείου νερού από το φρέαρ παρακολούθησης SS45LOO1MW, από το 1997 έως το 2002, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.10.

Πίνακας 5.10 Συγκεντρώσεις τριχλωροαιθενίου (TCE) που μετρήθηκαν στο φρέαρ παρακολούθησης της περιοχής της πηγής (SS45LOO1MW)

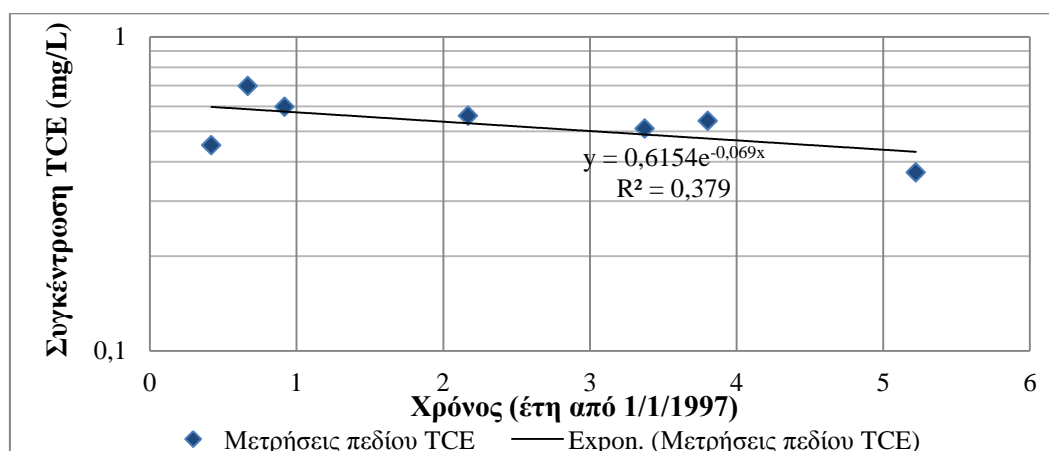
ΦΡΕΑΡ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ SS45LOO1MW		
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΕΤΗ ΑΠΟ 1/1/1997	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ TCE (mg/L)
1/6/1997	0,419	0,451
1/9/1997	0,669	0,697
1/12/1997	0,919	0,598
1/3/1999	2,169	0,560
15/5/2000	3,375	0,510
20/10/2000	3,806	0,540
20/3/2002	5,222	0,370

Από την εκθετική γραμμή ελαχίστων τετραγώνων του ημιλογαριθμικού διαγράμματος της συγκέντρωσης του TCE στο φρέαρ παρακολούθησης της πηγής (SS45LOO1MW) (Σχήμα 5.30), προκύπτει συντελεστής απομείωσης 1<sup>ης</sup> τάξης της συγκέντρωσης στην πηγή ίσος με  $k_s=0,069 \text{ y}^{-1}$ . Η τιμή αυτή ανήκει στο εύρος των υπολογισμένων από τους Newell *et al.* (2006) συντελεστών απομείωσης 1<sup>ης</sup> τάξης για το TCE (Πίνακας 4.4).

Υποθέτοντας ότι ο συντελεστής αυτός είναι σταθερός από την έναρξη της διαρροής του TCE (1962), η αρχική συγκέντρωση του TCE στην πηγή υπολογίστηκε από τη Σχέση 4.4:

$$C_{o,TCE} = \frac{C_{TCE}}{e^{-k_s t}} = \frac{0,582}{e^{-0,069 \times 35}} = 6,5124 \text{ mg/L.}$$

Υπενθυμίζεται ότι η τιμή  $C_{TCE}=0,582 \text{ mg/L}$  είναι η μέση συγκέντρωση που μετρήθηκε στην πηγή (SS45LOO1MW) το 1997, και έτσι  $t=1997-1962=35$  χρόνια.



Σχήμα 5.30 Ημιλογαριθμικό διάγραμμα της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) στο φρέαρ παρακολούθησης της πηγής (SS45LOO1MW) σε σχέση με τον χρόνο (1997-2002), θεωρώντας ως αφετηρία μέτρησης του χρόνου την ημερομηνία 1/1/1997

Χρησιμοποιήθηκαν χρόνοι προσομοίωσης 35 έτη για τη βαθμονόμηση του μοντέλου (από το 1962 έως το 1997) και 38 έτη για την επαλήθευσή του (από το 1962 έως το 2000). Το πλάτος της ρυπασμένης έκτασης του υπογείου νερού με TCE σε συγκεντρώσεις πάνω από τη μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση στο πόσιμο νερό (0,005 mg/L), το 2002, ήταν 310 m. Η απόσταση του φρέατος παρακολούθησης της πηγής (SS45LOO1MW) από το πλέον κατάντη φρέαρ παρακολούθησης του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης (A39LO36PZ) είναι 396 m. Έτσι, οι διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο είναι 310 m x 396 m.

Πίνακας 5.11 Δεδομένα εισόδου του BIOCHLOR για τον υπολογισμό των συντελεστών βιομετασχηματισμού, τη βαθμονόμηση και την επαλήθευση του μοντέλου

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ
Υδραυλική αγωγιμότητα- K (m/y)	3878,9
(Υδραυλική αγωγιμότητα- K (m/s))	$1,23 \times 10^{-4}$
Υδραυλική κλίση- i	0,001
Πορώδες- n	0,30
Συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_x$ (m)	9,30
Λόγος συντελεστή οριζόντιας εγκάρσιας μηχανικής διασποράς/συντελεστή διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_y/\alpha_x$	0,01
Λόγος συντελεστή κατακόρυφης εγκάρσιας μηχανικής διασποράς/συντελεστή διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_z/\alpha_x$	$1 \times 10^{-99}$
Ξηρή πυκνότητα εδάφους- $\rho_d$ (kg/L)	1,7
Κλάσμα οργανικού άνθρακα- $f_{oc}$	0,001
Μέσος συντελεστής υστέρησης των χλωροαιθινίων- R	1,42
Συντελεστές βιομετασχηματισμού- $\lambda$ ( $y^{-1}$ ) (αρχικές τιμές)*	
TCE $\rightarrow$ cis-DCE	1,095
cis-DCE $\rightarrow$ VC	0,73
VC $\rightarrow$ αιθέριο	1,095
Συντελεστές βιομετασχηματισμού- $\lambda$ ( $y^{-1}$ ) (τελικές τιμές)**	
TCE $\rightarrow$ cis-DCE	0,185
cis-DCE $\rightarrow$ VC	0,7
VC $\rightarrow$ αιθέριο	4,8
Χρόνος προσομοίωσης για τη βαθμονόμηση του μοντέλου- t (y)	35
Χρόνος προσομοίωσης για την επαλήθευση του μοντέλου- t (y)	38
Μήκος περιοχής υπό προσομοίωση (m)	396
Πλάτος περιοχής υπό προσομοίωση (m)	310
Πάχος πηγής στην κορεσμένη ζώνη- Z (m)	12,2
Πλάτος πηγής- Y (m)	90
Αρχικές συγκεντρώσεις στην πηγή- $C_0$ (mg/L)	
TCE	6,512
Συντελεστής απομείωσης της συγκέντρωσης της πηγής- $k_s$ ( $y^{-1}$ )	0,069

TCE= Τριχλωροαιθέριο, DCE= cis-1,2- Διχλωροαιθέριο, VC= Βινυλοχλωρίδιο

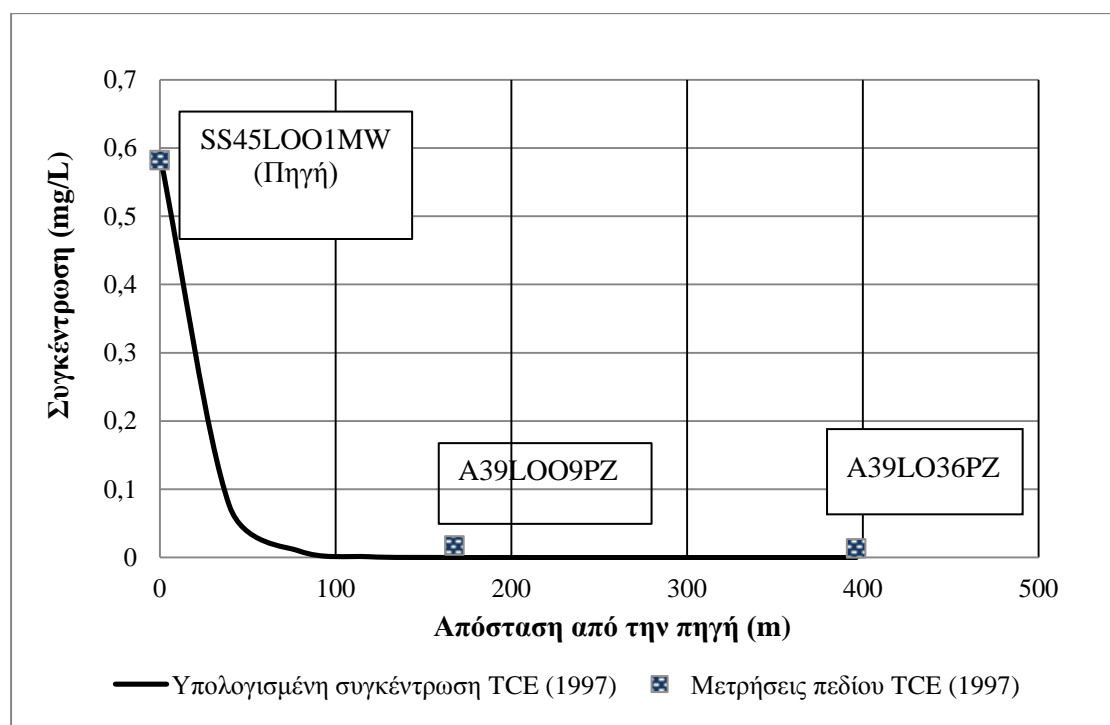
\*Βιβλιογραφικές τιμές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο BIOCHLOR για τον υπολογισμό της κατανομής των συγκεντρώσεων των χλωροαιθινίων το 1997.

\*\*Τιμές που υπολογίστηκαν με διαδοχικές δοκιμές με το BIOCHLOR μέσω της προσαρμογής των υπολογισμένων από το BIOCHLOR κατανομών των συγκεντρώσεων στις μετρήσεις πεδίου του 1997. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου για την επαλήθευση του μοντέλου (2000) και για την εκτίμηση του προβλεπόμενου χρόνου αποκατάστασης.

**Εκτίμηση συντελεστών βιομετασχηματισμού των χλωροαιθινίων.** Αρχικά, υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR οι συγκεντρώσεις των TCE, cis-DCE και VC κατά μήκος του υποτιθέμενου άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης με τα δεδομένα εισόδου που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.11.

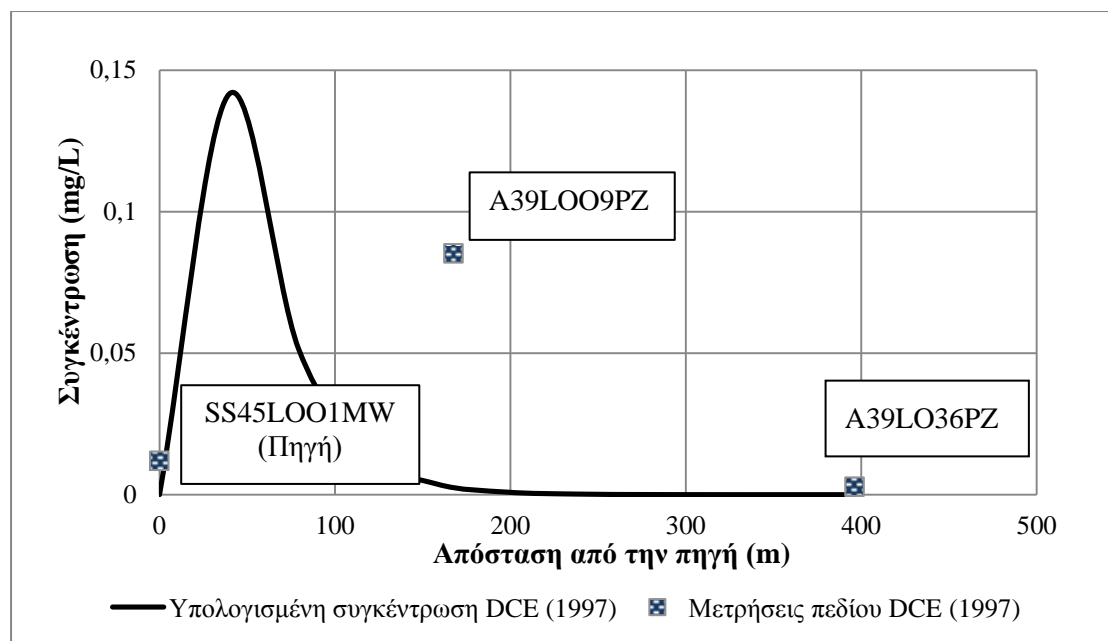
Οι συντελεστές βιομετασχηματισμού που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το στάδιο προέρχονται από τη βιβλιογραφία και συγκεκριμένα είναι οι μέσες τιμές των συντελεστών βιομετασχηματισμού που καταγράφηκαν από τους Suarez & Rifai (1999) για συνθήκες αναγωγικής αποχλωρίωσης από μελέτες στο πεδίο (Πίνακας 4.3).

Στα Σχήματα 5.31 έως 5.33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του BIOCHLOR σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου του 1997 (Πίνακας 5.7). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.31, για συντελεστή βιομετασχηματισμού του TCE ίσο με  $1,095 \text{ y}^{-1}$ , οι υπολογισμένες συγκεντρώσεις του TCE από τα 100 m κατάντη της πηγής και μετά είναι μικρότερες από τη μικρότερη μετρημένη συγκέντρωση στο πλέον κατάντη φρέαρ παρακολούθησης (A39LO36PZ). Άρα, αυτός ο συντελεστής βιομετασχηματισμού οδηγεί σε υποεκτίμηση των συγκεντρώσεων του TCE κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης.

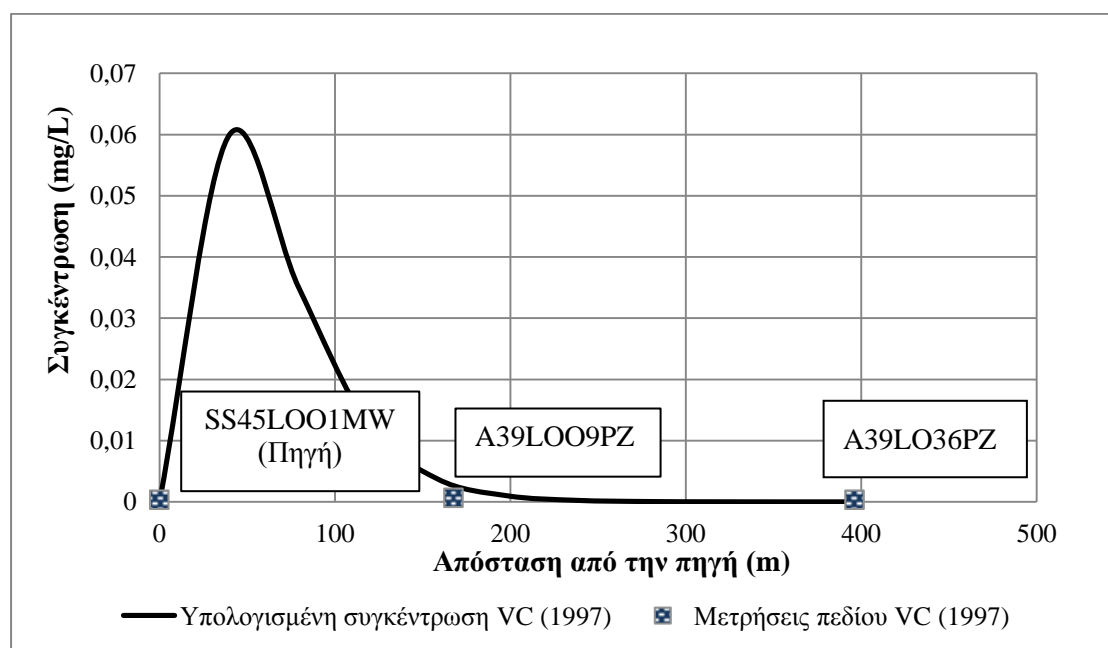


Σχήμα 5.31 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθινίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού από τη βιβλιογραφία, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 1997





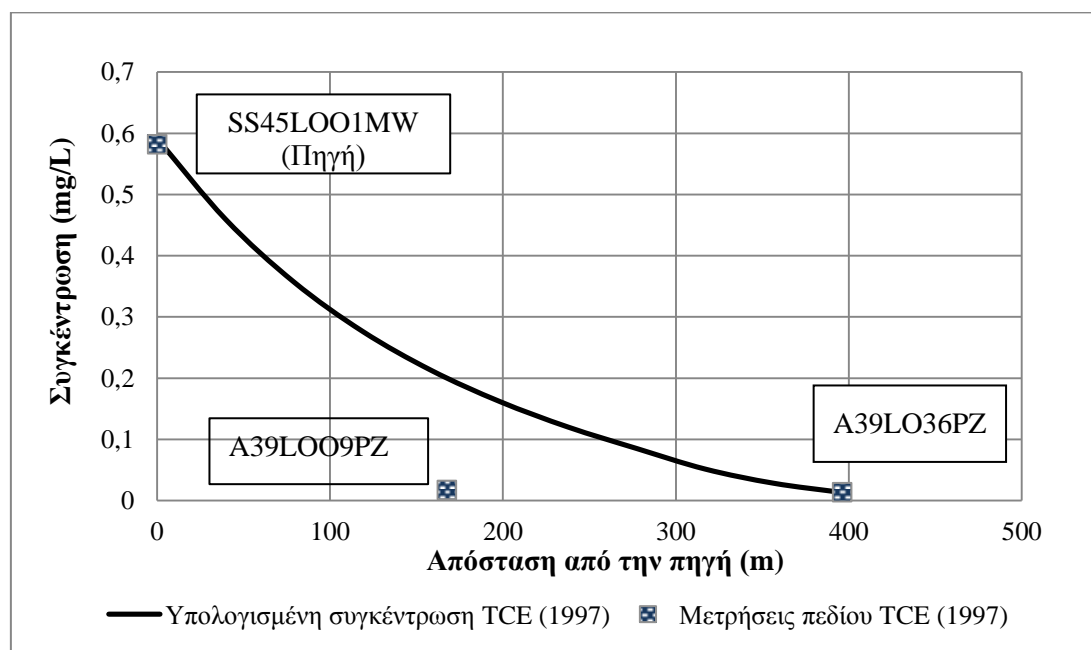
Σχήμα 5.32 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του *cis*-1,2-διχλωροαιθενίου (*cis*-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού από τη βιβλιογραφία, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 1997



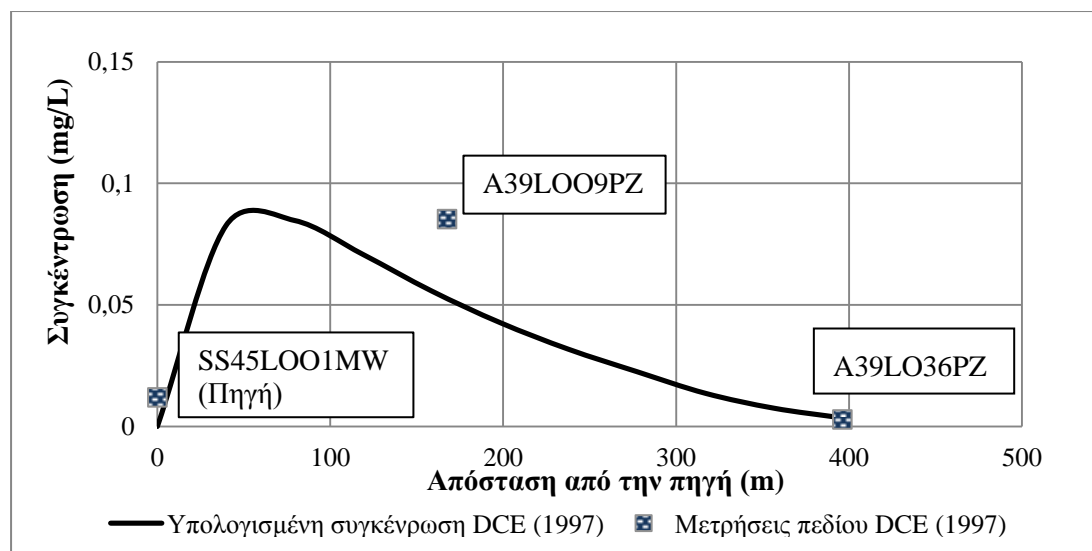
Σχήμα 5.33 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού από τη βιβλιογραφία, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 1997

Έτσι, κρίθηκε απαραίτητο να υπολογιστούν με το λογισμικό BIOCHLOR εξειδικευμένοι για το περιστατικό συντελεστές βιομετασχηματισμού 1<sup>ης</sup> τάξης των ενώσεων TCE, *cis*-DCE και VC μέσω διαδοχικών δοκιμών (trial and error method). Κρατώντας

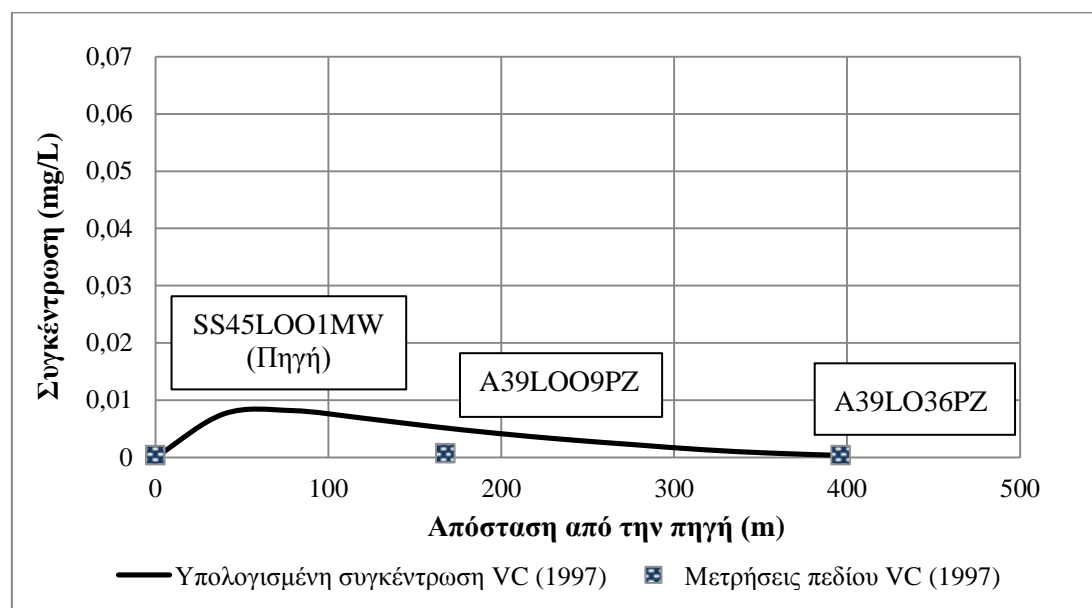
σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους εισόδου, ο συντελεστής βιομετασχηματισμού του TCE μειώθηκε από την αρχική τιμή του  $1,095 \text{ y}^{-1}$  μέχρι οι υπολογισμένες συγκεντρώσεις του TCE να προσαρμοστούν στις μετρήσεις πεδίου του 1997. Έτσι, προέκυψε η τελική τιμή  $\lambda_{\text{TCE}}=0,185 \text{ y}^{-1}$ . Στη συνέχεια, με δεδομένο αυτόν τον συντελεστή βιομετασχηματισμού του TCE, μεταβλήθηκε ο συντελεστής βιομετασχηματισμού του cis-DCE από την αρχική τιμή του  $0,73 \text{ y}^{-1}$  μέχρι οι υπολογισμένες συγκεντρώσεις του cis-DCE να προσαρμοστούν στις μετρήσεις πεδίου του 1997. Έτσι, προέκυψε η τελική τιμή  $\lambda_{\text{cis-DCE}}=0,7 \text{ y}^{-1}$ . Τέλος, με δεδομένους τους συντελεστές βιομετασχηματισμού των TCE και cis-DCE ( $0,185$  και  $0,7 \text{ y}^{-1}$ , αντίστοιχα), μεταβλήθηκε ο συντελεστής βιομετασχηματισμού του VC από την αρχική τιμή του  $1,095 \text{ y}^{-1}$  μέχρι οι υπολογισμένες συγκεντρώσεις του cis-DCE να προσαρμοστούν στις μετρήσεις πεδίου του 1997. Έτσι, προέκυψε η τελική τιμή  $\lambda_{\text{VC}}=4,8 \text{ y}^{-1}$ , η οποία είναι αρκετά μεγαλύτερη, αλλά της ίδιας τάξης μεγέθους, από τον μέγιστο καταγεγραμμένο συντελεστή βιομετασχηματισμού του VC από για συνθήκες αναγωγικής αποχλωρίωσης τους Suarez & Rifai (1999) (Πίνακας 4.3). Στα Σχήματα 5.34 έως 5.36 παρουσιάζονται οι κατανομές των συγκεντρώσεων των χλωροαιθενίων που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR με τη χρήση των παραπάνω συντελεστών βιομετασχηματισμού, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου του 1997.



Σχήμα 5.34 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 1997



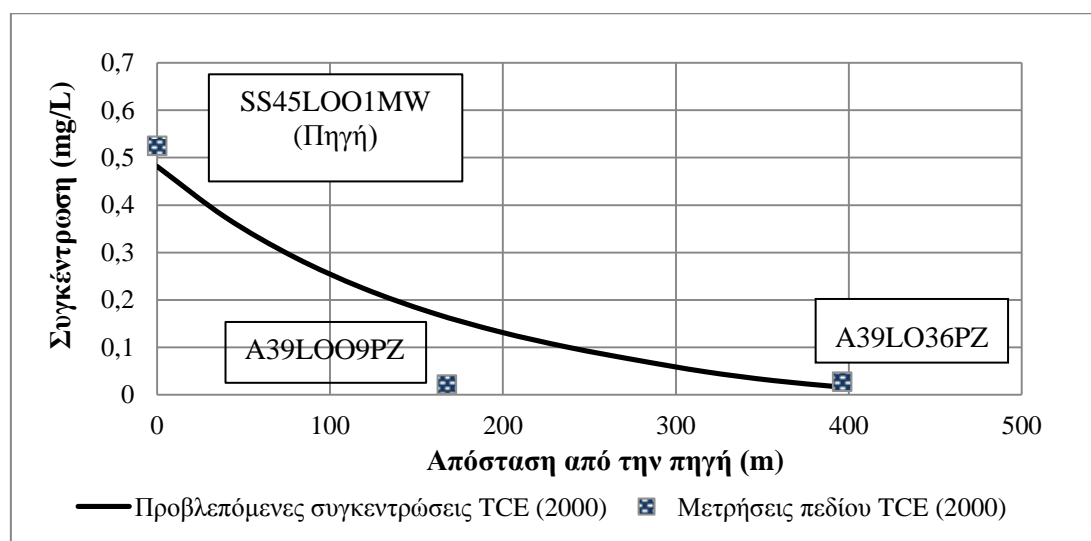
Σχήμα 5.35 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του *cis*-1,2-διχλωροαιθενίου (*cis*-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 1997



Σχήμα 5.36 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 1997

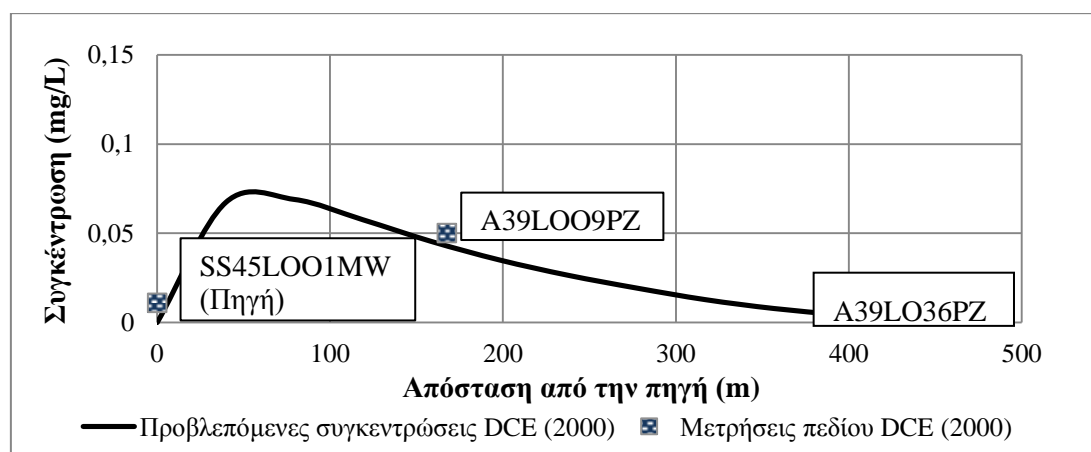
Όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.34 έως 5.36 οι συγκεντρώσεις που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR, με τις τελικές τιμές των συντελεστών βιομετασχηματισμού που φαίνονται στον Πίνακα 5.11, σε απόσταση 396 m από την πηγή ταυτίζονται με τις μετρημένες στο πλέον

κατάντη φρέαρ παρακολούθησης A39LO36PZ. Εδώ ολοκληρώνεται το στάδιο της βαθμονόμησης του μοντέλου.

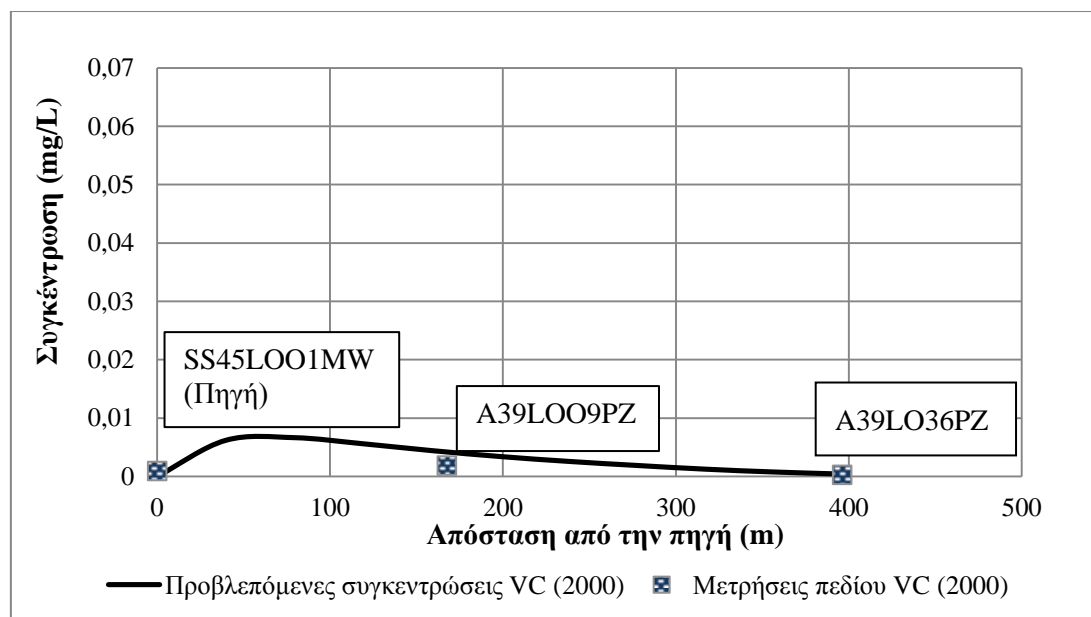


Σχήμα 5.37 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 2000

Στη συνέχεια, κρατώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους εισόδου σταθερές, ο χρόνος προσομοίωσης αυξήθηκε από τα 35 στα 38 έτη, για να εξεταστεί αν το μοντέλο επαληθεύεται με τις μετρήσεις πεδίου του 2000. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.37 έως 5.39, οι συγκεντρώσεις που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR, με τα δεδομένα εισόδου που φαίνονται στον Πίνακα 5.11, σε απόσταση 396 m από την πηγή ταυτίζονται σχεδόν με τις μετρημένες στο πλέον κατάντη φρέαρ παρακολούθησης A39LO36PZ. Επομένως, το μοντέλο επαληθεύεται.



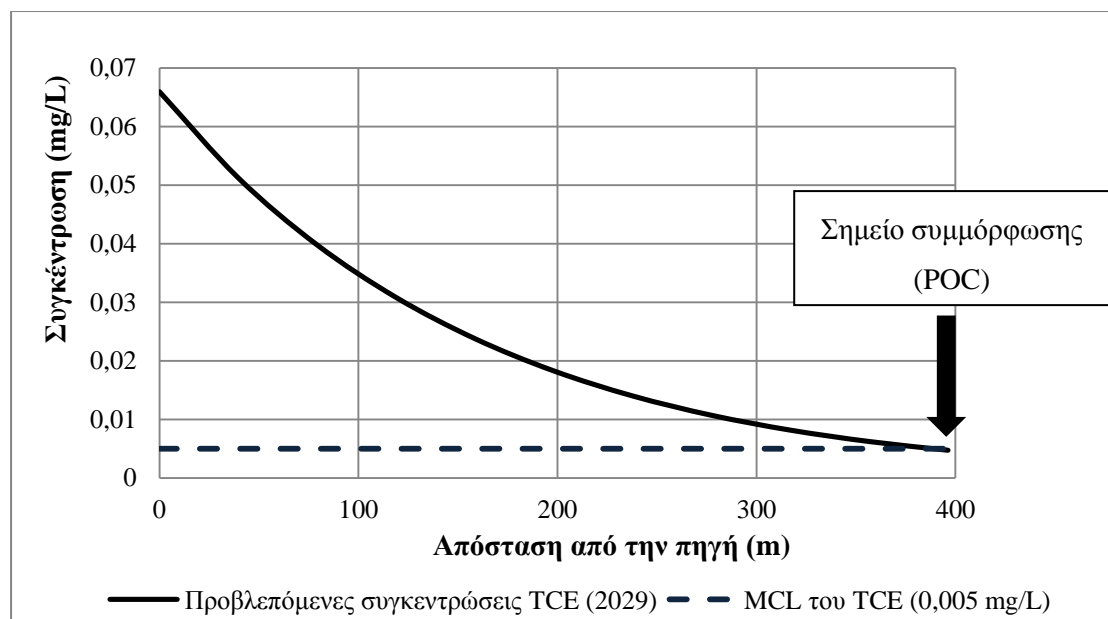
Σχήμα 5.38 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 2000



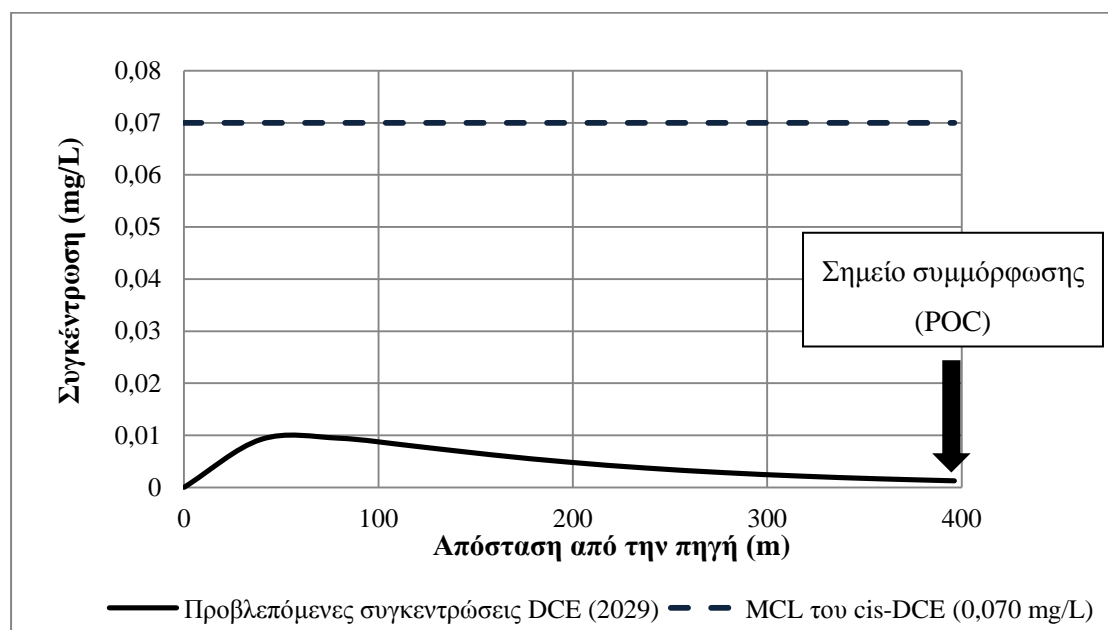
Σχήμα 5.39 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης SS45LOOMW, A39LOO9PZ και A39LO36PZ για το έτος 2000

**Υπολογισμός του προβλεπόμενου χρόνου αποκατάστασης.** Στη συνέχεια, υπολογίστηκε με το λογισμικό BIOCHLOR το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να μειωθούν οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθενίων στο σημείο συμμόρφωσης (A39LO36PZ) κάτω από τις αντίστοιχες μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις στο πόσιμο νερό (TCE: 0,005 mg/L, cis-DCE: 0,070 mg/L και VC: 0,002 mg/L). Κρατώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση του μοντέλου (Πίνακας 5.11), ο χρόνος προσομοίωσης (διάρκεια της ρύπανσης) αυξήθηκε σταδιακά μέχρις ότου οι προβλεπόμενες συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθενίων σε απόσταση 396 m από την πηγή μειωθούν κάτω από το αντίστοιχο επιτρεπόμενο όριο στο πόσιμο νερό. Με αυτόν τον τρόπο προέκυψε ότι το TCE είναι ο τελευταίος ρύπος για τον οποίο θα επιτευχθούν οι στόχοι αποκατάστασης. Ο χρόνος αποκατάστασης υπολογίστηκε ίσος με 67 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής, δηλαδή οι στόχοι αποκατάστασης θα επιτευχθούν το έτος 2029. Άρα, με αφετηρία την ημερομηνία έγκρισης της εφαρμογής της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης (2001), ο προβλεπόμενος χρόνος αποκατάστασης είναι 28 χρόνια, δηλαδή μικρότερος από αυτόν που προβλέπεται από την Υπηρεσία Ποιότητας Περιβάλλοντος της Λουιζιάνα και την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. (48 χρόνια), αλλά της ίδιας τάξης μεγέθους. Επομένως, επιβεβαιώνεται ότι δεν απαιτούνται μέτρα επεμβατικής αποκατάστασης.

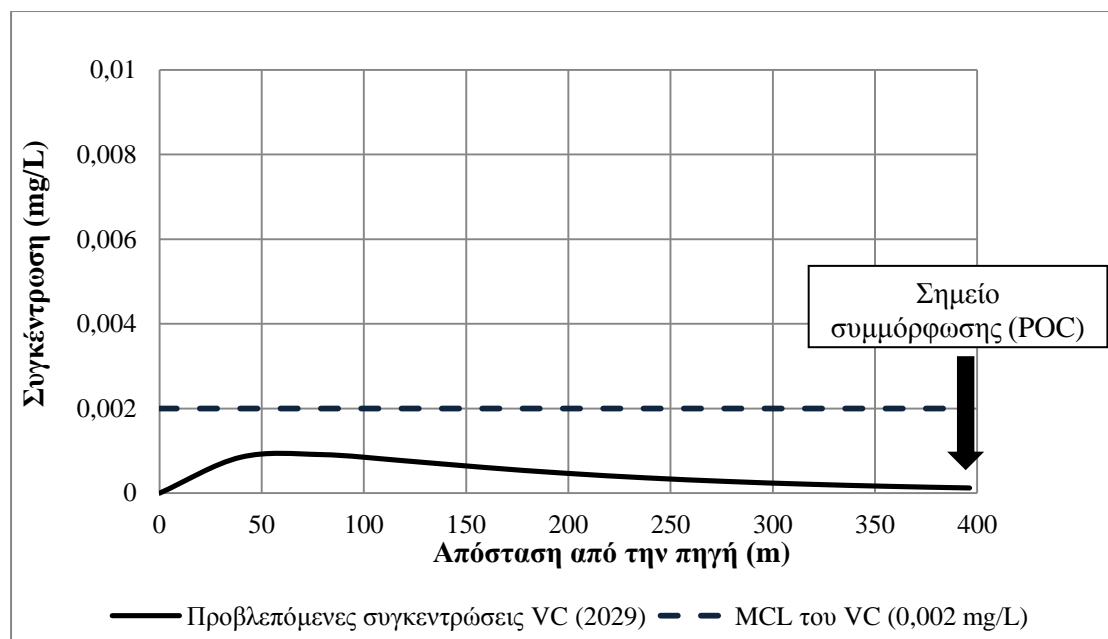
Όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.40 έως 5.42, 67 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής (2029), οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθενίων στο σημείο συμμόρφωσης είναι μικρότερες ή ίσες των αντίστοιχων μέγιστων επιτρεπτών συγκεντρώσεων στο πόσιμο νερό.



Σχήμα 5.40 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, 67 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής, σε σύγκριση με τη μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση στο πόσιμο νερό (MCL)



Σχήμα 5.41 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, 67 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής, σε σύγκριση με τη μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση στο πόσιμο νερό (MCL)



Σχήμα 5.42 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, 67 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής, σε σύγκριση με τη μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση στο πόσιμο νερό (MCL)

### 5.2.7 Αναλύσεις ευαισθησίας

Λόγω έλλειψης αρκετών απαιτούμενων πληροφοριών για τα χαρακτηριστικά του ρυπασμένου χώρου στη διαθέσιμη βιβλιογραφία, οι περισσότερες παράμετροι εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του προβλεπόμενου χρόνου αποκατάστασης με το BIOCHLOR βασίζονται σε εκτιμήσεις και εμπεριέχουν μεγάλη αβεβαιότητα. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας με σκοπό να καθοριστεί η επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων εισόδου στα δεδομένα εξόδου του μοντέλου. Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε μεταβάλλοντας την υδραυλική κλίση ( $i$ ), τον συντελεστή υστέρησης ( $R$ ) και τους συντελεστές βιομετασχηματισμού 1<sup>ης</sup> τάξης ( $\lambda$ ) των TCE, cis-DCE και VC.

Για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση ευαισθησίας, το βαθμονομημένο μοντέλο τροποποιήθηκε, μεταβάλλοντας καθεμία από τις προαναφερθείσες παραμέτρους ξεχωριστά, και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με το βαθμονομημένο μοντέλο. Ο χρόνος προσομοίωσης στις αναλύσεις ευαισθησίας τέθηκε ίσος με 38 έτη, ακριβώς όσο ήταν και για το βαθμονομημένο μοντέλο, ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση της μεταβολής κάθε παραμέτρου ανεξάρτητα. Πραγματοποιήθηκαν έξι αναλύσεις ευαισθησίας με τις παρακάτω μεταβολές:

- 1) Η υδραυλική κλίση υποδιπλασιάστηκε ( $i=0,0005$ ).
- 2) Η υδραυλική κλίση διπλασιάστηκε ( $i=0,002$ ).
- 3) Ο συντελεστής υστέρησης τέθηκε ίσος με  $R=1$  (περίπτωση χωρίς ρόφηση).

4) Ο συντελεστής υστέρησης τέθηκε ίσος με  $R=2,615$ , τιμή που υπολογίστηκε, μεταβάλλοντας το κλάσμα οργανικού άνθρακα σε μια υψηλή τιμή  $f_{oc}=0,01$ .

5) Οι συντελεστές βιομετασχηματισμού 1<sup>ης</sup> τάξης των TCE, cis-DCE και VC διπλασιάστηκαν ( $\lambda_{TCE}=0,37 \text{ y}^{-1}$ ,  $\lambda_{cis-DCE}=1,40 \text{ y}^{-1}$  και  $\lambda_{VC}=9,6 \text{ y}^{-1}$ ).

6) Οι συντελεστές βιομετασχηματισμού 1<sup>ης</sup> τάξης των TCE, cis-DCE και VC υποδιπλασιάστηκαν ( $\lambda_{TCE}=0,0925 \text{ y}^{-1}$ ,  $\lambda_{cis-DCE}=0,35 \text{ y}^{-1}$  και  $\lambda_{VC}=2,4 \text{ y}^{-1}$ ).

Στον Πίνακα 5.12 παρουσιάζονται οι υπολογισμένες συγκεντρώσεις στο σημείο συμμόρφωσης (A39LO36PZ) για το έτος 2000, για τις έξι παραπάνω περιπτώσεις, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρήσεις πεδίου και τα αποτελέσματα του βαθμονομημένου μοντέλου του βασικού σεναρίου, δηλαδή του σεναρίου στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα εισόδου που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.11. Στον Πίνακα 5.13 παρουσιάζονται οι προβλεπόμενοι χρόνοι αποκατάστασης που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR για τις έξι περιπτώσεις, με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στην αντίστοιχη παράγραφο της Ενότητας 5.2.6. Στην επόμενη παράγραφο σχολιάζονται οι μεταβολές των συγκεντρώσεων στο σημείο συμμόρφωσης το 2000 και του προβλεπόμενου χρόνου αποκατάστασης λόγω της τροποποίησης των παραμέτρων εισόδου.

Η αύξηση της υδραυλικής κλίσης και άρα της ταχύτητας μεταγωγής έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη εξάπλωση της ρύπανσης και άρα μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στο σημείο συμμόρφωσης το 2000, καθώς και μεγαλύτερο προβλεπόμενο χρόνο αποκατάστασης, όπως ήταν αναμενόμενο. Η αύξηση του συντελεστή υστέρησης, λόγω της χρήσης υψηλότερης τιμής για το κλάσμα οργανικού άνθρακα οδήγησε στο υπολογισμό πολύ μικρότερων συγκεντρώσεων στο σημείο συμμόρφωσης το 2000. Αντιθέτως, για την περίπτωση μηδενικής ρόφησης οι υπολογισμένες συγκεντρώσεις στο σημείο συμμόρφωσης για το 2000 σχεδόν δεν μεταβλήθηκαν σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν με τις παραμέτρους εισόδου του βασικού σεναρίου. Ο υποδιπλασιασμός της υδραυλικής κλίσης προκάλεσε τη μεγαλύτερη μείωση, ενώ ο διπλασιασμός των συντελεστών βιομετασχηματισμού 1<sup>ης</sup> τάξης τη μεγαλύτερη αύξηση στις υπολογισμένες συγκεντρώσεις στο σημείο συμμόρφωσης για το έτος 2002 σε σχέση με το βαθμονομημένο μοντέλο. Για υποδιπλάσια υδραυλική κλίση, υπολογίστηκε ότι η μέγιστη απόσταση εξάπλωσης του TCE είναι 267 m, 45 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής (2007) και στη συνέχεια, η ρυπασμένη έκταση συρρικνώνεται, οπότε οι στόχοι αποκατάστασης έχουν επιτευχθεί. Παρατηρείται ότι, η αύξηση του συντελεστή υστέρησης είχε σαν αποτέλεσμα σημαντική αύξηση στον προβλεπόμενο χρόνο αποκατάστασης. Αυτό οφείλεται στην παραδοχή του BIOCHLOR ότι η βιοαποδόμηση συμβαίνει μόνο στην υδατική φάση, οπότε η ρόφηση των χλωροαιθινίων στους εδαφικούς κόκκους καθυστερεί τη βιοαποδόμησή τους.



Πίνακας 5.12 Αποτελέσματα των αναλύσεων ευαισθησίας για τον χώρο SS-45 της πρώην αεροπορικής βάσης England στη Λουιζιάνα

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ (mg/L) στο σημείο συμμόρφωσης (A39LO36PZ) το 2000 για τις περιπτώσεις:								
ΕΝΩΣΗ	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ (ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ)	ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΚΛΙΣΗΣ		ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ		ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΒΙΟΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ	
			υποδιπλάσιος του βασικού σεναρίου $i=0,0005$	διπλάσιος του βασικού σεναρίου $i=0,002$	R=1	R=2,615	υποδιπλάσιος του βασικού σεναρίου	διπλάσιος του βασικού σεναρίου
TCE	0,02750	0,01604	0,000002	0,11839	0,01546	0,00009	0,13177	0,00028
cis-DCE	0,00430	0,00425	0,000001	0,03131	0,00410	0,00002	0,03479	0,00007
VC	0,00030	0,00042	0,000000	0,00306	0,00040	0,00000	0,00340	0,00001

TCE= Τριχλωροαιθέριο, cis-DCE= cis-1,2- Διχλωροαιθέριο, VC= Βινυλοχλωρίδιο

Βασικό σενάριο:  $i=0,001$ ,  $R=1,42$ ,  $\lambda_{TCE}=0,185 \text{ y}^{-1}$ ,  $\lambda_{cis-DCE}=0,70 \text{ y}^{-1}$ ,  $\lambda_{VC}=4,80 \text{ y}^{-1}$

Πίνακας 5.13 Προβλεπόμενος χρόνος αποκατάστασης για τα διαφορετικά σενάρια των αναλύσεων ευαισθησίας

ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (έτη από την έναρξη της διαρροής το 1962) για τις περιπτώσεις:							
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ (ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ)	ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΚΛΙΣΗΣ		ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ		ΣΥΝΤΕΛΕΤΩΝ ΒΙΟΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ		
	υποδιπλάσιος του βασικού σεναρίου $i=0,0005$	διπλάσιος του βασικού σεναρίου $i=0,002$	R=1	R=2,615	υποδιπλάσιος του βασικού σεναρίου	διπλάσιος του βασικού σεναρίου	
67	45*	85	55	99	106	..**	

Βασικό σενάριο:  $i=0,001$ ,  $R=1,42$ ,  $\lambda_{TCE}=0,185 \text{ y}^{-1}$ ,  $\lambda_{cis-DCE}=0,70 \text{ y}^{-1}$ ,  $\lambda_{VC}=4,80 \text{ y}^{-1}$

\* η μέγιστη απόσταση εξάπλωσης του TCE είναι 267 m, 45 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής (2007) και στη συνέχεια, η ρυπασμένη έκταση συρρικνώνεται

\*\* το 2000 η ρύπανση με TCE έχει φτάσει σε απόσταση 237 m κατάντη της πηγής και τα επόμενα χρόνια συρρικνώνεται

Διπλασιάζοντας τους συντελεστές βιομετασχηματισμού, οι διαλυμένοι ρύποι υποβαθμίζονται πιο γρήγορα και άρα, υπολογίστηκαν μικρότερες συγκεντρώσεις στο σημείο συμμόρφωσης το 2000. Οι συντελεστές βιομετασχηματισμού έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στον προβλεπόμενο χρόνο αποκατάστασης. Για διπλάσιους συντελεστές βιοαποδόμησης, υπολογίστηκε ότι το 2000 η ρύπανση με TCE έχει φτάσει σε απόσταση 237 m κατάντη της πηγής και τα επόμενα χρόνια συρρικνώνεται.

Η μεταβολή των παραμέτρων του μοντέλου εντός των προαναφερθέντων ορίων, είχε σαν αποτέλεσμα η συγκέντρωση στο σημείο συμμόρφωσης το 2000 να διαφέρει πολύ από τις μετρήσεις πεδίου, εκτός από την περίπτωση όπου θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχει ρόφηση (συντελεστής υστέρησης  $R=1$ ).

#### 5.2.8 Σύνοψη-Συμπεράσματα

Στην Ενότητα 5.2 αξιολογήθηκε η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης για την αποκατάσταση του ρυπασμένου με χλωροαιθένια χώρου SS-45 της πρώην αεροπορικής βάσης England στη Λουιζιάνα με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση. Με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν για το περιστατικό και εκτιμήσεις για τις παραμέτρους για τις οποίες δεν υπήρχαν διαθέσιμες πληροφορίες βάσει βιβλιογραφικών τιμών, υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR εξειδικευμένοι για το περιστατικό συντελεστές βιομετασχηματισμού:  $\lambda_{TCE}=0,185 \text{ y}^{-1}$ ,  $\lambda_{cis-DCE}=0,7 \text{ y}^{-1}$  και  $\lambda_{VC}=4,8 \text{ y}^{-1}$  (δηλαδή χρόνοι ημιζωής: 3,75 έτη, 361 ημέρες και 52,7 ημέρες για τις ενώσεις TCE, cis-DCE και VC, αντίστοιχα). Στη συνέχεια, με τη χρήση αυτών των συντελεστών βιομετασχηματισμού, υπολογίστηκε ο προβλεπόμενος χρόνος αποκατάστασης, ίσος με 67 χρόνια από την έναρξη της διαρροής ή 28 χρόνια μετά την έγκριση της μεθόδου. Άρα, η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση αναμένεται να είναι αποτελεσματική μέθοδος αποκατάστασης για το συγκεκριμένο περιστατικό. Το αποτέλεσμα αυτό είναι συμβατό με την απόφαση της Υπηρεσίας Ποιότητας Περιβάλλοντος της Λουιζιάνα και της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. να εγκρίνουν την εφαρμογή της μεθόδου το 2001 με προβλεπόμενο χρόνο αποκατάστασης 48 έτη (2049). Τέλος, λόγω αβεβαιότητας των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας για την υδραυλική κλίση, τον κοινό συντελεστή υστέρησης των χλωροαιθινίων και τους συντελεστές βιομετασχηματισμού. Ο μέγιστος χρόνος αποκατάστασης που προβλέφθηκε από τις αναλύσεις ευαισθησίας είναι 106 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής (2068), δηλαδή 67 χρόνια μετά την έγκριση της μεθόδου. Η τιμή αυτή είναι αποδεκτή για τη χρήση της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης.

### **5.3 Περιστατικό ρύπανσης υπεδάφους με χλωροαιθένια: Αεροπορική Βάση Tinker στην Οκλαχόμα (Site FTA-2)**

Οι γενικές πληροφορίες των Ενοτήτων 5.3.1, 5.3.2 και 5.3.3 προέρχονται από τις μελέτες (Parson ES, 1997), Parsons ES (1999b) και Parsons ES (2009).

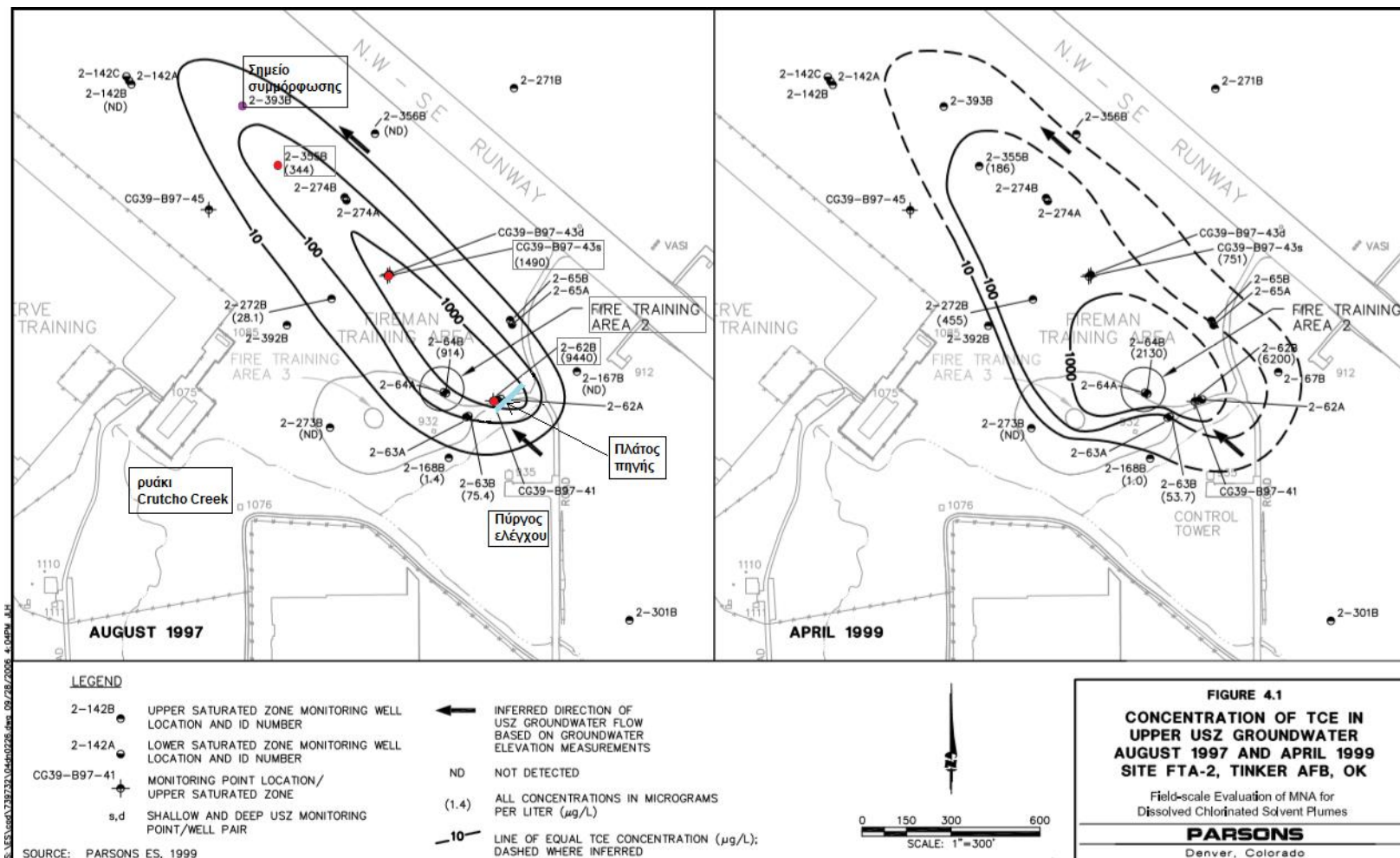
#### **5.3.1 Ο χώρος**

**Κατηγορία χώρου.** Η αεροπορική βάση Tinker στην Οκλαχόμα είναι ένα βιομηχανικό συγκρότημα όπου πραγματοποιείται συντήρηση και επισκευή αεροσκαφών από το 1942. Είναι μία από τις μεγαλύτερες στρατιωτικές/βιομηχανικές εγκαταστάσεις στον κόσμο. Η εγκατάσταση βρίσκεται στο ανατολικό σύνορο της μητροπολιτικής περιοχής της πόλης της Οκλαχόμα, νότια της πόλης Midwest City και ανατολικά της πόλης Del City. Το ρυάκι Crutch Creek ξεκινάει από το νότιο τμήμα της αεροπορικής βάσης, ρέει προς τα βόρεια- βορειοδυτικά διαμέσου της βάσης και εκρέει στον ποταμό North Canadian River 8,85 km βόρεια της βάσης. Τα ρυάκια Kuhlman Creek και Soldier Creek εκρέουν στο ρυάκι Crutch Creek βόρεια της εγκατάστασης. Το Πρόγραμμα Αποκατάστασης της Εγκατάστασης (Installation Restoration Program – IRP) περιλαμβάνει 36 υποενότητες διαχείρισης της ρύπανσης. Σε αυτήν την ενότητα θα ασχοληθούμε με τον χώρο FT22, ο οποίος αναφέρεται συνήθως στη βιβλιογραφία με την ονομασία FTA-2 (Fire Training Area-2). Ο χώρος αυτός ήταν ένα προσωρινό, ανεπένδυτο εδαφικό κοίλωμα, το οποίο χρησιμοποιόταν για την πραγματοποίηση πυροσβεστικών ασκήσεων από το 1962 έως το 1966. Βρίσκεται στο νοτιοκεντρικό τμήμα της αεροπορικής βάσης, βορειοδυτικά του πύργου ελέγχου, και κοντά στο ρυάκι Crutch Creek (Σχήμα 5.43).

**Χρήσεις γης.** Το ρυάκι Crutch Creek χρησιμοποιείται για ψυχαγωγικούς σκοπούς. Σύμφωνα με την ATSDR (2009), δεν έχει εντοπιστεί ρύπανση στα επιφανειακά νερά του ρυακιού που να αποτελεί απειλή για την ανθρώπινη υγεία. Η αεροπορική βάση Tinker περιβάλλεται από οικιστική και εμπορική ανάπτυξη στα βόρεια, δυτικά και ανατολικά, και βιομηχανική και εμπορική ανάπτυξη στα νότια. Οι περισσότεροι κάτοικοι των γειτονικών περιοχών έχουν συνδεθεί στο δημοτικό σύστημα υδροδότησης.

#### **5.3.2 Αίτια ρύπανσης και τύπος ρύπου**

**Ρυπογόνος δραστηριότητα.** Η τυπική διαδικασία που ακολουθόταν κατά την εκτέλεση των πυροσβεστικών ασκήσεων στον χώρο, από το 1962 έως το 1996, περιλάμβανε την προσθήκη νερού στο εδαφικό κοίλωμα με σκοπό να κορεστεί το έδαφος και να μειωθεί η διήθηση των καυσίμων σε αυτό. Στη συνέχεια, φορτηγά έριχναν πάνω από το νερό καύσιμα, και ακολουθούσε ανάφλεξη και κατάσβεση της φωτιάς με νερό και αφρό. Τα υπολείμματα παρέμεναν στο εδαφικό κοίλωμα, από όπου εξατμίζονταν στον αέρα ή διηθούνταν στο υπέδαφος μέχρι την επόμενη πυροσβεστική άσκηση. Συχνά, στοιβάζονταν κοντά στον χώρο FTA-2 βαρέλια με χρησιμοποιημένα πετρελαιοειδή και διαλύτες που αναμιγνύονταν με τα



Σχήμα 5.43 Καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων του τριχλωροαιθενίου (TCE) στον ρυπασμένο χώρο FTA-2 της αεροπορικής βάσης Tinker στην Οκλαχόμα το Αύγουστο του 1997 και τον Απρίλιο του 1999 (Parsons ES, 2009 – τροποποιημένο)

καύσιμα πριν την ανάφλεξη στο εδαφικό κοίλωμα. Δεν έχουν βρεθεί αρχεία που να προσδιορίζουν τη συχνότητα της χρήσης και την ποσότητα των καυσίμων που καίγονταν στο εδαφικό κοίλωμα. Σήμερα, στον χώρο δεν υπάρχουν ορατές ενδείξεις ότι κάποτε χρησιμοποιούταν για την εκτέλεση πυροσβεστικών ασκήσεων.

**Κύριοι ρύποι.** Οι κύριοι ρύποι ενδιαφέροντος στο υπόγειο νερό του χώρου FTA-2 είναι το TCE και το cis-DCE. Έχουν ανιχνευθεί, επίσης, PCE και VC σε συγκεντρώσεις της ίδιας τάξης μεγέθους με τις αντίστοιχες μέγιστες επιτρεπτές στο πόσιμο νερό και χαμηλές συγκεντρώσεις πετρελαϊκών υδρογονανθράκων (μικρότερες από 0,007 mg/L).

### 5.3.3 Χαρακτηριστικά υπεδάφους

**Στρωματογραφία – Υδραυλική αγωγιμότητα.** Κάτω από την αεροπορική βάση υπάρχει το εδαφικό στρώμα Hennessay Group πάχους 2,4-4,6 m, που αποτελείται από ιλυώδη άργιλο και αργιλώδη ιλύ. Αυτού του στρώματος υπόκειται ο υδροφορέας Garber Sandstone, που αποτελείται από λεπτή άμμο με ιλύ και φακούς αργίλου. Στο άνω τρίτο του πάχους αυτού του υδροφορέα, σε βάθος μικρότερο από 61 m, διακρίνονται δύο κορεσμένες αμμώδεις ζώνες: η ρηχή κορεσμένη ζώνη (Upper Saturated Zone – USZ) και η βαθιά κορεσμένη ζώνη (Lower Saturated Zone – LSZ), που χωρίζονται τοπικά από ένα στρώμα αργίλου-ιλύος σχετικά χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας (USZ-LSZ aquitard). Η κορυφή του στρώματος αυτού βρίσκεται σε βάθος περίπου 12,2 έως 13,7 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (Parson ES, 1997). Η ρηχή κορεσμένη ζώνη υποδιαιρείται, με τη σειρά της, σε δύο αμμώδεις ενότητες που χωρίζονται, στο νότιο τμήμα του χώρου, από ένα συνεχές αργιλικό στρώμα πάχους 0,9 έως 1,5 m σχετικά χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας. Στην άνω αμμώδη ενότητα της ρηχής κορεσμένης ζώνης έχουν μετρηθεί υδραυλικές αγωγιμότητες που ποικίλλουν από  $2,293 \times 10^{-5}$  έως  $9,878 \times 10^{-5}$  m/s (με γεωμετρικό μέσο  $K=4,939 \times 10^{-5}$  m/s). Στην κάτω αμμώδη ενότητα της ρηχής κορεσμένης ζώνης έχουν μετρηθεί υδραυλικές αγωγιμότητες που ποικίλλουν από  $3,175 \times 10^{-6}$  έως  $1,552 \times 10^{-4}$  m/s (με γεωμετρικό μέσο  $K=5,292 \times 10^{-5}$  m/s).

**Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα - Υδραυλική κλίση.** Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα συμπίπτει σχεδόν με τη διεπιφάνεια μεταξύ των στρωμάτων Hennessay Group και Garber Sandstone, σε βάθος περίπου 2,4-4,6 m από την επιφάνεια του εδάφους (Parson ES, 1997). Το 1997, η οριζόντια υδραυλική κλίση στη ρηχή κορεσμένη ζώνη είχε τιμές από 0,003 έως 0,01 (μέση υδραυλική κλίση  $i=0,006$ ). Η κατεύθυνση της ροής του υπογείου νερού στη ρηχή κορεσμένη ζώνη, βάσει μετρήσεων της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, θεωρείται ότι είναι βορειοδυτική (μαύρο βέλος στο Σχήμα 5.43).

#### 5.3.4 Έκταση ρύπανσης

**Κατανομή ρύπων.** Η ρυπασμένη έκταση που αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας εντοπίζεται κυρίως στη ρηχή κορεσμένη ζώνη. Το 1997, το TCE ήταν ο ρύπος που είχε εξαπλωθεί περισσότερο σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από τη μέγιστη επιτρεπτή στο πόσιμο νερό (0,005 mg/L), σε απόσταση μεγαλύτερη από 465 m κατάντη του φρέατος παρακολούθησης της περιοχής της πηγής 2-62B (Σχήμα 5.43). Την ίδια χρονιά, το cis-DCE είχε επεκταθεί σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από τη μέγιστη επιτρεπτή στο πόσιμο νερό (0,070 mg/L), σε απόσταση μεγαλύτερη από 245 m κατάντη του 2-62B. Σύμφωνα με τα διαθέσιμα δεδομένα, τόσο το μέγεθος όσο και η κατανομή των συγκεντρώσεων των χλωροαιθενίων στις άνω και κάτω αμμώδεις ενότητες της ρηχής κορεσμένης ζώνης είναι παρόμοια.

**Τιμές συγκεντρώσεων.** Στη μελέτη Parsons ES (2009) υπάρχουν καταγεγραμμένες μετρήσεις πεδίου των PCE, TCE, cis-DCE και VC από το 1993 έως το 2002. Στη ρηχή κορεσμένη ζώνη του υδροφορέα, ανιχνεύθηκαν αυτή την περίοδο, χλωριωμένοι διαλύτες σε συνολικές συγκεντρώσεις της τάξεως των 10 mg/L. Στην ίδια μελέτη αναφέρεται ότι η περιοχή της πηγής αντιπροσωπεύεται από τρία φρέατα παρακολούθησης της άνω αμμώδους ενότητας της ρηχής κορεσμένης ζώνης (2-62B, 2-63B, 2-64B). Οι μέγιστες συγκεντρώσεις χλωριωμένων διαλυτών που ανιχνεύθηκαν στο υπόγειο νερό, μεταξύ του 1993 και του 2002, ήταν 9,44 mg/L TCE τον Ιούλιο του 1997 και 1,6 mg/L cis-DCE τον Δεκέμβριο του 1993 στο φρέαρ παρακολούθησης 2-62B, το οποίο βρίσκεται περίπου 30,5 έως 36,6 m ανάντη του σημείου όπου υπήρχε στο παρελθόν το εδαφικό κοίλωμα. Κατά τη διάρκεια της αξιολόγησης της φυσικής εξασθένησης στον ρυπασμένο χώρο FTA-2, δεν βρέθηκαν ενδείξεις ύπαρξης μη υδατικής φάσης (Parsons ES, 1999a). Ως άξονας συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης για το συγκεκριμένο περιστατικό ορίζεται ο άξονας συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης με TCE το 1997. Κατά μήκος αυτού του άξονα υπάρχουν δύο φρέατα παρακολούθησης εκτός της περιοχής της πηγής (B97-43s και 2-355B). Στους Πίνακες 5.14 και 5.15 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν σε φρέατα παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 1997 και το 2002, αντίστοιχα.

**Βιομετασχηματισμός των ρύπων.** Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι συγκεντρώσεις πετρελαϊκών υδρογονανθράκων που έχουν ανιχνευθεί στο υπόγειο νερό της ρηχής κορεσμένης ζώνης είναι χαμηλές (μικρότερες από 0,007 mg/L) και δεν έχει τεκμηριωθεί ότι λειτουργούν ως δότες ηλεκτρονίων. Το έδαφος έχει υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη με μέση τιμή κλάσματος οργανικού άνθρακα  $f_{oc}=0,00813$ , που είναι πιθανό να λειτουργεί ως δότης ηλεκτρονίων για την αναγωγική αποχλωρίωση των χλωροαιθενίων. Όπως φαίνεται στους Πίνακες 5.14 και 5.15, οι τιμές των συγκεντρώσεων του PCE είναι πολλές τάξεις μεγέθους

μικρότερες από αυτές του TCE. Έτσι, θεωρείται ότι αρχικά διέρρευσαν PCE και TCE, δηλαδή το TCE δεν έχει προκύψει μόνο από την αναγωγική αποχλωρίωση του PCE (Parsons ES, 2009).

Πίνακας 5.14 Μετρήσεις συγκεντρώσεων σε φρέατα παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 1997

ΦΡΕΑΡ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΗΓΗ (m)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (mg/L)			
		PCE	TCE	cis-DCE	VC
2-62B	0	0,0061	9,44	1,2	0,0017
B97-43s	168	0,000005*	1,49	0,183	0,000005*
2-355B	328	0,000005*	0,344	0,05	0,000005*

PCE= Τετραχλωροαιθέριο, TCE= Τριχλωροαιθέριο, cis-DCE= cis-1,2-Διχλωροαιθέριο,

VC= Βινυλοχλωρίδιο

B: ρηχή κορεσμένη ζώνη (USZ)

s: άνω αμμώδης ενότητα της USZ

\*Η συγκέντρωση θεωρήθηκε ίση με το ήμισυ του ορίου ανίχνευσης 0,00001 mg/L

Πίνακας 5.15 Μετρήσεις συγκεντρώσεων σε φρέατα παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 2002

ΦΡΕΑΡ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΗΓΗ (m)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (mg/L)			
		PCE	TCE	cis-DCE	VC
2-62B	0	0,00746	9,33	0,977	0,00291
B97-43s	168	0,00089	0,57	0,0678	0,00008*
2-355B	328	0,00056	0,0991	0,0139	0,00008*

PCE= Τετραχλωροαιθέριο, TCE= Τριχλωροαιθέριο, cis-DCE= cis-1,2-Διχλωροαιθέριο,

VC= Βινυλοχλωρίδιο

B: ρηχή κορεσμένη ζώνη (USZ)

s: άνω αμμώδης ενότητα της USZ

\*Η συγκέντρωση θεωρήθηκε ίση με το ήμισυ του ορίου ανίχνευσης 0,00016 mg/L

### 5.3.5 Έργα αποκατάστασης

**Στόχοι αποκατάστασης.** Οι συγκεκριμένοι στόχοι της αποκατάστασης δεν αναφέρονται στη διαθέσιμη βιβλιογραφία. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, θεωρείται ως σημείο συμμόρφωσης το φρέαρ παρακολούθησης του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης 2-393B σε απόσταση 400 m από το φρέαρ παρακολούθησης της πηγής 2-62B. Στόχος της αποκατάστασης θεωρείται ότι είναι η μείωση των συγκεντρώσεων των χλωροαιθινίων στο υπόγειο νερό στο σημείο συμμόρφωσης κάτω από τη μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση στο πόσιμο νερό (TCE: 0,005 mg/L, cis-DCE: 0,070 mg/L και VC: 0,002 mg/L).

**Τύπος – πρόοδος έργων.** Στον χώρο FTA-2, από τον Δεκέμβριο του 1993 εφαρμόζεται στον χώρο παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση. Πριν τον Οκτώβριο του 2003, δεν είχαν εφαρμοστεί επεμβατικές μέθοδοι αποκατάστασης. Κατά τη διάρκεια του Οκτωβρίου 2003, ξεκίνησε πιλοτική μελέτη ενισχυμένης βιοαποκατάστασης, με τη χρήση φυτικού ελαίου ως υποστρώματος (δηλ. πρωτογενή δότη ηλεκτρονίων) στην περιοχή της πηγής, με σκοπό να μειωθούν και πιθανόν να απομακρυνθούν οι εναπομένουσες πηγές PCE και TCE.

### 5.3.6 Προσομοίωση με το λογισμικό BIOCHLOR

Προτού παρουσιαστεί η προσομοίωση του περιστατικού της αεροπορικής βάσης Tinker (χώρος FTA-2), που πραγματοποιήθηκε με το BIOCHLOR, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπαρχουσών μελετών.

**Αποτελέσματα υπαρχουσών μελετών για το περιστατικό.** Σύμφωνα με μελέτη της Parsons ES (1999b), που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των αριθμητικών μοντέλων MODFLOW και MT3D εκτιμήθηκε ότι η απόσταση σταθεροποίησης της ρύπανσης με TCE είναι 770 m για το έτος 2032 (χρόνος σταθεροποίησης TOS=70 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής). Σε μελέτη της Parsons ES (2009) το περιστατικό αξιολογήθηκε από τρεις σκοπιές: 1) την τάση (αυξητική, φθίνουσα, σταθερή) της χρονικής μεταβολής των συγκεντρώσεων στα φρέατα παρακολούθησης της περιοχής της πηγής και των διαλυμένων ρύπων και τη συνολική εκτίμηση της σταθερότητας της ρύπανσης, 2) τον απαιτούμενο χρόνο για τη μείωση όλων των συγκεντρώσεων κάτω από τις μέγιστες επιτρεπτές στο πόσιμο νερό σε όλον τον υδροφορέα (όρια MCL) για διαφορετικούς συντελεστές απομείωσης  $1^{15}$  τάξης της συγκέντρωσης στην πηγή και 3) την προσομοίωση με το BIOCHLOR για την εκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου για την επίτευξη των ορίων MCL σε όλον τον υδροφορέα για αρχική συγκέντρωση TCE 1100 mg/L (ίσω με την υδατική διαλυτότητα του TCE και συντελεστή απομείωσης  $1^{15}$  τάξης  $k_s=0,136 \text{ y}^{-1}$ ). Τα αντίστοιχα αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα: 1) η έκταση της ρύπανσης έχει την τάση να αυξηθεί στο μέλλον, 2) ο χρόνος που απαιτείται για την επίτευξη των ορίων MCL σε όλον τον υδροφορέα ποικίλλει από 96 έως πάνω από 217 έτη για διαφορετικά σενάρια χρονικής μεταβολής των συγκεντρώσεων στην πηγή. 3) Με το BIOCHLOR υπολογίστηκε ότι ο χρόνος που απαιτείται για να επιτευχθούν τα όρια MCL σε όλο τον υδροφορέα είναι 91 χρόνια (έτος 2053). Παρακάτω, περιγράφεται η προσομοίωση του περιστατικού που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας.

**Λεδομένα εισόδου στο μοντέλο BIOCHLOR.** Η μεταφορά των διαλυμένων ρύπων, στη ρηχή κορεσμένη ζώνη του υδροφορέα, από την εστία της ρύπανσης, με βορειοδυτική κατεύθυνση, μέχρι το σημείο συμμόρφωσης (2-393B), προσομοιώθηκε με το μοντέλο



BIOCHLOR, θεωρώντας όλο το πεδίο ως μία ομοιογενή αναερόβια ζώνη. Στόχος της προσομοίωσης είναι να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης στην αποκατάσταση του συγκεκριμένου περιστατικού. Όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με την παραδοχή ότι δεν έχουν εφαρμοστεί επεμβατικές μέθοδοι αποκατάστασης στον ρυπασμένο χώρο. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, οι συγκεντρώσεις του PCE αγνοήθηκαν και θεωρήθηκε ότι στην πηγή υπήρχε αρχικά μόνο TCE.

Ο Christenson, S. (1992) αναφέρει ότι η διάμεση τιμή του πορώδους στον υδροφορέα Garber-Wellington εκτιμάται ότι είναι  $n=0,22$ . Στις μελέτες Parsons ES (1999b) και Parsons ES (2009) χρησιμοποιήθηκε η τιμή  $n=0,2$  για τη μοντελοποίηση του υδροφορέα. Η ίδια τιμή θα χρησιμοποιηθεί και σε αυτήν τη διπλωματική. Για μια μέση υδραυλική κλίση  $i=0,006$  και υδραυλική αγωγιμότητα ίση με το γεωμετρικό μέσο των μετρήσεων στην άνω αμμώδη ενότητα της ρηχής κορεσμένης ζώνης  $K=4,939 \times 10^{-5}$  m/s, η ταχύτητα μεταγωγής του υπόγειου νερού υπολογίστηκε από τη σχέση  $v_s = Ki/n$ , ίση με 46,7 m/y.

Το μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης ορίζεται για αυτό το περιστατικό ίσο με τη μέγιστη απόσταση μεταξύ του φρέατος παρακολούθησης που αντιπροσωπεύει την πηγή (2-62B) και της καμπύλης ίσων συγκεντρώσεων των 0,01 mg/L. Το 1997, το μήκος εξάπλωσης της ρύπανσης ήταν  $L_p=465$  m. Βάσει αυτής της τιμής και χρησιμοποιώντας τη διορθωμένη σχέση των Xu & Eckstein (1995):  $\alpha_x = 0,82 \times (\log L_p)^{2,446}$  (διόρθωση: Al-Suwaiyan, 1996), υπολογίστηκε συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς ίσος με  $\alpha_x=9$  m. Ο λόγος των συντελεστών οριζόντιας εγκάρσιας/διαμήκους μηχανικής διασποράς θεωρήθηκε ίσος με 0,1 (Gelhar *et al.*, 1992). Σύμφωνα με τη θεώρηση της Parsons ES (2009), ο λόγος των συντελεστών κατακόρυφης εγκάρσιας/διαμήκους μηχανικής διασποράς λήφθηκε ίσος με μια μικρή τιμή 0,001 για να προσομοιωθεί συντηρητικά η κατακόρυφη εγκάρσια μηχανική διασπορά.

Ο συντελεστής υστέρησης κάθε ρύπου υπολογίζεται από τη σχέση  $R = 1 + \rho_d K_p / n$ , όπου  $\rho_d$ = ξηρή πυκνότητα του εδάφους,  $K_p$ = συντελεστής διαχωρισμού και  $n$ =πορώδες. Ο συντελεστής  $K_p$  προσδιορίζεται μέσω της σχέσης:  $K_p = K_{oc} \times f_{oc}$ , όπου  $K_{oc}$ = συντελεστής διαχωρισμού μεταξύ της υδατικής φάσης και του οργανικού κλάσματος της στερεάς φάσης και  $f_{oc}$ =κλάσμα οργανικού άνθρακα. Η ξηρή πυκνότητα του εδάφους θεωρήθηκε ίση με  $\rho_d=1,65$  kg/L, σύμφωνα με την εκτίμηση της Parsons ES (1999a). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μέση τιμή του κλάσματος οργανικού άνθρακα που μετρήθηκε μέσω εδαφικών δοκιμών ήταν  $f_{oc}=0,00813$ . Οι τιμές των συντελεστών διαχωρισμού  $K_{oc}$  των TCE και cis-DCE είναι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για τον χώρο Bendix στην Ενότητα 5.1.6. Ο κοινός συντελεστής υστέρησης

των χλωροαιθινίων για το BIOCHLOR προέκυψε ίσος με 2,915 από τη διάμεση τιμή των επιμέρους συντελεστών υστέρησης (Πίνακας 5.16).

Πίνακας 5.16 Εκτίμηση της τιμής του κοινού συντελεστή υστέρησης των χλωροαιθινίων

ΕΝΩΣΗ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ $K_{oc}$ (L/kg)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ R
TCE	107	8,18
cis-DCE	49	4,29
VC	98	7,57
αιθέριο	8	1,54
<b>Διάμεση τιμή (κοινός συντελεστής υστέρησης R των χλωροαιθινίων)</b>		<b>2,915</b>

*TCE= Τριχλωροαιθέριο, cis-DCE= cis-1,2- Διχλωροαιθέριο, VC= Βινυλοχλωρίδιο*

**Βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου BIOCHLOR.** Οι συγκεντρώσεις του 1997 (Πίνακας 5.14) χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου και αυτές του 2002 (Πίνακας 5.15) για την επαλήθευσή του. Η ακριβής ημερομηνία έναρξης της διαρροής του TCE στο υπόγειο νερό και η ακριβής συγκέντρωση που διέρρευσε είναι άγνωστες. Το έτος έναρξης των πυροσβεστικών ασκήσεων στο εδαφικό κοίλωμα του χώρου FTA-2 (1962) θεωρήθηκε ότι είναι μια συντηρητική επιλογή έναρξης της διαρροής. Επιπλέον, για τις ανάγκες της προσομοίωσης θεωρήθηκε ότι η περιοχή της πηγής αντιπροσωπεύεται από το φρέαρ παρακολούθησης 2-62B, αφού είναι το φρέαρ παρακολούθησης όπου έχουν ανιχνευθεί ιστορικά οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις.

Το πάχος της πηγής θεωρήθηκε ίσο με το διάστημα ελέγχου του φρέατος παρακολούθησης 2-62B της ρηχής κορεσμένης ζώνης, δηλαδή  $Z=3$  m (από 4,3 έως 7,3 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους). Το πλάτος της πηγής υπολογίστηκε γραφικά από τις καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων του TCE του 1997, σχεδιάζοντας μια γραμμή κατά πλάτος της καμπύλης των μέγιστων συγκεντρώσεων (1 mg/L), εγκάρσια στον καθορισμένο άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης (γαλάζια γραμμή στο Σχήμα 5.43). Έτσι, το πλάτος της πηγής τέθηκε ίσο με  $Y=38,1$  m.

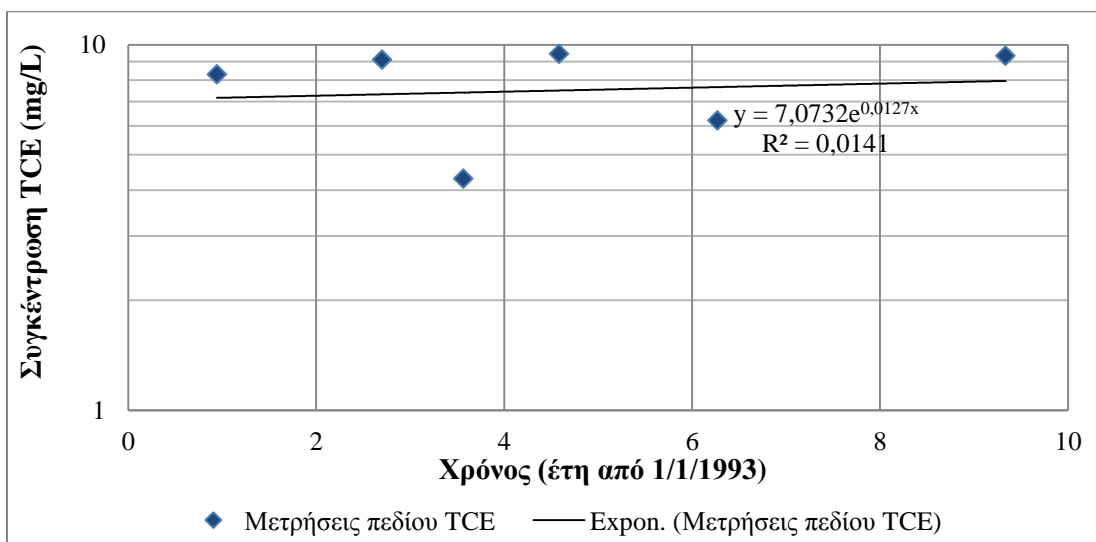
Εφόσον για το φρέαρ παρακολούθησης 2-62B, που θεωρήσαμε ότι αντιπροσωπεύει την περιοχή της πηγής, διατίθενται μετρήσεις των συγκεντρώσεων του TCE από 1993 έως το 2002, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.17, εξετάστηκε αν οι συγκεντρώσεις αυτές αυξάνονται, μειώνονται ή παραμένουν σταθερές με τον χρόνο.

Από την εκθετική γραμμή ελαχίστων τετραγώνων του ημιλογαριθμικού διαγράμματος της συγκέντρωσης του TCE στο φρέαρ παρακολούθησης της πηγής (2-62B) (Σχήμα 5.44), προέκυψε

συντελεστής απομείωσης  $1^{15}$  τάξης της συγκέντρωσης στην πηγή ίσος με  $k_s = -0,0127 \text{ y}^{-1}$ . Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι οι συγκεντρώσεις στην πηγή αυξάνονται με τον χρόνο. Όμως, όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 4.1, το BIOCHLOR δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης πηγής είτε σταθερής είτε μειούμενης έντασης. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, έγινε η παραδοχή ότι η πηγή έχει σταθερή ένταση από την έναρξη της διαρροής, με συγκέντρωση TCE ίση με τη μέγιστη (9,44 mg/L) που έχει ανιχνευθεί σύμφωνα με τα διαθέσιμα δεδομένα από το 1993 έως το 2002.

Πίνακας 5.17 Συγκεντρώσεις τριχλωροαιθενίου (TCE) που μετρήθηκαν στο φρέαρ παρακολούθησης της περιοχής της πηγής (2-62B)

ΦΡΕΑΡ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ 2-62B		
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΕΤΗ ΑΠΟ 1/1/1993	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ TCE (mg/L)
10/12/1993	0,944	8,3
13/09/1995	2,703	9,1
24/07/1996	3,567	4,3
31/07/1997	4,583	9,44
8/4/1999	6,272	6,2
1/5/2002	9,336	9,33



Σχήμα 5.44 Ημιλογαριθμικό διάγραμμα της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) στο φρέαρ παρακολούθησης της πηγής (2-62B) σε σχέση με τον χρόνο, θεωρώντας ως αφετηρία μέτρησης του χρόνου την ημερομηνία 1/1/1993

Χρησιμοποιήθηκαν χρόνοι προσομοίωσης 35 έτη για τη βαθμονόμηση του μοντέλου (από το 1962 έως το 1997) και 40 έτη για την επαλήθευσή του (από το 1962 έως το 2002). Το πλάτος της περιοχής υπό προσομοίωση θεωρήθηκε ίσο με τη μέγιστη απόσταση των καμπυλών ίσων

συγκεντρώσεων TCE των 0,010 mg/L εγκάρσια στη διεύθυνση της ροής το 1997. Μετρήθηκε γραφικά από το Σχήμα 5.43 ίσο με 156 m. Η απόσταση του φρέατος παρακολούθησης της πηγής (2-62B) από το σημείο συμμόρφωσης (2-393B) είναι 400 m. Έτσι, οι διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο είναι 156 m x 400 m.

Πίνακας 5.18 Δεδομένα εισόδου του BIOCHLOR για τον υπολογισμό των συντελεστών βιομετασχηματισμού, τη βαθμονόμηση και την επαλήθευση του μοντέλου

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ
Υδραυλική αγωγιμότητα- K (m/y)	1557,6
(Υδραυλική αγωγιμότητα- K (m/s))	$4,939 \times 10^{-5}$
Υδραυλική κλίση- i	0,006
Πορώδες- n	0,20
Συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_x$ (m)	9
Λόγος συντελεστή οριζόντιας εγκάρσιας μηχανικής διασποράς/συντελεστή διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_y/\alpha_x$	0,01
Λόγος συντελεστή κατακόρυφης εγκάρσιας μηχανικής διασποράς/συντελεστή διαμήκους μηχανικής διασποράς- $\alpha_z/\alpha_x$	0,001
Ξηρή πυκνότητα εδάφους- $\rho_d$ (kg/L)	1,65
Κλάσμα οργανικού άνθρακα- $f_{oc}$	0,00813
Μέσος συντελεστής υστέρησης των χλωροαιθινίων- R	2,92
Συντελεστές βιομετασχηματισμού- $\lambda$ ( $y^{-1}$ ) (αρχικές τιμές)*	
TCE → cis-DCE	1,095
cis-DCE → VC	0,73
VC → αιθέριο	1,095
Συντελεστές βιομετασχηματισμού- $\lambda$ ( $y^{-1}$ ) (τελικές τιμές)**	
TCE → cis-DCE	0,5
cis-DCE → VC	2,5
VC → αιθέριο	100
Χρόνος προσομοίωσης για τη βαθμονόμηση του μοντέλου- t (y)	35
Χρόνος προσομοίωσης για την επαλήθευση του μοντέλου- t (y)	40
Μήκος περιοχής υπό προσομοίωση (m)	400
Πλάτος περιοχής υπό προσομοίωση (m)	156
Πάχος πηγής στην κορεσμένη ζώνη- Z (m)	3
Πλάτος πηγής- Y (m)	38,1
Αρχικές συγκεντρώσεις στην πηγή- $C_0$ (mg/L)	
TCE	9,44
Συντελεστής απομείωσης της συγκέντρωσης της πηγής- $k_s$ ( $y^{-1}$ )	0

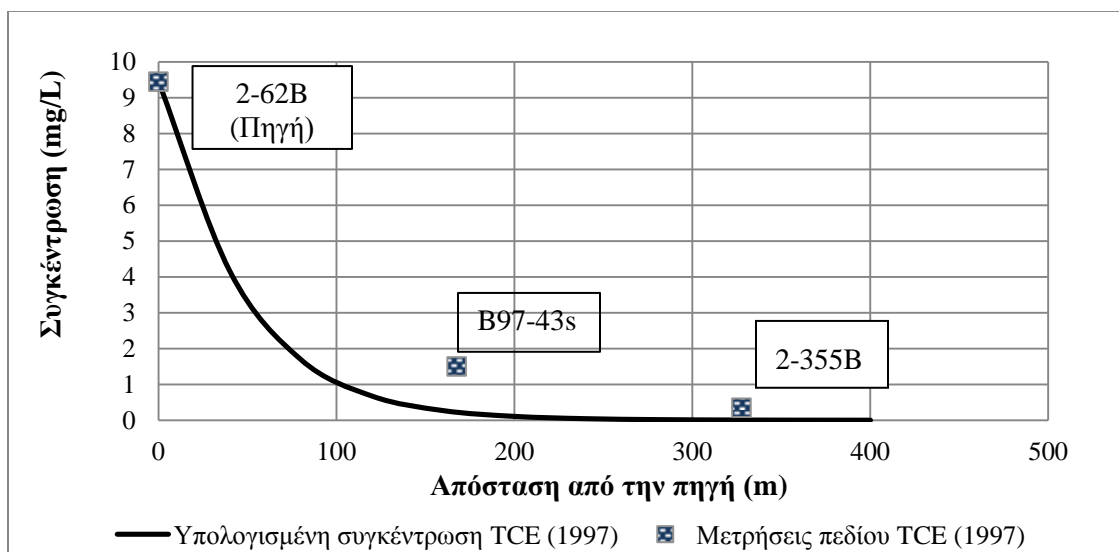
TCE= Τριχλωροαιθέριο, DCE= cis-1,2- Διχλωροαιθέριο, VC= Βινυλοχλωρίδιο

\*Βιβλιογραφικές τιμές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο BIOCHLOR για τον υπολογισμό της κατανομής των συγκεντρώσεων των χλωροαιθινίων το 1997.

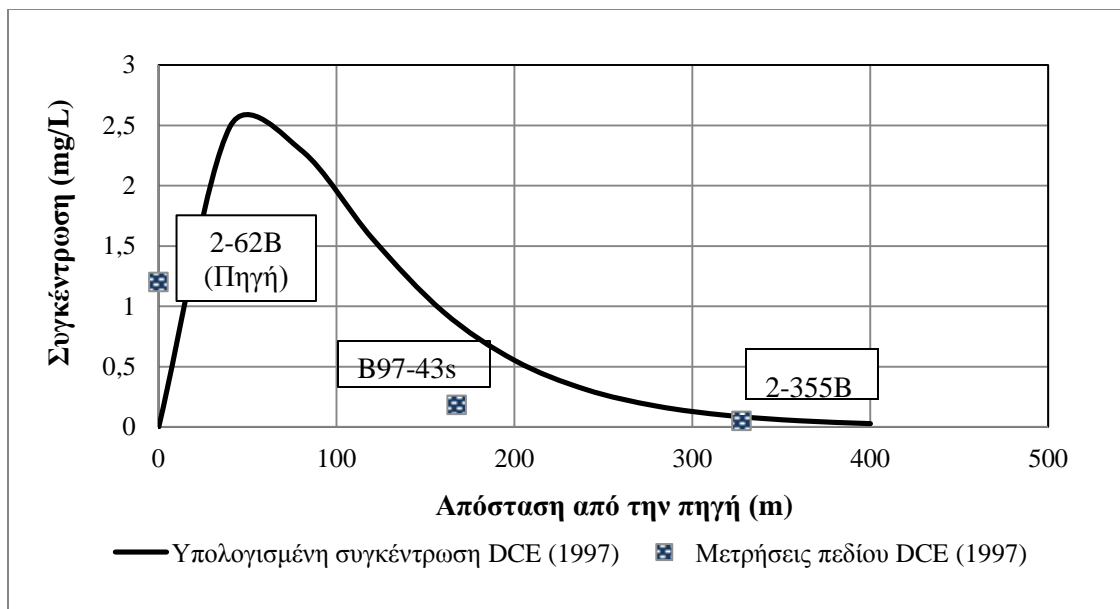
\*\*Τιμές που υπολογίστηκαν με διαδοχικές δοκιμές με το BIOCHLOR μέσω της προσαρμογής των υπολογισμένων από το BIOCHLOR κατανομών των συγκεντρώσεων στις μετρήσεις πεδίου του 1997. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου για την επαλήθευση του μοντέλου (2002) και για την εκτίμηση του χρόνου και της απόστασης σταθεροποίησης της ρύπανσης.

**Εκτίμηση συντελεστών βιομετασχηματισμού των χλωροαιθενίων.** Αρχικά, υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθενίων κατά μήκος του υποτιθέμενου άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης με τα δεδομένα εισόδου που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.18.

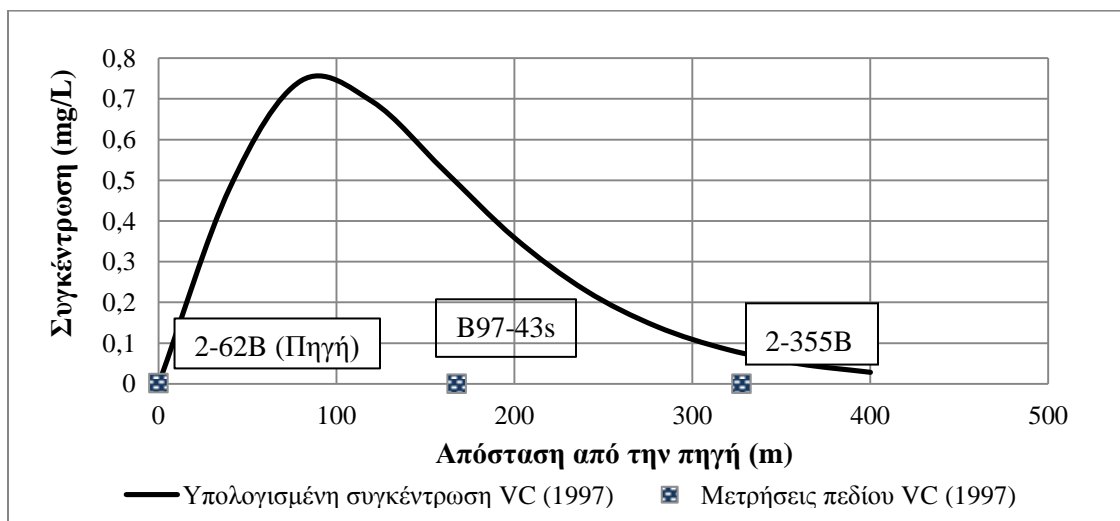
Όπως και στο περιστατικό του χώρου SS-45 (Ενότητα 5.2.6), οι αρχικές τιμές των συντελεστών βιομετασχηματισμού τέθηκαν ίσες με τις μέσες τιμές των συντελεστών βιομετασχηματισμού που κατέγραψαν οι Suarez & Rifai (1999) για συνθήκες αναγωγικής αποχλωρίωσης από μελέτες στο πεδίο (Πίνακας 4.3). Στα Σχήματα 5.45 έως 5.47 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του BIOCHLOR σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου του 1997 (Πίνακας 5.14). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.45, οι υπολογισμένες με το BIOCHLOR συγκεντρώσεις του TCE στα κατάντη της ρυπασμένης έκτασης είναι αρκετά μικρότερες από τις αντίστοιχες μετρήσεις πεδίου του 1997. Επιπλέον, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.46, η υπολογισμένη με το BIOCHLOR συγκέντρωση του DCE στο φρέαρ παρακολούθησης B97-43s είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη μετρημένη. Τέλος, η χρήση των βιβλιογραφικών τιμών για τους συντελεστές βιομετασχηματισμού οδηγεί σε μεγάλη υπερεκτίμηση των συγκεντρώσεων του VC.



Σχήμα 5.45 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού από τη βιβλιογραφία, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 1997



Σχήμα 5.46 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του *cis*-1,2-διχλωροαιθενίου (*cis*-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού από τη βιβλιογραφία, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 1997

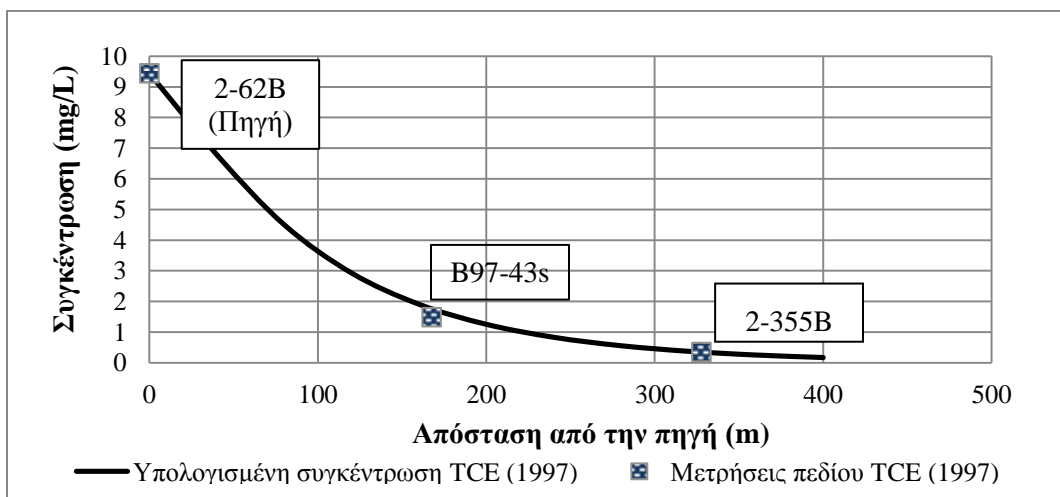


Σχήμα 5.47 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού από τη βιβλιογραφία, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 1997

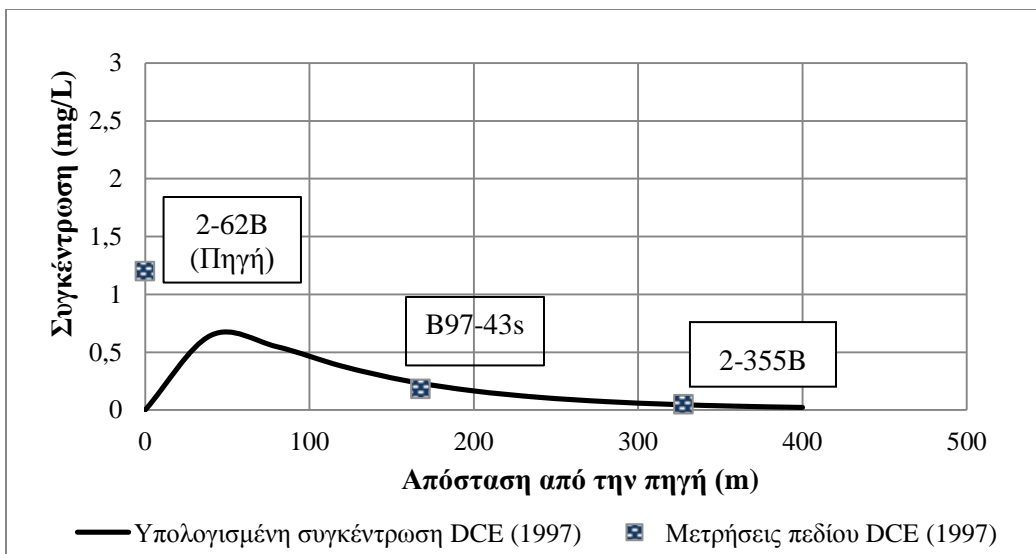
Έτσι, κρίθηκε απαραίτητο να υπολογιστούν εξειδικευμένοι για το περιστατικό συντελεστές βιομετασχηματισμού των TCE, *cis*-DCE και VC, με το λογισμικό BIOCHLOR μέσω διαδοχικών δοκιμών, με τη μέθοδο που περιγράφεται στην Ενότητα 4.3.2. Κρατώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους εισόδου (Πίνακας 5.18), ο συντελεστής βιομετασχηματισμού του TCE μειώθηκε από την αρχική τιμή του  $1,095 \text{ y}^{-1}$  μέχρι οι υπολογισμένες συγκεντρώσεις του TCE να

προσαρμοστούν στις μετρήσεις πεδίου του 1997. Έτσι, προέκυψε η τελική τιμή  $\lambda_{TCE}=0,5 \text{ y}^{-1}$ . Στη συνέχεια, με δεδομένο αυτόν τον συντελεστή βιομετασχηματισμού του TCE, μεταβλήθηκε ο συντελεστής βιομετασχηματισμού του cis-DCE από την αρχική τιμή του  $0,73 \text{ y}^{-1}$  μέχρι οι υπολογισμένες συγκεντρώσεις του cis-DCE να προσαρμοστούν στις μετρήσεις πεδίου του 1997. Έτσι, προέκυψε η τελική τιμή  $\lambda_{\text{cis-DCE}}=2,5 \text{ y}^{-1}$ . Τέλος, με δεδομένους τους συντελεστές βιομετασχηματισμού των TCE και cis-DCE ( $0,5$  και  $2,5 \text{ y}^{-1}$ , αντίστοιχα), μεταβλήθηκε ο συντελεστής βιομετασχηματισμού του VC από την αρχική τιμή του,  $1,095 \text{ y}^{-1}$ , μέχρι οι υπολογισμένες συγκεντρώσεις του cis-DCE να προσαρμοστούν στις μετρήσεις πεδίου του 1997. Έτσι, προέκυψε η τελική τιμή  $\lambda_{VC}=100 \text{ y}^{-1}$ , η οποία όμως δεν είναι ρεαλιστική για συνθήκες αναγωγικής αποχλωρίωσης. Ο μέγιστος συντελεστής βιομετασχηματισμού 1<sup>ης</sup> τάξης του VC που έχει καταγραφεί για συνθήκες αναγωγικής αποχλωρίωσης από τους Suarez & Rifai, 1999 είναι  $2,555 \text{ y}^{-1}$  (Πίνακας 4.3). Στα Σχήματα 5.48 έως 5.50 παρουσιάζονται οι υπολογισμένες με το BIOCHLOR συγκεντρώσεις των TCE, cis-DCE και VC για το έτος 1997, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τη χρήση των συντελεστών βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν όπως περιγράφεται παραπάνω, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου.

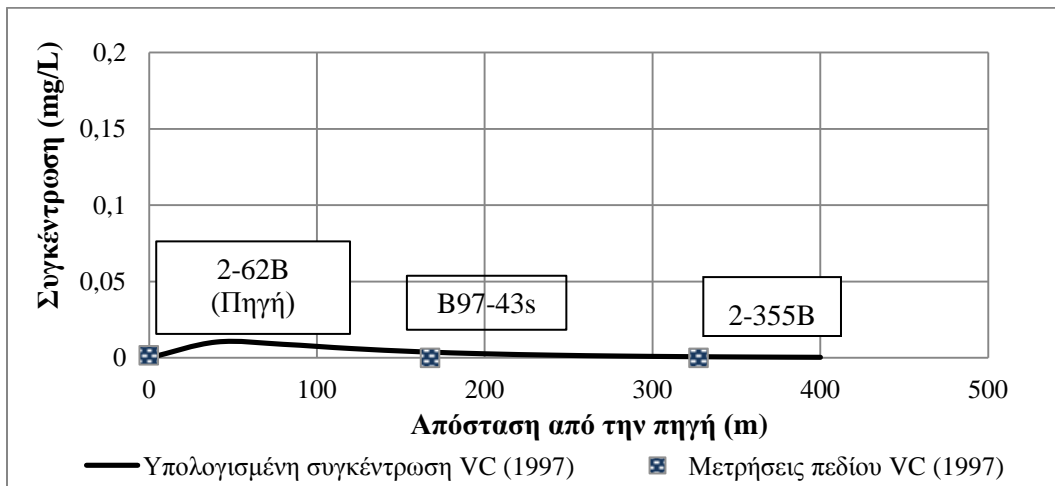
Όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.48 έως 5.50 οι συγκεντρώσεις που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR, με τις τελικές τιμές των συντελεστών βιομετασχηματισμού που φαίνονται στον Πίνακα 5.18, σε απόσταση 328 m από την πηγή, ταιριάζουν με τις μετρημένες στο πλέον κατάντη φρέαρ παρακολούθησης 2-355B. Εδώ ολοκληρώνεται το στάδιο της βαθμονόμησης του μοντέλου.



Σχήμα 5.48 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 1997



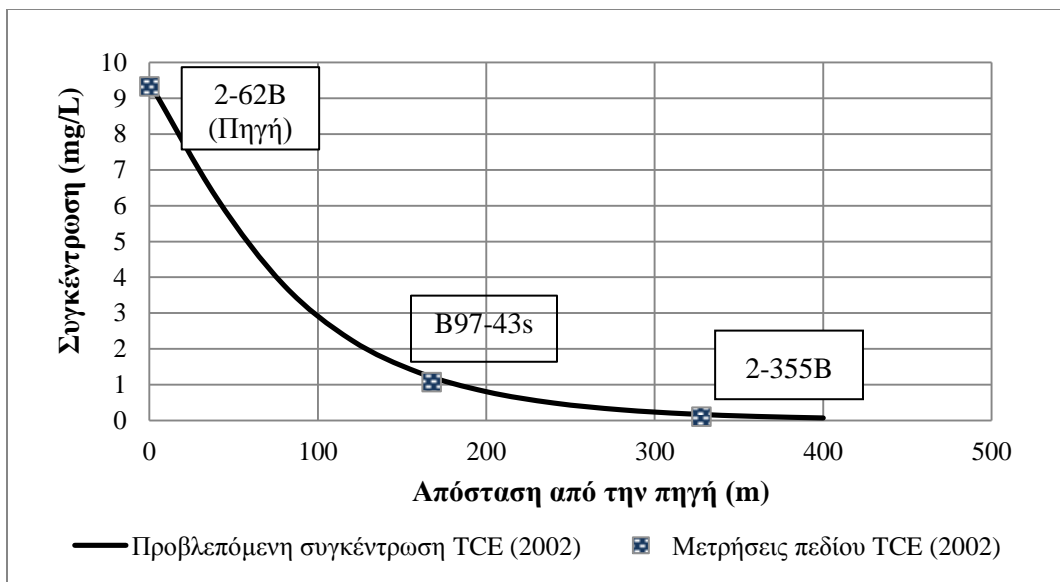
Σχήμα 5.49 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του *cis*-1,2-διχλωροαιθενίου (*cis*-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 1997



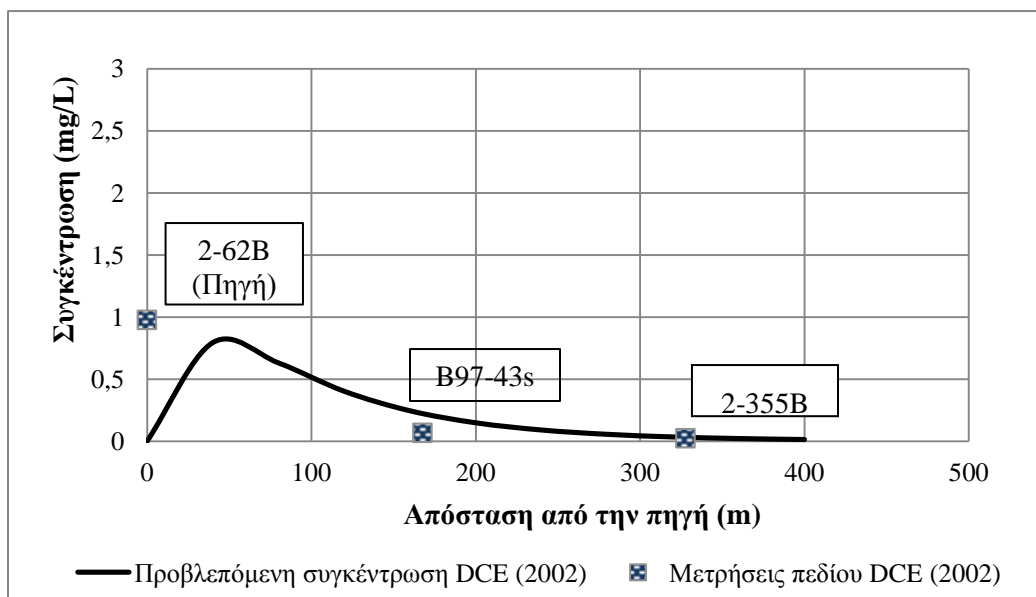
Σχήμα 5.50 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, με τους συντελεστές βιομετασχηματισμού που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 1997

Στη συνέχεια, κρατώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους εισόδου σταθερές, ο χρόνος προσομοίωσης αυξήθηκε από τα 35 στα 40 έτη, για να εξεταστεί αν το μοντέλο επαληθεύεται για τις μετρήσεις πεδίου του 2002. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.51 έως 5.53, οι συγκεντρώσεις που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR, με τα δεδομένα εισόδου που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.18, σε απόσταση 328 m από την πηγή ταιριάζουν με τις μετρημένες στο πλέον κατάντη φρέαρ παρακολούθησης 2-355B. Επομένως, το μοντέλο επαληθεύεται.

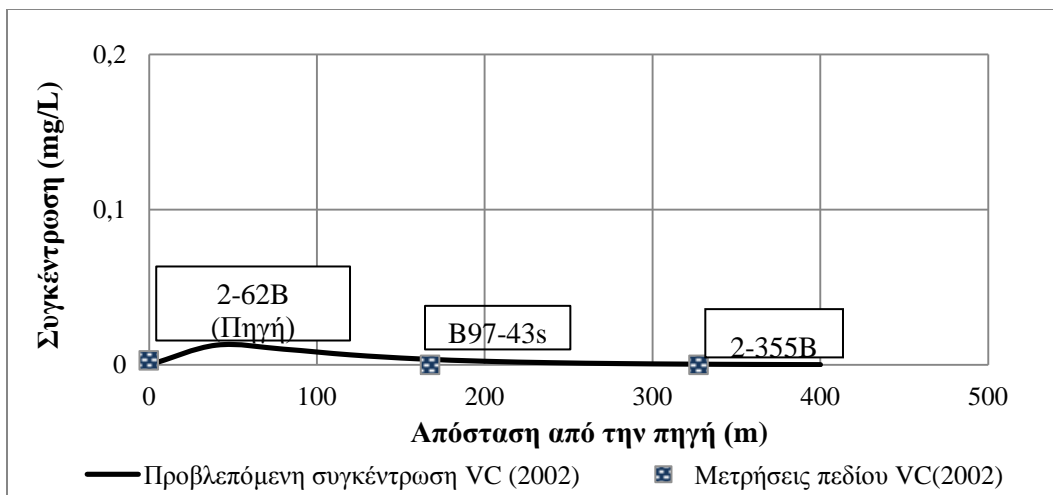




Σχήμα 5.51 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 2002

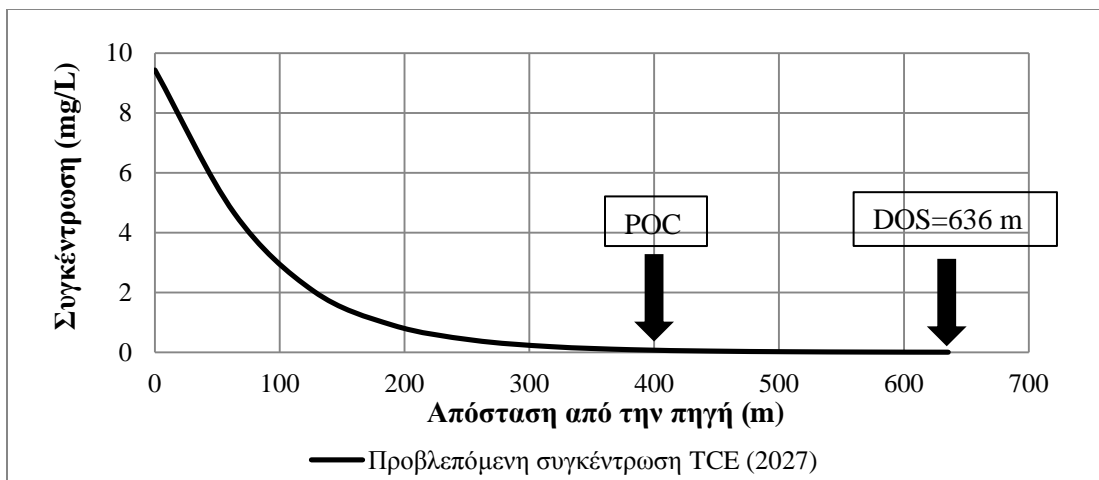


Σχήμα 5.52 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 2002

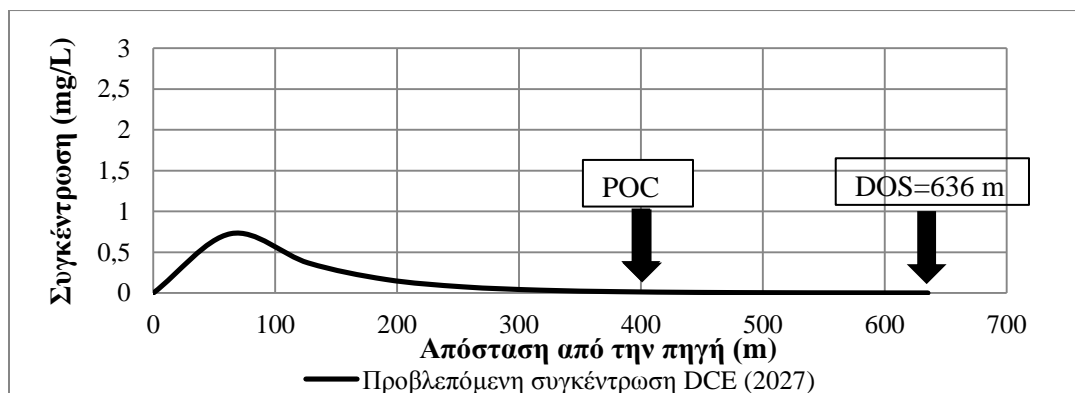


Σχήμα 5.53 Υπολογισμένη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου στα φρέατα παρακολούθησης 2-62B, B97-43s και 2-355B για το έτος 2002

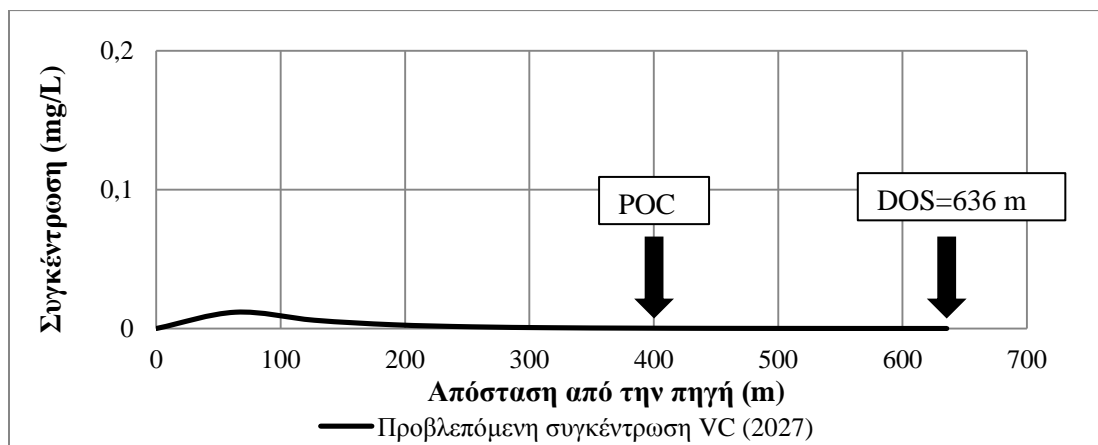
**Υπολογισμός του χρόνου (TOS) και της απόστασης σταθεροποίησης (DOS) της ρυπασμένης έκτασης.** Τα υδρογεωλογικά δεδομένα, τα δεδομένα για τη διασπορά, τη ρόφιση, τον βιομετασχηματισμό και την πηγή είναι ίδια με αυτά του βαθμονομημένου μοντέλου (Πίνακας 5.18). Το μήκος της περιοχής υπό προσομοίωση τέθηκε αρκετά μεγάλο ώστε να καλύπτει όλη τη ρυπασμένη έκταση. Το πλάτος του μοντέλου παρέμεινε αμετάβλητο. Κρατώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους εισόδου αυξάνεται σταδιακά ο χρόνος προσομοίωσης από το μηδέν μέχρι να παρατηρηθεί ότι το TCE παύει να εξαπλώνεται κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης. Τότε θεωρείται ότι η ρυπασμένη με TCE έκταση έχει φτάσει σε συνθήκες μόνιμης μεταφοράς. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται διαδοχικά για τα cis-DCE και VC. Με αυτόν τον τρόπο, προέκυψε ότι ο χρόνος σταθεροποίησης της ρυπασμένης έκτασης είναι TOS= 65 χρόνια, δηλαδή η ρύπανση θα σταθεροποιηθεί το 2027. Στη συνέχεια, μεταβλήθηκε σταδιακά το μήκος της περιοχής υπό προσομοίωση, μέχρις ότου οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθενίων στο πλέον κατάντη σημείο του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης γίνουν μικρότερες ή ίσες με τα μέγιστα επιτρεπτά όρια στο πόσιμο νερό (TCE: 0,005 mg/L, cis-DCE: 0,070 mg/L και VC:0,002 mg/L). Έτσι, προέκυψε ότι η απόσταση σταθεροποίησης της ρυπασμένης έκτασης είναι DOS= 636 m, που είναι μεγαλύτερη από την απόσταση του σημείου συμμόρφωσης από την πηγή. Άρα, προκύπτει ότι απαιτείται η εφαρμογή επεμβατικών μεθόδων για την αποκατάσταση του ρυπασμένου χώρου FTA-2 της αεροπορικής βάσης Tinker. Αυτό το αποτέλεσμα είναι σύμφωνο με τα τωρινά δεδομένα. Στα Σχήματα 5.54 έως 5.56 παρουσιάζονται οι προβλεπόμενες κατανομές των συγκεντρώσεων των χλωροαιθενίων κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης μετά το 2027, οπότε σταθεροποιείται η ρύπανση.



Σχήμα 5.54 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του τριχλωροαιθενίου (TCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 2027, όταν σταθεροποιείται η ρύπανση



Σχήμα 5.55 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του cis-1,2-διχλωροαιθενίου (cis-DCE) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 2027, όταν σταθεροποιείται η ρύπανση



Σχήμα 5.56 Προβλεπόμενη κατανομή της συγκέντρωσης του βινυλοχλωριδίου (VC) κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης το 2027, όταν σταθεροποιείται η ρύπανση

### 5.3.7 Αναλύσεις ευαισθησίας

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται οι αναλύσεις ευαισθησίας, που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό να καθοριστεί η επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων εισόδου στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το συγκεκριμένο περιστατικό ρύπανσης. Οι αναλύσεις ευαισθησίας πραγματοποιήθηκαν για την υδραυλική αγωγιμότητα (K), τον κοινό συντελεστή υστέρησης των χλωροαιθινίων (R) και τους συντελεστές βιομετασχηματισμού 1<sup>ης</sup> τάξης ( $\lambda$ ) των TCE, cis-DCE και VC.

Η διαδικασία με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις ευαισθησίας είναι ίδια με αυτή που ακολουθήθηκε για την πρώην αεροπορική βάση England (Ενότητα 5.2.7). Συγκεκριμένα, τροποποιήθηκε το βαθμονομημένο μοντέλο μεταβάλλοντας καθεμία από τις προαναφερθείσες παραμέτρους και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά του βαθμονομημένου μοντέλου. Ο χρόνος προσομοίωσης στις αναλύσεις ευαισθησίας τέθηκε ίσος με 40 έτη, ακριβώς όσο ήταν και για το βαθμονομημένο μοντέλο, ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση της μεταβολής κάθε παραμέτρου ανεξάρτητα. Πραγματοποιήθηκαν έξι αναλύσεις ευαισθησίας με τις παρακάτω μεταβολές:

- 1) Η υδραυλική αγωγιμότητα τέθηκε ίση με την ελάχιστη μετρημένη τιμή στην άνω αμμώδη ενότητα της κορεσμένης ζώνης ( $K=2,293 \times 10^{-5}$  m/s).
- 2) Η υδραυλική αγωγιμότητα τέθηκε ίση με τη μέγιστη μετρημένη τιμή στην άνω αμμώδη ενότητα της κορεσμένης ζώνης ( $K=9,878 \times 10^{-5}$  m/s).
- 3) Ο συντελεστής υστέρησης τέθηκε ίσος με  $R=1$  (περίπτωση χωρίς ρόφηση).
- 4) Ο συντελεστής υστέρησης διπλασιάστηκε ( $R=5,83$ )
- 5) Οι συντελεστές βιομετασχηματισμού 1<sup>ης</sup> τάξης των TCE, cis-DCE και VC διπλασιάστηκαν ( $\lambda_{TCE}=1 \text{ y}^{-1}$ ,  $\lambda_{cis-DCE}=5 \text{ y}^{-1}$  και  $\lambda_{VC}=200 \text{ y}^{-1}$ ).
- 6) Οι συντελεστές βιομετασχηματισμού 1<sup>ης</sup> τάξης των TCE, cis-DCE και VC υποδιπλασιάστηκαν ( $\lambda_{TCE}=0,25 \text{ y}^{-1}$ ,  $\lambda_{cis-DCE}=1,25 \text{ y}^{-1}$  και  $\lambda_{VC}=50 \text{ y}^{-1}$ ).

Στον Πίνακα 5.19 παρουσιάζονται οι υπολογισμένες συγκεντρώσεις στο σημείο συμμόρφωσης το 2002 για τις έξι παραπάνω περιπτώσεις, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα δεδομένα εξόδου του βαθμονομημένου μοντέλου του βασικού σεναρίου που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 5.3.6 (Πίνακα 5.18).

Πίνακας 5.19 Αποτελέσματα των αναλύσεων ευαισθησίας για τον χώρο FTA-2 της αεροπορικής βάσης Tinker, στην Οκλαχόμα

ΕΝΩΣΗ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ (ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ (mg/L) στο σημείο συμμόρφωσης το 2002 για τις περιπτώσεις:					
		ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ		ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ		ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΒΙΟΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ	
		ίσης με την ελάχιστη μετρημένη τιμή $K=2,293 \times 10^{-5}$ m/s	ίσης με τη μέγιστη μετρημένη τιμή $K=9,878 \times 10^{-5}$ m/s	R=1	R=5,83	υποδιπλάσιων του βασικού σεναρίου	διπλάσιων του βασικού σεναρίου
TCE	0,071686	0,000748	0,472769	0,071721	0,027513	0,471525	0,002365
cis-DCE	0,013216	0,000138	0,087069	0,013222	0,005072	0,086840	0,000436
VC	0,000214	0,000002	0,001411	0,000214	0,000082	0,001407	0,000007

TCE= Τριχλωροαιθέριο, cis-DCE= cis-1,2- Διχλωροαιθέριο, VC= Βινυλοχλωρίδιο

Βασικό σενάριο:  $K=4,939 \times 10^{-5}$  m/s,  $R=2,915$ ,  $\lambda_{TCE}=0,5$  y<sup>-1</sup>,  $\lambda_{cis-DCE}=2,5$  y<sup>-1</sup>,  $\lambda_{VC}=100$  y<sup>-1</sup>

Πίνακας 5.20 Χρόνος και απόσταση σταθεροποίησης της ρύπανσης για τα διαφορετικά σενάρια των αναλύσεων ευαισθησίας

	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ (ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ)	ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ		ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ		ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΒΙΟΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ	
		ίση με την ελάχιστη μετρημένη τιμή $K=2,293 \times 10^{-5}$ m/s	ίση με τη μέγιστη μετρημένη τιμή $K=9,878 \times 10^{-5}$ m/s	R=1	R=5,83	υποδιπλάσιος του βασικού σεναρίου	διπλάσιος του βασικού σεναρίου
TOS (y)	65	75	50	20	90	100	25
DOS (m)	636	343	1123	637	637	1125	363

TOS= Χρόνος σταθεροποίησης της ρύπανσης

DOS= Απόσταση σταθεροποίησης της ρύπανσης

Βασικό σενάριο:  $K=4,939 \times 10^{-5}$  m/s,  $R=2,915$ ,  $\lambda_{TCE}=0,5$  y<sup>-1</sup>,  $\lambda_{cis-DCE}=2,5$  y<sup>-1</sup>,  $\lambda_{VC}=100$  y<sup>-1</sup>

Η τροποποίηση των παραπάνω παραμέτρων εισόδου οδήγησε σε σημαντικές μεταβολές στις υπολογισμένες συγκεντρώσεις των χλωροαιθενίων στο σημείο συμμόρφωσης, με εξαίρεση την περίπτωση που δεν υπάρχει ρόφηση ( $R=1$ ), για την οποία οι υπολογισμένες συγκεντρώσεις στο σημείο συμμόρφωσης το έτος 2002 είναι περίπου ίδιες με αυτές του βαθμονομημένου μοντέλου. Η αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας και άρα της ταχύτητας μεταγωγής έχει σαν αποτέλεσμα την ταχύτερη επέκταση της ρύπανσης και άρα μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στο σημείο συμμόρφωσης το 2002, όπως διαπιστώθηκε και από τις αναλύσεις ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκαν για το δεύτερο περιστατικό (Ενότητα 5.2.7). Η μεταβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στις υπολογισμένες συγκεντρώσεις στο συγκεκριμένο περιστατικό. Ο διπλασιασμός του συντελεστή υστέρησης είχε σαν αποτέλεσμα τη μείωση των συγκεντρώσεων στο σημείο συμμόρφωσης το 2002. Διπλασιάζοντας τους συντελεστές βιομετασχηματισμού, τα διαλυμένα χλωροαιθένια υποβαθμίζονται πιο γρήγορα, άρα προκύπτουν μικρότερες συγκεντρώσεις στο σημείο συμμόρφωσης το 2002.

Στον Πίνακα 5.20 παρουσιάζονται οι χρόνοι και οι αποστάσεις σταθεροποίησης των ρυπασμένων εκτάσεων που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR για τις έξι προαναφερθείσες περιπτώσεις, με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στην αντίστοιχη παράγραφο της Ενότητας 5.3.6. Η αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας οδήγησε σε μείωση του χρόνου και αύξηση της απόστασης σταθεροποίησης. Η μεταβολή του συντελεστή υστέρησης δεν μεταβάλλει την απόσταση σταθεροποίησης, αλλά καθώς ο συντελεστής υστέρησης αυξάνεται, ο χρόνος σταθεροποίησης αυξάνεται, αφού η ρόφηση καθυστερεί το βιομετασχηματισμό των χλωροαιθενίων που θεωρείται ότι συμβαίνει μόνο στην υδατική φάση. Οι συντελεστές βιομετασχηματισμού έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στον χρόνο και την απόσταση σταθεροποίησης. Ο υποδιπλασιασμός των συντελεστών βιομετασχηματισμού αύξησε τον χρόνο σταθεροποίησης στα 100 έτη και την απόσταση σταθεροποίησης στα 1125 m.

### 5.3.8 Σύνοψη-Συμπεράσματα

Στην Ενότητα 5.3 εξετάστηκε η αποκατάσταση του χώρου FTA-2 της αεροπορικής βάσης Tinker στην Οκλαχόμα με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση. Αρχικά, συλλέχθηκαν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την κατάσταση του προβλήματος και την επιλογή των παραμέτρων εισόδου στο λογισμικό BIOCHLOR. Με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και εκτιμήσεις για τις παραμέτρους για τις οποίες δεν υπήρχαν διαθέσιμες πληροφορίες βάσει βιβλιογραφικών τιμών, υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR εξειδικευμένοι για το περιστατικό συντελεστές βιομετασχηματισμού:  $\lambda_{TCE}=0,5 \text{ y}^{-1}$ ,  $\lambda_{cis-DCE}=2,5 \text{ y}^{-1}$  και  $\lambda_{VC}=100 \text{ y}^{-1}$  (δηλαδή χρόνοι ημιζωής: 1,34 έτη, 101,2 ημέρες και 2,5 ημέρες για τις ενώσεις TCE, cis-DCE και VC,

αντίστοιχα). Ωστόσο, η υπολογισμένη τιμή του συντελεστή βιομετασχηματισμού του VC δεν είναι ρεαλιστική για συνθήκες αναγωγικής αποχλωρίωσης, αφού είναι δύο τάξεις μεγαλύτερη από τη μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή από τους Suarez & Rifai (1999). Το VC έχει ανιχνευθεί μόνο στην πηγή σε χαμηλές συγκεντρώσεις και εφόσον οι ενδείξεις δείχνουν ότι δεν εξαπλώνεται οι ακόλουθες προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με αυτή την τιμή. Στη συνέχεια, με τη χρήση των παραπάνω συντελεστών βιομετασχηματισμού, υπολογίστηκε ο χρόνος σταθεροποίησης της ρύπανσης είναι ίσος με 65 χρόνια από την έναρξη της διαρροής (έτος 2027). Η απόσταση σταθεροποίησης είναι 636 m, δηλαδή μεγαλύτερη από την απόσταση του σημείου συμμόρφωσης από την πηγή (400 m). Το αποτέλεσμα αυτό είναι συμβατό με τη μελέτη της Parsons ES (1999b), ότι η έκταση της ρύπανσης θα σταθεροποιηθεί το 2035 και θα είναι ίση με 770 m. Άρα, η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση αναμένεται να μην είναι αποτελεσματική μέθοδος αποκατάστασης για το συγκεκριμένο περιστατικό. Τέλος, από τις αναλύσεις ευαισθησίας προέκυψε ότι η τροποποίηση των συντελεστών βιομετασχηματισμού επηρεάζει περισσότερο τον χρόνο και την απόσταση σταθεροποίησης της ρύπανσης.

#### **5.4 Σύνοψη αποτελεσμάτων-Συμπερασματικά σχόλια**

Η ενότητα αυτή είναι μια σύνοψη των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό BIOCHLOR. Στον Πίνακα 5.21 παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε περιστατικού που αναλύθηκε και στον Πίνακα 5.22 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με το BIOCHLOR. Η εφαρμογή του BIOCHLOR σε τρεις ρυπασμένους χώρους επιβεβαίωσε τη σημασία της ταχύτητας μεταγωγής, των συντελεστών βιοαποδόμησης  $1^{ns}$  τάξης και του συντελεστή απομείωσης  $1^{ns}$  τάξης της συγκέντρωσης στην πηγή για τον καθορισμό του προβλεπόμενου χρόνου αποκατάστασης με την παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση.

Και στα τρία περιστατικά που προσομοιώθηκαν με το BIOCHLOR, το TCE είναι ο ρύπος που βιοαποδομείται πιο αργά με συντελεστές βιομετασχηματισμού  $1^{ns}$  τάξης από 0,185-0,62  $y^{-1}$  (χρόνοι ημιζωής: 1,12-3,75 έτη). Ακολουθεί το cis-DCE με συντελεστές βιομετασχηματισμού  $1^{ns}$  τάξης από 0,7-1,3  $y^{-1}$  (χρόνοι ημιζωής: 194,6-361,4 ημέρες) και τέλος το VC με συντελεστές βιομετασχηματισμού  $1^{ns}$  τάξης 4,2-100  $y^{-1}$  (χρόνοι ημιζωής: 2,5-60,2 ημέρες). Οι συντελεστές βιομετασχηματισμού  $1^{ns}$  τάξης του TCE που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR για τα τρία περιστατικά ανήκουν στο εύρος των καταγεγραμμένων τιμών (0-8,395)  $y^{-1}$  από τους Suarez & Rifai (1999) για συνθήκες αναγωγικής αποχλωρίωσης από μελέτες στο πεδίο (Πίνακας 4.3). Το ίδιο ισχύει αντίστοιχα για το cis-DCE, για το οποίο το εύρος των καταγεγραμμένων τιμών από τους Suarez & Rifai (1999) είναι 0-47,75  $y^{-1}$ . Αντιθέτως, οι συντελεστές βιομετασχηματισμού  $1^{ns}$

τάξης του VC που υπολογίστηκαν με το BIOCHLOR για τα τρία περιστατικά είναι μεγαλύτεροι από το αντίστοιχο εύρος των Suarez & Rifai (1999)  $(0-2,555) \text{ y}^{-1}$ . Μάλιστα, στο τρίτο περιστατικό (Αεροπορική βάση Tinker, FTA-2) ο συντελεστής βιομετασχηματισμού που χρησιμοποιήθηκε για το VC είναι δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από τον μέγιστο καταγεγραμμένο, άρα δεν είναι ρεαλιστικός για συνθήκες αναγωγικής αποχλωρίωσης. Το BIOCHLOR δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης του πεδίου σε δύο ζώνες με διαφορετικούς συντελεστές βιομετασχηματισμού με την προϋπόθεση ότι στην πρώτη ζώνη οι συγκεντρώσεις δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο. Ωστόσο, δεν υπήρχαν επαρκή δεδομένα από το πεδίο για τον καθορισμό του μήκους της πρώτης ζώνης κι έτσι θεωρήθηκε όλο το πεδίο ως μία αναερόβια ζώνη. Το VC δεν είχε ανιχνευθεί σε φρέαρ παρακολούθησης εκτός από αυτό της πηγής. Ο κύριος ρύπος στο περιστατικό είναι το TCE και γι' αυτόν υπολογίστηκαν ο χρόνος και η απόσταση σταθεροποίησης. Το γεγονός ότι και στα τρία περιστατικά που προσομοιώθηκαν προέκυψε ότι το TCE βιοαποδομείται πιο αργά από τα cis-DCE και VC έρχεται σε αντίθεση με όσα είναι γνωστά από τη θεωρία για τις συνθήκες αναγωγικής αποχλωρίωσης (Ενότητα 2.2.1). Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στην παραδοχή που έγινε για τις προσομοιώσεις, ότι όλο το πεδίο είναι μια ομοιογενής αναερόβια ζώνη και ότι οι συντελεστές βιομετασχηματισμού μένουν σταθεροί με τον χρόνο. Το πιο πιθανό είναι οι συντελεστές βιομετασχηματισμού να μεταβάλλονται τόσο χωρικά όσο και χρονικά.

Για τον βιομηχανικό χώρο Bendix, που θεωρείται ότι είναι αντιπροσωπευτικός των περιστατικών υψηλής επικινδυνότητας λόγω συνολικών μέγιστων καταγεγραμμένων συγκεντρώσεων χλωροαιθενίων μεγαλύτερων από 100 mg/L (250 mg/L), μεγάλου μήκους εξάπλωσης (728 m το 1997) και μεγάλης ταχύτητας μεταγωγής (86,7 m/y), εξετάστηκαν δύο σενάρια για την πηγή. 1) Πηγή μειούμενης έντασης με αρχικές συγκεντρώσεις TCE: 1100 mg/L και cis-DCE: 2070 mg/L και συντελεστή απομείωσης  $1^{nc}$  τάξης  $k_s=0,061 \text{ y}^{-1}$  (χρόνος ημιζωής: 11,4 έτη). 2) Πηγή σταθερής έντασης με αρχικές συγκεντρώσεις TCE: 85 mg/L, cis-DCE: 160 mg/L και VC: 5 mg/L. Ο λόγος που εξετάστηκαν δύο διαφορετικά σενάρια για την πηγή ήταν ότι δεν υπήρχαν δεδομένα τόσο για τις αρχικές συγκεντρώσεις στην περιοχή της πηγής όσο για τη χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων στην πηγή. Από τα δύο σενάρια, πιο κοντά στην πραγματικότητα προέκυψε ότι είναι αυτό της πηγής σταθερής έντασης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του BIOCHLOR, για το σενάριο σταθερής έντασης η ρύπανση έχει σταθεροποιηθεί από το 1977 σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από τις μέγιστες επιτρεπτές και η απόσταση σταθεροποίησης θα ήταν διπλάσια της απόστασης του σημείου συμμόρφωσης από την πηγή, αν δεν παρεμβαλλόταν η λίμνη που μεταβάλλει τη διαδρομή εξάπλωσης των χλωροαιθενίων και επιταχύνει τη φυσική εξασθένηση των χλωροαιθενίων μέσω του μηχανισμού



Πίνακας 5.21 Βασικά χαρακτηριστικά των τριών περιστατικών ρύπανσης με χλωροαιθένια που προσομοιώθηκαν με το BIOCHLOR

ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΟ	ΡΥΠΟΓΟΝΟΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ	ΕΝΑΡΞΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ	ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΚΑΤΑΓΕΓΡΑΜΜΕΝΕΣ ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΧΛΩΡΟΑΙΘΕΝΙΩΝ(mg/L)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ (m/y)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ ΣΥΜΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΗΓΗ (m)	ΠΗΓΗ: μειούμενης έντασης (M)/ σταθερής έντασης (Σ)
1. Βιομηχανικός χώρος Bendix Corp./Allied Automotive	αυτοκινητοβιομηχανία, αυτοσχέδιες υπαίθριες δεξαμενές λυμάτων	1952	250	86,7	567	Σ
2. Πρώην αεροπορική βάση England, SS-45	συντήρηση αεροσκαφών, διαχωριστές ελαίου/νερού, αποχευτετικοί αγωγοί	1962	0,54	13	396	M
3. Αεροπορική βάση Tinker, FTA-2	απόρριψη χλωριωμένων διαλυτών κοντά σε εδαφικό κοίλωμα που χρησιμοποιούταν για πυροσβεστικές ασκήσεις	1962	10,64	46,7	400	Σ

Πίνακας 5.22 Σύνοψη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης τριών περιστατικών ρύπανσης με χλωροαιθένια με το BIOCHLOR

ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΟ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΒΙΟΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ λ (y <sup>-1</sup> )			ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	ΧΡΟΝΟΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ
	TCE	cis-DCE	VC	TOR (χρόνια)	TOS (χρόνια)	DOS (m)
1. Βιομηχανικός χώρος Bendix Corp./Allied Automotive	0,62	1,3	4,2	-	25	1262
2. Πρώην αεροπορική βάση England, SS-45	0,185	0,7	4,8	67	-	-
3. Αεροπορική βάση Tinker, FTA-2	0,5	2,5	100	-	65	636

TCE= Τριχλωροαιθένιο, cis-DCE= cis-1,2-Διχλωροαιθένιο, VC= Βινυλοχλωρίδιο

της διάλυσης. Επομένως, η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση αναμένεται να μην είναι αποτελεσματική μέθοδος αποκατάστασης για τον χώρο Bendix, κάτι που είναι σύμφωνο με την εφαρμογή συστήματος άντλησης και επεξεργασίας στην περιοχή της πηγής το 2009. Αντιθέτως, για το σενάριο πηγής σταθερής έντασης ο προβλεπόμενος χρόνος αποκατάστασης ήταν 118 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής. Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι για μια πηγή με τέτοιες τιμές συγκεντρώσεων που υποδεικνύουν την πιθανότητα ύπαρξης μη υδατικής φάσης (σύμφωνα με τον «εμπειρικό κανόνα του 1%» της υδατικής διαλυτότητας), το σενάριο σταθερής έντασης είναι πιο αντιπροσωπευτικό από το σενάριο μειούμενης έντασης.

Για τον χώρο SS-45 της πρώην αεροπορικής βάσης England, που θεωρείται ότι είναι αντιπροσωπευτικός των περιστατικών χαμηλής επικινδυνότητας λόγω συνολικών μέγιστων καταγεγραμμένων συγκεντρώσεων χλωροαιθενίων μικρότερων από 1 mg/L, μέτριου μήκους εξάπλωσης (500 m το 2002) και χαμηλής ταχύτητας μεταγωγής (13 m/y), η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση αναμένεται να είναι αποτελεσματική μέθοδος αποκατάστασης. Οι συγκεντρώσεις στην πηγή από το 1997 έως το 2002 είχαν φθίνουσα τάση, και με την παραδοχή ότι αυτή η τάση υπήρχε από την έναρξη της διαρροής το 1962, η βαθμονόμηση του μοντέλου και οι προβλέψεις με το BIOCHLOR πραγματοποιήθηκαν για πηγή μειούμενης έντασης με αρχική συγκέντρωση 6,51 mg/L TCE και συντελεστή απομείωσης 1<sup>ης</sup> τάξης  $k_s=0,069 \text{ y}^{-1}$  (χρόνος ημιζωής: 10 έτη). Ο προβλεπόμενος χρόνος αποκατάστασης είναι 67 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής (έτος 2029) για επίτευξη των ορίων MCL (μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις στο πόσιμο νερό) σε απόσταση 396 m από την πηγή.

Για τον χώρο FTA-2 της αεροπορικής βάσης Tinker, που είναι αντιπροσωπευτικός περιστατικών ενδιάμεσης επικινδυνότητας σε σχέση με τα παραπάνω λόγω συνολικών μέγιστων καταγεγραμμένων συγκεντρώσεων χλωροαιθενίων 10,64 mg/L, μετρίως υψηλής ταχύτητας μεταγωγής (46,7 m/y) και μέτριου μήκους εξάπλωσης της ρύπανσης (465 m το 1997), η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση αναμένεται να μην είναι αποτελεσματική μέθοδος αποκατάστασης. Οι συγκεντρώσεις στην πηγή από το 1993 έως το 2002 είχαν φθίνουσα τάση, και με την παραδοχή ότι αυτή η τάση υπήρχε από την έναρξη της διαρροής το 1962, η βαθμονόμηση του μοντέλου και οι προβλέψεις με το BIOCHLOR πραγματοποιήθηκαν για πηγή σταθερής έντασης με αρχική συγκέντρωση 9,44 mg/L TCE. Αναμένεται ότι η ρύπανση θα σταθεροποιηθεί σε συγκεντρώσεις μικρότερες από τις μέγιστες επιτρεπτές στο πόσιμο νερό 65 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής (έτος 2027) 236 m κατάντη του σημείου συμμόρφωσης που θεωρήθηκε ότι βρίσκεται 400 m κατάντη της πηγής. Το αποτέλεσμα αυτό είναι συμβατό με την πραγματοποίηση πιλοτικών δοκιμών ενισχυμένης βιοαποκατάστασης στην περιοχή της πηγής τον Οκτώβριο του 2003.

## Κεφάλαιο 6

### Συμπεράσματα

Στην Ενότητα 3.1 παρουσιάστηκαν ενδελεχώς τα συμπεράσματα που αντλήθηκαν από υπάρχουσες συλλογές περιστατικών για τα μεγέθη των ταχυτήτων μεταγωγής του υπόγειου νερού, των μηκών εξάπλωσης των χλωριωμένων διαλυτών και των μεγίστων καταγεγραμμένων συγκεντρώσεων χλωριωμένων διαλυτών, καθώς και για τη χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων στην περιοχή της πηγής σε χώρους ρυπασμένους με χλωριωμένους διαλύτες, όπου εφαρμόζεται η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση ως μοναδική μέθοδος αποκατάστασης. Στην Ενότητα 3.2.2 παρουσιάστηκαν τα αντίστοιχα συμπεράσματα από μια συλλογή 17 περιστατικών, η οποία δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας με περιστατικά όπου η αποκατάσταση με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση έχει ολοκληρωθεί, βάσει δεδομένων από τη λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α.. Στην Ενότητα 5.4 παρουσιάστηκαν ενδελεχώς τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της προσομοίωσης τριών περιστατικών ρύπανσης με χλωροαιθένια με το λογισμικό αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης BIOCHLOR. Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά τα κύρια επιμέρους συμπεράσματα της εργασίας μαζί με τα συμπερασματικά σχόλια που προέκυψαν από τη συνολική προσπάθεια που απαιτήσε η παρούσα εργασία.

#### 6.1 Κύρια ευρήματα

Από την εκτεταμένη βιβλιογραφική έρευνα που πραγματοποιήθηκε για την εύρεση των περιστατικών που προσομοιώθηκαν με το BIOCHLOR, προέκυψε ότι σε λίγους από τους ρυπασμένους χώρους για τους οποίους έχει γίνει αξιολόγηση της φυσικής εξασθένησης σε άρθρα, μελέτες και πρακτικά συνεδρίων, έχει εφαρμοστεί τελικά η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση ως μοναδική μέθοδος αποκατάστασης. Επιπλέον, ο αριθμός των πλήρως ολοκληρωμένων περιστατικών (17 περιστατικά) εφαρμογής της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης σε χώρους ρυπασμένους με χλωροαιθένια στο πρόγραμμα Superfund είναι πολύ μικρός, κάτι που ήταν αναμενόμενο αφού η χρήση της μεθόδου διαδόθηκε στις αρχές του '90, δηλαδή έχουν περάσει λιγότερο από 30 χρόνια, που είναι μια συνηθισμένη τιμή του προβλεπόμενου χρόνου αποκατάστασης για περιστατικά μικρής έως μέτριας κλίμακας ρύπανσης με την εν λόγω μέθοδο.

Το πρώτο γενικό συμπέρασμα που προκύπτει τόσο από την υπάρχουσα συλλογή των McGuire *et al.* (2004) όσο και από τη συλλογή που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας

διπλωματικής εργασίας, αλλά και από την προσομοίωση του χώρου SS-45 της πρώην αεροπορική βάσης England στη Λουιζιάνα, είναι ότι: η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση αναμένεται να είναι αποτελεσματική σε χώρους χαμηλής επικινδυνότητας, με μέγιστες καταγεγραμμένες συνολικές συγκεντρώσεις χλωροαιθενίων μικρότερες από 1,5 mg/L και ταχύτητες μεταγωγής μικρότερες από 15 m/y. Όλα τα περιστατικά της βάσης δεδομένων Superfund, στα οποία η αποκατάσταση με παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση έχει ολοκληρωθεί, και για τα οποία είναι διαθέσιμες οι πληροφορίες σχετικά με τις αρχικές συγκεντρώσεις, έχουν συνολικές μέγιστες αρχικές συγκεντρώσεις χλωριωμένων διαλυτών 0,1-1,5 mg/L. Από την ίδια συλλογή, στο 62,5% των περιστατικών για τα οποία είναι γνωστή η ταχύτητα μεταγωγής του υπόγειου νερού, αυτή είναι μικρότερη από 15 m/y. Ο προβλεπόμενος χρόνος αποκατάστασης του χώρου SS-45, με μέγιστες καταγεγραμμένες συνολικές συγκεντρώσεις χλωροαιθενίων 0,54 mg/L και μέγιστη ταχύτητα του υπόγειου νερού 13 m/y, υπολογίστηκε με το λογισμικό BIOCHLOR ίσος με 67 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής. Για το συγκεκριμένο περιστατικό, ο προβλεπόμενος χρόνος αποκατάστασης ορίστηκε ως το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να μειωθούν οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθενίων κάτω από τις μέγιστες επιτρεπτές στο πόσιμο νερό, σε απόσταση 396 m κατάντη της πηγής.

Αντιθέτως, η παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση αναμένεται να μην είναι αποτελεσματική μέθοδος αποκατάστασης σε χώρους υψηλής επικινδυνότητας, με μέγιστες καταγεγραμμένες συνολικές συγκεντρώσεις χλωροαιθενίων μεγαλύτερες από 100 mg/L και υψηλές ταχύτητες μεταγωγής, μεγαλύτερες από 60 m/y. Ο χώρος Bendix, με μέγιστες καταγεγραμμένες συνολικές συγκεντρώσεις χλωροαιθενίων 250 mg/L και ταχύτητα μεταγωγής του υπόγειου νερού 86,7 m/y, επιλέχθηκε να προσομοιωθεί με το BIOCHLOR ως αντιπροσωπευτικός των χώρων με ρύπανση μεγάλης κλίμακας. Εξετάστηκαν δύο σενάρια για την πηγή, αυτό της μειούμενης έντασης και αυτό της σταθερής έντασης. Εκ του αποτελέσματος, κρίθηκε ότι το σενάριο της πηγής σταθερής έντασης προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα, όπως περιγράφεται αναλυτικότερα στην Ενότητα 5.1.7. Άρα, μια πηγή με τιμές συγκεντρώσεων που υποδεικνύουν την πιθανότητα ύπαρξης μη υδατικής φάσης, σύμφωνα με τον εμπειρικό «κανόνα του 1%» της υδατικής διαλυτότητας, είναι σωστότερο να προσομοιώνεται ως πηγή σταθερής παρά μειούμενης έντασης. Για το σενάριο πηγής σταθερής έντασης υπολογίστηκε ότι η έκταση ρύπανση της ρύπανσης έχει σταθεροποιηθεί από το 25ο έτος μετά την έναρξη της διαρροής και φτάνει μέχρι τη λίμνη Μίσιγκαν 728 m κατάντη της πηγής. Η απόσταση σταθεροποίησης υπολογίστηκε ίση με 1232 m από την πηγή, με την υπόθεση ότι δεν παρεμβάλλεται η λίμνη, η οποία στην πραγματικότητα επιταχύνει τη φυσική εξασθένηση και μεταβάλλει τη διαδρομή εξάπλωσης των χλωροαιθενίων.

Για περιστατικά μέτριας κλίμακας ρύπανσης με μέγιστες καταγεγραμμένες συνολικές συγκεντρώσεις χλωροαιθενίων της τάξης των 10 mg/L και μετρίως υψηλές ταχύτητες μεταγωγής (30-60 m/y), η εφαρμοσιμότητα της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης εξαρτάται από τη θέση του σημείου συμμόρφωσης, ή αλλιώς από το πόσο κοντά στην εστία της ρύπανσης βρίσκεται κάποιος υδάτινος αποδέκτης ή τα όρια της ιδιοκτησίας. Αντιπροσωπευτικός αυτής της κατηγορίας είναι ο χώρος FTA-2 της αεροπορικής βάσης Tinker, με συνολικές μέγιστες καταγεγραμμένες συγκεντρώσεις χλωροαιθενίων 10,64 mg/L και ταχύτητα μεταγωγής του υπόγειου νερού 46,7 m/y. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης αυτού του περιστατικού με το BIOCHLOR ήταν ότι η ρύπανση θα σταθεροποιηθεί 65 χρόνια μετά την έναρξη της διαρροής σε απόσταση 636 m από την πηγή.

Η εφαρμογή του BIOCHLOR στα τρία παραπάνω περιστατικά επιβεβαίωσε την επιρροή 1) της ταχύτητας μεταγωγής, 2) των συντελεστών βιοαποδόμησης  $1^{ns}$  τάξης και 3) του συντελεστή απομείωσης  $1^{ns}$  τάξης της συγκέντρωσης στην πηγή στην αποτελεσματικότητα της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης. Ωστόσο, είναι φανερό ότι συναντώνται δυσκολίες στον υπολογισμό συντελεστών βιομετασχηματισμού που βασίζονται στις μετρήσεις πεδίου με το BIOCHLOR λόγω έλλειψης δεδομένων, καθώς απαιτούνται μετρήσεις πεδίου τουλάχιστον σε τέσσερα έως πέντε φρέατα παρακολούθησης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε διαστήματα τέτοια που να καλύπτουν την έκταση της ρύπανσης από τα ανάντη μέχρι τα κατόντη, προκειμένου να γίνει με ακρίβεια η προσαρμογή των υπολογισμένων καμπυλών των συγκεντρώσεων στις μετρήσεις πεδίου· επιπλέον, πρέπει να υπάρχουν μετρήσεις από δύο δειγματοληψίες που να απέχουν χρονικά μεταξύ τους δύο έως πέντε έτη προκειμένου να μπορεί να γίνει βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου. Το ίδιο ισχύει και για τους συντελεστές απομείωσης  $1^{ns}$  τάξης της πηγής, αφού απαιτείται μεγάλη χρονοσειρά μετρήσεων των συγκεντρώσεων ώστε να υπάρχει βεβαιότητα για τη τυχόν μειούμενη τάση των συγκεντρώσεων στην πηγή. Επειδή το έτος έναρξης της διαρροής των χλωροαιθενίων και οι συγκεντρώσεις που διέρρευσαν δεν είναι γνωστές για τα περιστατικά, και επειδή το πλάτος και το πάχος της πηγής δεν μπορούν να μετρηθούν στο πεδίο, η εμπειρία του μελετητή έχει καθοριστική σημασία για τις αποφάσεις που θα λάβει για την προσομοίωση της πηγής.

## **6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις**

Προκειμένου να εξαχθούν βεβαιότερα συμπεράσματα για την επίδοση της παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης σε χώρους ρυπασμένους με χλωροαιθένια, προτείνεται η πραγματοποίηση αναλύσεων με το BIOCHLOR σε περισσότερα περιστατικά για κάθε μία από τις τρεις κατηγορίες επιπέδου ρύπανσης που πρότεινε η παρούσα διπλωματική

εργασία, δηλαδή για μέγιστες συνολικές καταγεγραμμένες συγκεντρώσεις χλωροαιθενίων μικρότερες από 1,5 mg/L, της τάξης των 10 mg/L και μεγαλύτερες από 100 mg/L. Επιπλέον, προτείνεται να αναλυθούν περιστατικά με περισσότερες μετρήσεις από φρέατα παρακολούθησης στον άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, σε σχέση με τα περιστατικά που προσομοιώθηκαν σε αυτή τη διπλωματική, ώστε η προσαρμογή των υπολογισμένων καμπυλών των συγκεντρώσεων στις μετρήσεις πεδίου για τη βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου να είναι πιο αξιόπιστη, και συνεπώς να υπάρχει μεγαλύτερη βεβαιότητα για τις προβλέψεις που θα πραγματοποιηθούν με το βαθμονομημένο μοντέλο.

Τέλος, για να είναι δυνατή η πραγματοποίηση προβλέψεων με λογισμικά που υποστηρίζουν τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση, ένα από τα οποία είναι το BIOCHLOR, κρίνεται απαραίτητο να δημοσιευτούν οδηγίες για τη συστηματική συλλογή των απαραίτητων δεδομένων από το πεδίο, την ανάλυσή τους και την ανάπτυξη του κατάλληλου μοντέλου που θα αντιπροσωπεύει τις συνθήκες στο πεδίο.

## Βιβλιογραφία

### Διεθνής Βιβλιογραφία

- Al-Suwaiyan, M. S. (1996). "Use of Weighted Least-Squares Method in Evaluation of the Relationship between Dispersivity and Field Scale" by Xu & Eckstein (1995). November-December 1995 discussion. *Ground Water*, 34(4), 578.
- An, Y. J., Kampbell, D. H., Weaver, J. W., Wilson, J. T., & Jeong, S. W. (2004). Natural attenuation of trichloroethene and its degradation products at a lake-shore site, *Environmental Pollution*, 130(3), 325-335.
- ATSDR (1996). *Toxicological profile for 1,2-dichloroethylene*. Department of Health and Human Services. Atlanta, U.S.A. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp87.pdf>
- ATSDR (1997). *Toxicological profile for trichloroethylene*. Department of Health and Human Services. Atlanta, U.S.A. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp19.pdf>
- ATSDR (2006). *Toxicological profile for vinyl chloride*. Department of Health and Human Services. Atlanta, U.S.A. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp20.pdf>
- ATSDR (2009). *Public Health Assessment. Tinker Air Force (Soldier Cr/Building 3001), Midwest County, Oklahoma County, Oklahoma*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/pha/pha.asp?docid=699&pg=1>
- Aziz, C. E., Newell, C. J., Gonzales, J.R., Haas, P.E., Clement, T.P., & Sun, Y. (2000a). *BIOCHLOR natural attenuation decision support system (User's Manual Version 1.1)*. EPA/600/R-00/008. Washington, DC: U.S. EPA ORD. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1000YUW.txt>
- Aziz, C. E., Smith, A. P., Newell, C. J., & Gonzales, J. R. (2000b). *BIOCHLOR Chlorinated solvent plume database report*. Air Force Center for Environmental Excellence, Technology Transfer Division, Brook Air Force Base, San Antonio, Texas, USA. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://www.clu-in.org/download/contaminantfocus/tce/BIOCHLOR-plume-database.pdf>
- Aziz, C. E., Newell, C. J., & Gonzales, J.R. (2002). *BIOCHLOR natural attenuation decision support system (User's Manual Addendum Version 2.2)*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/ada/download/biochlor22.pdf>
- Bouwer, E.J., 1994, Bioremediation of chlorinated solvents using alternate electron acceptors. In Norris, R.D. et al. (Eds.), *Handbook of Bioremediation* (pp. 149-175): Boca Raton: Lewis Publishers.
- Bradley, P. M. (2003). History and ecology of chloroethene biodegradation: a review. *Bioremediation Journal*, 7(2), 81-109.
- Chapelle F.H. (1997). Identifying Redox Conditions That Favor the Natural Attenuation of Chlorinated Ethenes in Contaminated Ground-Water Systems. In *Proceedings of the Symposium on Natural Attenuation of Chlorinated Organics in Ground Water, 11-13 September, 1996* (pp. 19-22). EPA-540-R-97-504. Washington, DC: U.S. EPA ORD Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από [http://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_file\\_download.cfm?p\\_download\\_id=438427](http://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=438427)
- Christenson, S. (1992). Geohydrology and Ground-Water Flow Simulation of The Central Oklahoma Aquifer (Abstract). In S. Christenson & L. Carpenter (Eds.), *Ground-water Quality of the Central Oklahoma (Garber-Wellington) Aquifer Conference: Proceedings, 20 February 1992* (pp. 5-6). USGS, Open-File Report 92-116. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://pubs.usgs.gov/of/1992/0116/report.pdf>

- Cooley, A., Ferrey, M., Harkness, M., Dupont, R. R., Stroo, H., & Spain, J. (2005). Monitored natural attenuation forum: A panel discussion. *Remediation Journal*, 15(2), 83-96.
- Declercq, I., Cappuyns, V., & Duclos, Y. (2012). Monitored natural attenuation (MNA) of contaminated soils: state of the art in Europe—a critical evaluation. *Science of the Total Environment*, 426, 393-405.
- DOE Hanford (2008). *1100-EM-1 Operable Unit*. DOE/RL-2008-01. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από [http://www.hanford.gov/c.cfm/sgrp/GWRep07/html/gw07\\_213.pdf](http://www.hanford.gov/c.cfm/sgrp/GWRep07/html/gw07_213.pdf)
- Field, J. A., & Sierra-Alvarez, R. (2004). Biodegradability of chlorinated solvents and related chlorinated aliphatic compounds. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 3(3), 185-254.
- Domenico, P. A. (1987). An analytical model for multidimensional transport of a decaying contaminant species. *Journal of Hydrology*, 91(1), 49-58.
- Domenico, P. A., & Schwarz, F. W. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*. New York: John Wiley & Sons.
- Downey, D. C., Anthony, J. W., & Haas, P. E. (2001). *Natural Attenuation as the Approved Remedy for England AFB Site SS-45*. Air Force Center for Environmental Excellence, 2001 Technology Transfer Conference, San Antonio, Texas .
- Engineering Science (1993). *Final Phase II Work Plan for Remedial Investigation and Feasibility Study, St. Joseph, Michigan, April 2003*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://docs.google.com/file/d/0B5EiCByYSLKsVzJvWjNKTHRZU2s/edit>
- Feenstra, S., & Cherry, J. A (1988). “Subsurface contamination by dense non-aqueous phase liquid (DNAPL) chemicals”. In *Proceedings of the International Groundwater Symposium, International Association of Hydrogeologists* (pp. 62–69), 1–4 May, Halifax, Nova Scotia.
- Gelhar, L. W., Welty, C., & Rehfeldt, K. R. (1992). A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. *Water resources research*, 28(7), 1955-1974.
- Grandel, S., & Dahmke, A. (2004). Monitored natural attenuation of chlorinated solvents: assessment of potential and limitations. *Biodegradation*, 15(6), 371-386.
- Hausman, S. S., & Rifai, H. S. (2005). Modeling remediation time using natural attenuation at a dry-cleaner site. *Remediation Journal*, 16(1), 5-31.
- Huff, G. F.; Braun, C. L. & Lee, R. W. (2000). *Assessment of potential for natural attenuation of chlorinated ethenes and ethanes in ground water at a petrochemical reclamation site, Harris County, Texas*. USGS Water-Resources Investigations Report: 2000-4121.
- Keck Consulting Services (1986). *Hydrogeologic Study Final Investigation Bendix Chassis and Brake Components Division, Allied Automotive Section 10, Lincoln Township, Berrien County, Michigan, June 13, 1986*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://docs.google.com/file/d/0B5EiCByYSLKsanp1Mzc3enAxNWc/edit>
- LaGrega, M.D., Buckingham, P.L. & Evans, J.C. (1994). *Hazardous Waste Management*. New York: McGraw-Hill.
- Lu, X., Kampbell, D. H., & Wilson, J. T. (2006a). *Evaluation of the Role of Dehalococcoides Organisms in the Natural Attenuation of Chlorinated Ethylenes in Ground Water*. EPA 600-R-06-029. U.S. EPA ORD. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1001GZM.txt>
- Lu, X., Wilson, J. T., & Kampbell, D. H. (2006b). Relationship between Dehalococcoides DNA in ground water and rates of reductive dechlorination at field scale. *Water research*, 40(16), 3131-3140.
- Mannik & Smith (2012). *Churchill Farms Subdivision, Supplemental Hydrologic Investigation, Bendix Superfund Site, Lincoln Township, Berrien County, MI. Prepared for Michigan Department of Environmental Quality*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://docs.google.com/file/d/0B5EiCByYSLKsVnpBbEFrc1R4MW8/edit>



- McGuire, T. M., Newell, C. J., Looney, B. B., & Vangelas, K. M. (2004a). *Historical and retrospective survey of monitored natural attenuation: A line of inquiry supporting monitored natural attenuation and enhanced passive remediation of chlorinated solvents, WSRC-TR-2003-00333*. Westinghouse Savannah River Company, Savannah River Site. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://sti.srs.gov/fulltext/tr2003333r1/tr2003333r1.pdf>
- McGuire, T. M., Newell, C. J., Looney, B. B., Vangelas, K. M., & Sink, C. H. (2004b). Historical analysis of monitored natural attenuation: A survey of 191 chlorinated solvent sites and 45 solvent plumes. *Remediation Journal*, 15(1), 99-112.
- McNab, W. W. (1998). *Database from historical case analysis of chlorinated volatile organic compounds*. Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, Livermore, California.
- McNab, W. W., & Doohar, B. P. (1998). A Critique of a Steady-State Analytical Method for Estimating Contaminant Degradation Rates. *Groundwater*, 36(6), 983-987.
- McNab, W. W., Rice, D. W., Bear, J., Ragaini, R., Tuckfield, C., & Oldenburg, C. (1999). Historical case analysis of chlorinated volatile organic compound plumes. *Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-AR-133361, California, USA*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, από <http://www-erd.llnl.gov/library/AR-133361.pdf>
- Newell, C. J., Cowie, I., McGuire, T. M., & McNab Jr, W. W. (2006). Multiyear temporal changes in chlorinated solvent concentrations at 23 monitored natural attenuation sites. *Journal of Environmental Engineering*, 132(6), 653-663.
- Newell, C. J., Hopkins, L. P., & Bedient, P. B. (1990). A Hydrogeologic Database for Ground-Water Modeling. *Ground Water*, 28(5), 703-714.
- Newell, C. J., Rifai, H. S., Wilson, J. T., Connor, J. A., Aziz, J. A., & Suarez, M. P. (2002). *Calculation and use of first-order rate constants for monitored natural attenuation studies*. EPA-540-S-02-500. U.S. EPA NRMRL. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/10004674.pdf>
- Newell, C. J., & Ross, R. R. (1991). *Estimating Potential for Occurrence of DNAPL at Superfund Sites, Quick Reference Guide Sheet*. U.S. EPA OSWER, publication number 9355.4-07FS, Washington, D.C. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/health/conmedia/gwdocs/pdfs/estdnapl.pdf>
- NRC (2000). *Natural Attenuation for Groundwater Remediation [eBook version]*. Washington, DC: National Academy Press. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από [http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=9792](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=9792)
- NRC (2013). *Alternatives for Managing the Nation's Complex Contaminated Groundwater Sites [eBook version]*. Washington, DC: National Academy Press. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από [http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=14668](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=14668)
- Parsons ES (1997). *Work Plan for a Demonstration of Remediation by Natural Attenuation for Groundwater at Sites FTA 2 and Area A, Tinker Air Force Base, Oklahoma City, Oklahoma*. Prepared for the Air Force Center for Environmental Excellence, Technology Transfer Division, Brooks Air Force Base, San Antonio, Texas and Tinker Air Force Base, Oklahoma. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA385996>
- Parsons ES (1999a). *Final Treatability Study in Support of Remediation by Natural Attenuation for Groundwater at Site FTA-2 at Tinker Air Force Base, Oklahoma*. Prepared for the Air Force Center for Environmental Excellence, Technology Transfer Division, Brooks Air Force Base, San Antonio, Texas and Tinker Air Force Base, Oklahoma.
- Parsons ES (1999b). *Natural Attenuation of Chlorinated Solvents Performance and Cost Results from Multiple Air Force Demonstration Sites*. Prepared for the Air Force Center for Environmental Excellence, Technology Transfer Division, Brook Air Force Base, San

- Antonio, Texas. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a425022.pdf>
- Parsons ES (2009). *Final Field-Scale Evaluation of Monitored Natural Attenuation for Dissolved Chlorinated Solvent Plumes*. Prepared for the Air Force Center for Environmental Excellence, Technology Transfer Division, Brook Air Force Base, San Antonio, Texas Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://handle.dtic.mil/100.2/ADA506445>
- Rifai, H. S., Borden, R. C., Newell, C. J., & Bedient, P. B. (2010). Modeling Remediation of Chlorinated Solvent Plumes. In H.F. Stroo & C.H. Ward (Eds.), *In Situ Remediation of Chlorinated Solvent Plumes* (pp. 145-184). New York: Springer. Doi: 10.1007/978-1-4419-1401-9\_6
- Rifai, H. S., C. J. Newell, & T. H. Wiedemeier (2001). *Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Ground Water, Handbook of Solvents*. Chemtec Publishing, 1571-1616, 2001.
- Semprini, L., Kitanidis, P. K., Kampbell, D. H., & Wilson, J. T. (1995). Anaerobic transformation of chlorinated aliphatic hydrocarbons in a sand aquifer based on spatial chemical distributions, *Water Resources Research*, 31(4), 1051-1062.
- Stroo, H. F., Leeson, A., Marqusee, J. A., Johnson, P. C., Ward, C. H., Kavanaugh, M. C., Sale, T. C., Newell, C. J., Pennell, K. D., Lebron, C., A. & Unger, M. (2012). Chlorinated ethene source remediation: Lessons learned. *Environmental science & technology*, 46(12), 6438-6447.
- Suarez, M. P., & Rifai, H. S. (1999). Biodegradation rates for fuel hydrocarbons and chlorinated solvents in groundwater. *Bioremediation Journal*, 3(4), 337-362.
- Tetra Tech EM (2000). *Five-Year Review Report for the Mosley Road Sanitary Landfill, Oklahoma City, Oklahoma County, Oklahoma, 09/27/2000*. Prepared for: Waste Management of Oklahoma, Inc. and U.S. Environmental Protection Agency. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f00-06008.pdf>
- Tiedeman, C. & Gorelick, S. M. (1993). Analysis of Uncertainty in Optimal Groundwater Contaminant Capture Design, *Water Resources Research*, 29(7), 2139-2153.
- U.S. DOE (2006). *The Second CERCLA Five-Year Review Report for the Hanford Site. DOE/RL-2006-20 Revision I*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f2007100001560.pdf>
- U.S. EPA (1983). *EPA Superfund Record of Decision: A & F Material Reclaiming, Inc., EPA ID: ILD980397079, OU01, Greenup, IL, 11/23/1983*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/rods/fulltext/r0584503.pdf>
- U.S. EPA (1983). *EPA Superfund Record of Decision: A & F Material Reclaiming, Inc., EPA ID: ILD980397079, OU01, Greenup, IL, 11/23/1983*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/rods/fulltext/r0584503.pdf>
- U.S. EPA (1985). *Superfund Record of Decision: Charlevoix, MI. Second Remedial Action, 09/30/1985*. EPA/ROD/R05-85/025. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=91001JDJ.txt>
- U.S. EPA (1988a). *EPA Superfund Record of Decision: Cannon Engineering, MA. EPA/ROD/R01-88/031. U.S. EPA OERR*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=9100G5MN.txt>
- U.S. EPA (1988b). *EPA Superfund Record of Decision: Marathon Battery Corp.. EPA ID: NYD010959757, OU 03, Cold Springs, NY, 09/30/1988*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/rods/fulltext/r0288064.pdf>
- U.S. EPA (1990). *EPA Superfund Record of Decision: Oak Grove Sanitary Landfill, MN, 12/21/1990*. EPA/ROD/R05-91/153. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=91001XW2.txt>

- U.S. EPA (1991a). *EPA Superfund Record of Decision: Conklin Dumps*. EPA ID: NYD981486947, OU 01, Conklin, NY, 03/29/1991. EPA/ROD/R02-91/136. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/rods/fulltext/r0291136.pdf>
- U.S. EPA (1991b). *EPA Superfund Record of Decision: Sola Optical USA, CA, 09/27/1991*. EPA/ROD/R09-91/068. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=91002QNH.txt>
- U.S. EPA (1992a). *EPA Superfund Record of Decision: Mosley Road Sanitary Landfill, Oklahoma City, OK*. EPA/ROD/R06-92/070. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=20013YU5.txt>
- U.S. EPA (1992b). *EPA Superfund Record of Decision: Twin Cities Air Force Reserve Base (Small Arms Range Landfill)*. EPA ID: MN8570024275. OU 01, Minneapolis, MN, 03/31/1992. EPA/ROD/R05-92/192. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/rods/fulltext/r0592192.pdf>
- U.S. EPA (1993a). *EPA Superfund Record of Decision: Dakhue Sanitary Landfill, MN, 06/30/1993*. EPA/ROD/R05-93/242. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=91001OLF.txt>
- U.S. EPA (1993b). *EPA Superfund Record of Decision: Fourth Street Abandoned Refinery, OK, 09/30/1993*. EPA/ROD/R06-93/081. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=91000RQW.txt>
- U.S. EPA (1993c). *EPA Superfund Record of Decision: Hanford 1100-Area*. EPA ID: WA4890090075, OU 01, Benton County, WA, 09/24/1993. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/rods/fulltext/r1093063.pdf>
- U.S. EPA (1994a). *EPA Superfund Record of Decision: Agate Lake Scrapyard*, EPA ID: MND980898068, OU 01, Fairview Township, MN, 01/13/1994. EPA/ROD/R05-94/256. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/rods/fulltext/r0594256.pdf>
- U.S. EPA (1994b). *Five-Year Review: Charlevoix Municipal Well Superfund Site, Charlevoix, Michigan*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f94-05001.pdf>
- U.S. EPA (1994c). *EPA Superfund Record of Decision: Davie Landfill Site, Davie, FL, 8/11/1994*. EPA/ROD/R04-94/180. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=91002B24.txt>
- U.S. EPA (1995). *Cannons Engineering Corporation, Bridgewater, Massachusetts Superfund Site, Five-Year Review, June 1995*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f95-01001.pdf>
- U.S. EPA (1997a). *EPA Superfund Record of Decision: Bendix Corp./Allied Automotive*, EPA ID: MID005107222, OU01, St Joseph, MI, 09/30/1997. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/rods/fulltext/r0597117.pdf>
- U.S. EPA (1997b). *EPA Superfund Record of Decision: Petrochem/Recycling Corporation/Ekotek Plant, Salt Lake City, UT, 9/27/1996*. EPA/ROD/R08-96-131. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=10005007.txt>
- U.S. EPA (1997c). *Five-Year Review: Oak Grove Sanitary Landfill, SW-043, 1996 Annual Report, completed by July, 1997*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f97-05010.pdf>
- U.S. EPA (1997d). *Proceedings of the Symposium on Natural Attenuation of Chlorinated Organics in Ground Water*. EPA-540-R-97-504. Washington, DC: U.S. EPA ORD. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από [http://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_file\\_download.cfm?p\\_download\\_id=438427](http://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=438427)

- U.S. EPA (1998a). *Five-Year Review: Brio Refining Site, Friendswood, Texas, 01/08/1998*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f98-06001.pdf>
- U.S. EPA (1998b). *Five-Year Review Report: Marathon Battery Company Superfund Site, Village of Cold Spring, Putnam County, New York, June 1998*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f98-02005.pdf>
- U.S. EPA (1998c). *Five-Year Review Report: Twin Cities Air Force Reserve Base (Small Arms Range Landfill), 04/02/1998*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f98-05011.pdf>
- U.S. EPA (1998d). *Record of Decision Amendment: Brio Refining, Inc., OU01, Friendswood, TX, 07/02/1997*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=9100Q9AT.txt>
- U.S. EPA (1999a). *Five-Year Review: Dakhue Sanitary Landfill, MN*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f99-05033.pdf>
- U.S. EPA (1999b). *Monitored Natural Attenuation of Chlorinated Solvents. U.S. EPA Remedial Technology Fact Sheet*. EPA-600-F-98-022. Washington DC: U.S. EPA OSWER. Ada, OK: NRMRL. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.clu-in.org/download/remed/chl-solv.pdf>
- U.S. EPA (1999c). *Use of monitored natural attenuation at Superfund, RCRA Corrective Action, and Underground Storage Tank Sites. OSWER Directive 9200.4-17P*. Washington DC: U.S. EPA OSWER. <http://www.epa.gov/oust/directiv/d9200417.pdf>
- U.S. EPA (2000a). *Cannons Engineering Corporation Superfund Site, Bridgewater, Massachusetts. Five-Year Review, September 2000. U.S. EPA OSRR*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f00-01002.pdf>
- U.S. EPA (2000b). *Five-Year Review Report for A & F Material Reclaiming, Inc. Site, Greenup, Illinois, September 2000*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f00-05001.pdf>
- U.S. EPA (2000c). *First Five-Year Review Report for the Fourth Street Refinery Superfund Site, Oklahoma City, Oklahoma County, Oklahoma, September 2000*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f01-06005.pdf>
- U.S. EPA (2000d). *Five-Year Review Report for Sola Optical USA, Inc., Petaluma, California, September 2000*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f00-09012.pdf>
- U.S. EPA (2000e). *Engineered Approaches to In Situ Bioremediation of Chlorinated Solvents: Fundamentals and Field Applications*. EPA 542-R-00-008. U.S. EPA OSWER. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://clu-in.org/download/remed/engappinsitbio.pdf>
- U.S. EPA (2001a). *Five-Year Review: Agate Lake Scrapyard, Cass County, Minnesota*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f01-05006.pdf>
- U.S. EPA (2001b). *Five-Year Review: Charlevoix Municipal Well Superfund Site, Charlevoix, Michigan*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f01-05029.pdf>
- U.S. EPA (2001c). *USDOE Hanford Site First Five Year Review Report*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f01-10001.pdf>
- U.S. EPA (2002). *First Combined Five-Year Review Report for the Double Eagle and Fourth Street Refinery Sites Oklahoma City, Oklahoma County, Oklahoma*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f02-06014.pdf>
- U.S. EPA (2003a). *Five-Year Review Report: Marathon Battery Company Superfund Site, Village of Cold Spring, Putnam County, New York, June 2003*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f03-02019.pdf>

- U.S. EPA (2003b). *Second Five-Year Review Report: Twin Cities Air Force Reserve Base (Small Arms Range Landfill), July 2003*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f03-05021.pdf>
- U.S. EPA (2004a). *Five-Year Review Report: Bendix Corporation/Allied Automotive Site, Berrien County, St. Joseph, Michigan, August 2004*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από [http://www.epa.gov/R5Super/fiveyear/reviews\\_pdf/michigan/bendix\\_bosch.pdf](http://www.epa.gov/R5Super/fiveyear/reviews_pdf/michigan/bendix_bosch.pdf)
- U.S. EPA (2004b). *Second Five-Year Review Report for Dakhue Sanitary Landfill, Hampton Township, Dakota County, March 2004*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f04-05012.pdf>
- U.S. EPA (2005a). *Second Five-Year Review Report for A & F Material Reclaiming, Inc. Superfund Site Greenup, Cumberland County, Illinois, September 2005*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f2010050003460.pdf>
- U.S. EPA (2005b). *Second Five-Year Review Report for Mosley Road Sanitary Landfill, Oklahoma City, Oklahoma County, Oklahoma, August 2005*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f0506015.pdf>
- U.S. EPA (2005c). *Second Five-Year Review Report for Sola Optical USA, Inc., Superfund Site, Sonoma County, California, September 2005*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f05-09018.pdf>
- U.S. EPA (2005d). *Third Five-Year Review Report for Cannons Engineering Bridgewater Superfund Site Town of Bridgewater, Plymouth County, Massachusetts, September 2005*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f05-01011.pdf>
- U.S. EPA (2006). *Record of Decision: Peter Cooper Markhams Superfund Site, Town of Dayton, Cattaraugus County, New York. December 2006*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/rods/fulltext/r2007020002549.pdf>
- U.S. EPA (2007). *Second Combined Five-Year Review Report for Double Eagle and Fourth Street Refinery Sites, Oklahoma City, Oklahoma County, Oklahoma OKD007188717 and OKD980696470, May 2007*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f2007060001911.pdf>
- U.S. EPA (2008a). *Third Five-Year Review Report for Brio Refining Superfund Site, Harris County, Texas, April 2008*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f2008060002674.pdf>
- U.S. EPA (2008b). *Five-Year Review Report: Marathon Battery Company Superfund Site, Village of Cold Spring, Putnam County, New York. June 2008*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f2008020003871.pdf>
- U.S. EPA (2008c). *Third Five-Year Review Report: Twin Cities Air Force Reserve Base (Small Arms Range Landfill), June 2008*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f2008050002669.pdf>
- U.S. EPA (2009a). *National Primary Drinking Water Regulations*. EPA 816-F-09-0004. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://water.epa.gov/drink/contaminants/upload/mcl-2.pdf>
- U.S. EPA (2009b). *Second Five-Year Review Report for, Bendix Corporation/Allied Automotive Site, Berrien County, St. Joseph, Michigan, CERCLIS ID: MID005107222, Site SPILL: 05AS, August 2009*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f2009050002951.pdf>
- U.S. EPA (2009c). *Third Five-Year Review Report for Dakhue Sanitary Landfill, Hampton Township, Dakota County, January 2009*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f2009050002835.pdf>
- U.S. EPA (2010a). *Fourth Five-Year Review Report for Cannons Engineering Bridgewater Superfund Site Town of Bridgewater, Plymouth County, Massachusetts, September 2010*.

- Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f2010010003577.pdf>
- U.S. EPA (2010b). *Superfund Remedy Report, Thirteenth Edition*. EPA-542-R-10-004. Washington, DC: U.S. EPA OSWER. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από [http://www.clu-in.org/download/remed/asr/13/SRR\\_13th\\_MainDocument.pdf](http://www.clu-in.org/download/remed/asr/13/SRR_13th_MainDocument.pdf)
- U.S. EPA (2010c). *Third Five-Year Review Report for A & F Material Reclaiming, Inc. Superfund Site Greenup, Cumberland County, Illinois, June 2010*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f00-05001.pdf>
- U.S. EPA (2010d). *Third Five-Year Review Report for Sola Optical USA, Inc., Superfund Site, Sonoma County, California, September 23, 2010*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f2010090003717.pdf>
- U.S. EPA (2010e). *Third Five-Year Review Report, Third Addendum for Mosley Road Sanitary Landfill, Oklahoma City, Oklahoma County, Oklahoma, June 2010*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f2009060003748.pdf>
- U.S. EPA (2011). *About Region 5, Superfund, National Priority List (NPL) Fact Sheets, Michigan, Bendix Corp./Allied Automotive*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/R5Super/npl/michigan/MID005107222.html>
- U.S. EPA (2012a). *A Citizen's Guide to Monitored Natural Attenuation*. EPA 542-F-12-014. U.S. EPA OSWER. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από [http://www.clu-in.org/download/citizens/a\\_citizens\\_guide\\_to\\_monitored\\_natural\\_attenuation.pdf](http://www.clu-in.org/download/citizens/a_citizens_guide_to_monitored_natural_attenuation.pdf)
- U.S. EPA (2012b). *Methodology for determining chemical and physical properties, factor values and screening concentration benchmarks for volatile substances listed in the U.S. EPA's Superfund Chemical Data Matrix (SCDM)*. Washington, DC: U.S. EPA OSRTI. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/npl/hrsres/tools/scdm-update-methodology.pdf>
- U.S. EPA (2012c). *Superfund Chemical Data Matrix Update - Volatile Substances*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/npl/hrsres/tools/volatile-substances-factor-values.pdf>
- U.S. EPA (2012). *Third Combined Five-Year Review Report for Double Eagle and Fourth Street Refinery Sites, Oklahoma City, Oklahoma County, Oklahoma OKD007188717 and OKD980696470*. April 2012. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f2012060004416.pdf>
- U.S. EPA (2013a). *Five-Year Review Report: Marathon Battery Company Superfund Site, Village of Cold Spring, Putnam County, New York, June 2013*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f2013020004467.pdf>
- U.S. EPA (2013b). *Five-Year Review Report for Peter Cooper Corporation (Markhams) Superfund Site, Town of Dayton, Cattaraugus County, New York, September 2013*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f2013020004526.pdf>
- U.S. EPA (2013c). *Fourth Five-Year Review Report for Conklin Dumps Superfund Site. Town of Conklin, Broome County, New York, January 2013*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f2013020004422.pdf>
- U.S. EPA (2013d). *Fourth Five-Year Review Report for Twin Cities Air Force Reserve Base (Small Arms Range Landfill), Hennepin County, Minnesota, 04/25/2013*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/superfund/sites/fiveyear/f2013050004459.pdf>
- U.S. EPA (2013e). *Superfund Remedy Report, Fourteenth Edition*. EPA-542-R-13-016. Washington, DC: U.S. EPA OSWER. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από [http://www.epa.gov/tio/download/remed/asr/14/srr\\_14th\\_2013nov.pdf](http://www.epa.gov/tio/download/remed/asr/14/srr_14th_2013nov.pdf)
- Weaver, J. W., Wilson, J. T., & Kampbell, D. H. (1997a). Case study of natural attenuation of trichloroethene at St. Joseph, Michigan. In *Proceedings of the Symposium on Natural Attenuation of Chlorinated Organics in Ground Water, 11-13 September, 1996* (pp. 67-

- 70). EPA-540-R-97-504. Washington, DC: U.S. EPA ORD. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από [http://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_file\\_download.cfm?p\\_download\\_id=438427](http://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=438427)
- Weaver, J. W., Wilson, J. T., & Kampbell, D. H. (1997b). Extraction of degradation rate constants from the St. Joseph, Michigan, trichloroethene site. In *Proceedings of the Symposium on Natural Attenuation of Chlorinated Organics in Ground Water, 11-13 September, 1996* (pp. 71-75). EPA-540-R-97-504. Washington, DC: U.S. EPA ORD. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από [http://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_file\\_download.cfm?p\\_download\\_id=438427](http://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=438427)
- Wiedemeier, T. H., Swanson, M. A., Moutoux, D. E., Gordon, E. K., Wilson, J. T., Wilson, B. H., Kampbell, D. H., Haas, P. E., Miller, R. N., Hansen, J. E., & Chapelle, F. H (1998). *Technical protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in ground water*. EPA-600-R-98-128. Washington, DC: U.S. EPA OSWER. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από [http://www.epa.gov/osw/hazard/correctiveaction/resources/guidance/rem\\_eval/protocol.pdf](http://www.epa.gov/osw/hazard/correctiveaction/resources/guidance/rem_eval/protocol.pdf)
- Wiedemeier, T. H., Rifai H. S., Newell C. J., & Wilson J.T. (1999). *Natural attenuation of fuels and chlorinated solvents in the subsurface*. New York: John Wiley & Sons.
- Wilson, J. T., Kampbell, D. H., Weaver, J. W., Wilson, B. H., Imbrigiotta, T. E., & Ehlke, T. A. (1995). A review of intrinsic bioremediation of trichloroethylene in ground water at Picatinny Arsenal, New Jersey, and St. Joseph, Michigan. In *Symposium on Bioremediation of Hazardous Wastes: Research, Development, and Field Evaluation, September, 1995* (pp. 13-16). EPA-540-R-95-532. Washington, DC: U.S. EPA ORD. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <http://www.epa.gov/tio/download/remed/biosym.pdf>
- Woodard & Curran (1997a). *Bosch Braking Systems, St. Joseph, Michigan, Final Feasibility Study Report, July 1997*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://docs.google.com/file/d/0B5EiCByYSLKsWkYzbm1vdF8tX28/edit>
- Woodard & Curran (1997b). *Bosch Braking Systems, St. Joseph, Michigan, Final Remedial Investigation Report, July 1997*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://docs.google.com/file/d/0B5EiCByYSLKsY3A5aWpMMUdzQWM/edit>
- Woodard & Curran (1997c). *Final Remedial Investigation Report for Bosch Braking Systems, St. Joseph, Michigan, Appendix A-H, July 1997*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://docs.google.com/file/d/0B5EiCByYSLKsmbmhX3Y1WFAxNE0/edit>
- Woodard & Curran (1999a). *Lake Study Data Report*. Prepared for Bosch Braking Systems, St. Joseph, Michigan, December 1999. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://docs.google.com/file/d/0B5EiCByYSLKsLVlxWjhGUi1SWFk/edit>
- Woodard & Curran (1999b). *Long Term Monitoring Well Network Work Plan, Bendix/ Bosch Superfund Site*. Prepared for Bosch Braking Systems, March 1999. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://docs.google.com/file/d/0B5EiCByYSLKsVi16UXVMclkwS2M/edit>
- Woodard & Curran (2001a). *Baseline groundwater data collection program RD/RA groundwater monitoring results from April 2001, Robert Bosch Corporation, St. Joseph, Michigan, June 2001*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://docs.google.com/file/d/0B5EiCByYSLKsdmJuN3hqCF6UTA/edit>
- Woodard & Curran (2001b). *Baseline groundwater data collection program RD/RA groundwater monitoring results from June 2001, Robert Bosch Corporation, St. Joseph, Michigan, September 2001*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://docs.google.com/file/d/0B5EiCByYSLKsMI9Qa2ZBSFBiUGs/edit>
- Woodard & Curran (2002a). *Baseline groundwater data collection program RD/RA groundwater monitoring results from April 2002, Robert Bosch Corporation, St. Joseph, Michigan,*

- September 2002. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://docs.google.com/file/d/0B5EiCByYSLKsVmh1Mk1vU0kzQlk/edit>
- Woodard & Curran (2002b). *Baseline groundwater data collection program RD/RA groundwater monitoring results from June 2002, Robert Bosch Corporation, St. Joseph, Michigan, November 2002*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://docs.google.com/file/d/0B5EiCByYSLKsVmh1Mk1vU0kzQlk/edit>
- Woodard & Curran (2003). *Baseline groundwater data collection program RD/RA groundwater monitoring results from April 2003, Robert Bosch Corporation, St. Joseph, Michigan, July 2003*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://docs.google.com/file/d/0B5EiCByYSLKsVGJ1ekhEQlpiZjA/edit>
- Woodard & Curran (2004). *Final Report for baseline groundwater data collection program RD/RA groundwater monitoring results from September 2003, Robert Bosch Corporation, St. Joseph, Michigan, January 2004*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://docs.google.com/file/d/0B5EiCByYSLKsM1pSaDctdk9RZUU/edit>
- Woodard & Curran (2005a). *Quarterly Groundwater Monitoring Report - September 2004, Bendix Superfund Site, St. Joseph, Michigan, January 2005*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://docs.google.com/file/d/0B5EiCByYSLKsN1o5YnIwdUdjTk0/edit>
- Woodard & Curran (2005b). *Quarterly Groundwater Monitoring Report - June 2005, Bendix Superfund Site, St. Joseph, Michigan, October 2005*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://docs.google.com/file/d/0B5EiCByYSLKsMGFsUIJkcVdJanc/edit>
- Woodard & Curran (2010). *Bendix Superfund Site, St. Joseph, Michigan, Quarterly Groundwater Monitoring Report, December 2009*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από <https://docs.google.com/file/d/0B5EiCByYSLKsRjRWRkZCdTIYVFk/edit>

### ***Ελληνική Βιβλιογραφία***

- Πανταζίδου Μ. & Παπασιώπη Ν. (2007) Εμπειρίες από το ξεκίνημα μιας άτυπης Θεματικής Επιτροπής Ορολογίας. ELETO – 6th Conference «Hellenic Language and Terminology» 1-3 November 2007, Athens, GREECE. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου, 2014, από [http://www.eleto.gr/download/Conferences/6th%20Conference/6th\\_20-22-PantazidouMarinaPapasiopiNymfodora%20Full-paper\\_V10.pdf](http://www.eleto.gr/download/Conferences/6th%20Conference/6th_20-22-PantazidouMarinaPapasiopiNymfodora%20Full-paper_V10.pdf)



## Παράρτημα Α: Μέθοδος Buscheck & Alcantar (1995)

Σε αυτό το παράρτημα, παρουσιάζεται συνοπτικά η μέθοδος υπολογισμού των συντελεστών βιομετασχηματισμού Buscheck & Alcantar (1995). Σύμφωνα με τους McNab & Doohar (1998), οι Buscheck & Alcantar (1995) πρότειναν ότι οι συγκεντρώσεις των ρύπων που έχουν ανιχνευθεί σε δείγματα του υπογείου νερού από φρέατα παρακολούθησης κατάντη μιας πηγής σταθερής έντασης, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης, σε συνθήκες μόνιμης μεταφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των συντελεστών βιομετασχηματισμού. Θεωρώντας ότι ο βιομετασχηματισμός του ρύπου αντιπροσωπεύεται από έναν συντελεστή υποβάθμισης 1<sup>ης</sup> τάξης, έδειξαν ότι για την ιδανική περίπτωση μονοδιάστατης μεταγωγής και μονοδιάστατης μεταφοράς του ρύπου, ο συντελεστής βιοαποδόμησης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{v_s}{4Ra_x} \times \left( \left[ 1 + 2a_x \left( \frac{k}{v_s} \right) \right]^2 - 1 \right) \quad (\text{A.1})$$

όπου:

$v_s$ = ταχύτητα μεταγωγής του υπόγειου νερού (m/yr)

R= συντελεστής υστέρησης

$a_x$ = συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς (m)

Ο όρος  $k/v_s$  αντιπροσωπεύει την κλίση της εκθετικής γραμμής ελαχίστων τετραγώνων στο ημιλογαριθμικό διάγραμμα της συγκέντρωσης του ρύπου σε σχέση με την απόσταση κατάντη της πηγής, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης.

Η Εξίσωση A.1 οδηγεί σε υπερεκτίμηση των συντελεστών βιομετασχηματισμού, καθώς τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης μεταφοράς αθροίζονται με αυτά της βιοαποδόμησης. Ωστόσο, αποδίδει μια λογική πρώτη εκτίμηση των συντελεστών βιομετασχηματισμού. Όσο περισσότερα είναι τα φρέατα παρακολούθησης από τα οποία θα χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις τόσο αυξάνεται η ακρίβεια της μεθόδου (McNab & Doohar, 1998).



## Παράρτημα Β: Υπολογισμός κατακόρυφης εγκάρσιας διάστασης (πάχους) της πηγής για την προσομοίωση του χώρου Bendix

Σε αυτό το παράρτημα, παρουσιάζεται η λογική με την οποία λήφθηκε η απόφαση για την τιμή του πάχους της πηγής, για την προσομοίωση του περιστατικού Bendix με το λογισμικό BIOCHLOR. Στον Πίνακα Β.1 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν σε διαφορετικά βάθη δειγματοληψίας, στην κορεσμένη ζώνη του υδροφορέα, το 1991, σύμφωνα με τους Woodard & Curran (1997c), στις γεωτρήσεις T 2-5 και T 1-4, που βρίσκονται κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ρυπασμένης έκτασης και απέχουν 88 και 140 m, αντίστοιχα, από τη θέση δειγματοληψίας SC-20D που θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει την πηγή της ρύπανσης στον χώρο Bendix.

Πίνακας Β.1 Μετρήσεις πεδίου στις γεωτρήσεις T 2-5 και T 1-4 σε διαφορετικά βάθη δειγματοληψίας της κορεσμένης ζώνης του υδροφορέα το 1991 (Woodard & Curran, 1997c)

Ταυτότητα γεώτρησης	Βάθος (m)	TCE (mg/L)	cis-DCE (mg/L)	VC (mg/L)
T 2-5	13,7	0,084	0,026	0,038
	15,2	1,72	3,19	1,22
	16,8	2,91	0,952	0,384
	18,3	<b>13,5</b>	1,41	0,185
	19,8	<b>55,4</b>	10,1	0,398
	21,3	<b>43,9</b>	<b>110</b>	3,57
	22,9	3,95	<b>128</b>	4,55
	24,4	1,21	<b>50,9</b>	3,38
	25,9	0,917	6,49	4,43
	27,4	8,17	16	3,82
T 1-4	13,7	0,012	0,031	0,007
	15,2	0,023	0,558	1,17
	16,8	0,187	1,83	2,24
	18,3	0,164	4,25	3,76
	19,8	0,701	2,82	0,97
	21,3	<b>21,3</b>	26	2,87
	22,9	<b>18,6</b>	19	5,69
	24,4	0,622	<b>31,3</b>	11
25,9	1,39	15,2	5,25	

TCE= Τριχλωροαιθέριο, cis-DCE= cis-1,2-Διχλωροαιθέριο, VC= Βινυλοχλωρίδιο

Με έντονα μαύρα γράμματα είναι γραμμένες οι συγκεντρώσεις που ξεπερνούν το 1% της διαλυτότητας του εκάστοτε χλωροαιθενίου (TCE: 1100 mg/L, cis-DCE: 2500 mg/L)

Όπως φαίνεται στον Πίνακα Β.1, το 1991 ανιχνεύθηκαν σχετικά κοντά στην πηγή συγκεντρώσεις που ξεπερνούν το 1% της υδατικής διαλυτότητας των TCE και cis-DCE (TCE: 1100 mg/L, cis-DCE: 2500 mg/L) σε βάθος 18,3 έως 24,4 m (διάστημα 6,1 m). Από τα 16,8 m βάθος και πάνω και από τα 24,4 m και κάτω οι συγκεντρώσεις είναι 1-4 τάξεις μεγέθους μικρότερες από τις μέγιστες καταγεγραμμένες. Χρησιμοποιώντας τον «εμπειρικό κανόνα του 1%», θεωρήθηκε ότι στο διάστημα των 6,1m είναι πιθανό να υπάρχει μη υδατική φάση (DNAPL). Το πάχος της πηγής λήφθηκε ίσο με 7,2 m λαμβάνοντας υπόψη και το μισό του διαστήματος από το αμέσως προηγούμενο και το αμέσως επόμενο βάθος δειγματοληψίας, δηλαδή:

$$\text{πάχος πηγής} = 6,1 + (18,3-16,8)/2 + (25,9-24,4)/2 = 7,2 \text{ m.}$$

## Ελληνοαγγλικό γλωσσάρι τεχνικών όρων

### A

Αεροδιασκορπισμός	Air sparging
Αναφορά προόδου πενταετίας	Five-year review report
Άντληση εδαφικού αέρα	Soil vapor extraction (SVE)
Απορρύπανση με αερισμό εδάφους	Soil venting
(Αυτοσχέδια) υπαίθρια δεξαμενή λυμάτων	Lagoon

### B

Βιολογική αποκατάσταση	Bioremediation
------------------------	----------------

### Δ

Διάθεση επικίνδυνων αποβλήτων	Hazardous waste disposal
Δοκιμή Διείσδυσης Κώνου	Cone Penetration Test (CPT)
Δραστηριότητες εξυγίανσης- απορρύπανσης	Cleanup activities

### E

Εγκιβωτισμός ρύπου	Containment
Εκσκαφή	Excavation
Ενδογενής βιοαποκατάσταση	Intrinsic bioremediation
Ενέργειες αποκατάστασης	Remedial actions
Ενισχυμένη βιοαποκατάσταση	Enhanced bioremediation
Επεμβατική μέθοδος αποκατάστασης	Active remediation method
Εννοιακό μοντέλο	Conceptual model
Επικίνδυνα απόβλητα	Hazardous waste
Επιτόπια επεξεργασία	In situ treatment
Έρευνα πεδίου	Field investigation

### Θ

Θερμική επεξεργασία	Thermal treatment
---------------------	-------------------

### K

Κάλυμμα	Cap
---------	-----

### Λ

Λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α	National Priorities List (NPL)
--------------------------------------	--------------------------------

### M

Μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση στο πόσιμο νερό	Maximum Contaminant Level (MCL)
---	---------------------------------

Μέθοδος άντλησης και επεξεργασίας	Pump and treat
Μέθοδοι διεργασιακής επέμβασης	Process-based methods
Μέθοδοι μηχανικής επέμβασης	Engineering-based methods
Μελέτη χαρακτηρισμού ρυπασμένου χώρου	Site characterization
<b>Ο</b>	
Οδός έκθεσης	Exposure pathway
<b>Π</b>	
Παρακολουθούμενη φυσική εξασθένηση	Monitored Natural Attenuation (MNA)
Πιλοτική μελέτη	Pilot study
Πρακτικό απόφασης	Record of decision (ROD)
Προβλεπόμενο χρονικό πλαίσιο αποκατάστασης	Estimated remediation time frame
Πρόγραμμα εξυγίανσης Superfund	Superfund Cleanup Program
<b>Ρ</b>	
Ρυπασμένα μέσα	Contaminated media
Ρυπασμένος χώρος	Contaminated site
Ρύπος ενδιαφέροντος	Contaminant of Concern (COC)
<b>Σ</b>	
Σημείο συμμόρφωσης	Point of compliance
Στόχος αποκατάστασης	Remedial objective
Συγκέντρωση συμμόρφωσης	Compliance concentration
Σχέδιο αποκατάστασης	Remedial plan
Σχέδιο έκτακτης ανάγκης	Contingency plan
<b>Τ</b>	
Τιμές υποβάθρου	Background values
<b>Υ</b>	
Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος	Environmental Protection Agency (EPA)
Υπόγεια δεξαμενή αποθήκευσης	Underground Storage Tank (UST)
Υποενότητα διαχείρισης της ρύπανσης	Operable unit (OU)
Ύποπτος χώρος	Proposed site (Superfund Terminology)
<b>Φ</b>	
Φρέαρ παρακολούθησης	Monitoring well
Φυτοαποκατάσταση	Phytoremediation

**X**

Χημική οξείδωση

Chemical oxidation

Χρόνος αποκατάστασης

Remediation time

Χώρος απόρριψης επικίνδυνων αποβλήτων

Hazardous waste dump

Χώρος υγειονομικής ταφής αποβλήτων

Landfill





## Αγγλοελληνικό γλωσσάρι τεχνικών όρων

### A

Active remediation method  
Air sparging

Επεμβατική μέθοδος αποκατάστασης  
Αεροδιασκορπισμός

### B

Background values  
Bioremediation

Τιμές υποβάθρου  
Βιολογική αποκατάσταση

### C

Cap  
Chemical oxidation  
Cleanup activities  
Compliance concentration  
Conceptual model  
Cone Penetration Test (CPT)  
Containment  
Contaminant of Concern (COC)  
Contaminated media  
Contaminated site  
Contingency plan

Κάλυμμα  
Χημική οξείδωση  
Δραστηριότητες εξυγίανσης- απορρύπανσης  
Συγκέντρωση συμμόρφωσης  
Εννοιακό μοντέλο  
Δοκιμή Διείσδυσης Κώνου  
Εγκιβωτισμός ρύπου  
Ρύπος ενδιαφέροντος  
Ρυπασμένα μέσα  
Ρυπασμένος χώρος  
Σχέδιο έκτακτης ανάγκης

### E

Engineering-based methods  
Enhanced bioremediation  
Environmental Protection Agency  
Estimated remediation time frame  
Excavation  
Exposure pathway  
Exposure point

Μέθοδοι μηχανικής επέμβασης  
Ενισχυμένη βιοαποκατάσταση  
Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος  
Προβλεπόμενο χρονικό πλαίσιο αποκατάστασης  
Εκσκαφή  
Οδός έκθεσης  
Σημείο έκθεσης

### F

Field investigation  
Five-year review report

Έρευνα πεδίου  
Αναφορά προόδου πενταετίας

### H

Hazardous waste  
Hazardous waste disposal  
Hazardous waste dump

Επικίνδυνα απόβλητα  
Διάθεση επικίνδυνων αποβλήτων  
Χώρος απόρριψης επικίνδυνων αποβλήτων

### I

In situ treatment

Επιτόπια επεξεργασία

Intrinsic bioremediation

Ενδογενής βιοαποκατάσταση

## **L**

Lagoon

(Αυτοσχέδια) υπαίθρια δεξαμενή λυμάτων

Landfill

Χώρος υγειονομικής ταφής αποβλήτων

## **M**

Maximum Contaminant Level (MCL)

Μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση στο πόσιμο νερό

Monitored Natural Attenuation (MNA)

Παρακολουθούμενη Φυσική Εξασθένηση

Monitoring network

Δίκτυο φρεάτων παρακολούθησης

Monitoring well

Φρέαρ παρακολούθησης

## **N**

National Priorities List (NPL)

Λίστα χώρων προτεραιότητας των Η.Π.Α

## **O**

Operable unit (OU)

Υποενότητα διαχείρισης της ρύπανσης

## **P**

Phytoremediation

Φυτοαποκατάσταση

Pilot study

Πιλοτική μελέτη

Point of compliance

Σημείο συμμόρφωσης

Process-based methods

Μέθοδοι διεργασιακής επέμβασης

Proposed site (Superfund Terminology)

Υποπτος χώρος

Pump and treat

Μέθοδος άντλησης και επεξεργασίας

## **R**

Record of decision (ROD)

Πρακτικό απόφασης

Remedial actions

Ενέργειες αποκατάστασης

Remedial objective

Στόχος αποκατάστασης

Remedial plan

Σχέδιο αποκατάστασης

Remediation time

Χρόνος αποκατάστασης

Risk assessment

Αποτίμηση διακινδύνευσης

## **S**

Site characterization

Μελέτη χαρακτηρισμού ρυπασμένου χώρου

Soil vapor extraction (SVE)

Άντληση εδαφικού αέρα

Superfund Cleanup Program

Πρόγραμμα εξυγίανσης Superfund

## **T**

Thermal treatment

Θερμική επεξεργασία