



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αξιολόγηση της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης
κατά την εφαρμογή της σε πλήρη κλίμακα**

Βασιλική Γαλλία

Επιβλέπουσα: Μαρίνα Πανταζίδου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Τομέα
Γεωτεχνικής Σχολής Πολιτικών Μηχανικών
Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2022

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αξιολόγηση της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης
κατά την εφαρμογή της σε πλήρη κλίμακα**

Βασιλική Γαλλία

A.M. 01114470

Αθήνα, 14 Ιουλίου 2022

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κυρία Μαρίνα Πανταζίδου, για την ανεξάντλητη υπομονή της, την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Χωρίς τις υποδείξεις και τις συμβουλές της, η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα μπορούσε να έχει ολοκληρωθεί.

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι αφιερωμένη στον παππού μου Ευάγγελο, στον πατέρα μου Χρυσόστομο και στους αδελφούς μου, Ευάγγελο και Νικήτα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα χλωριωμένα αιθυλένια τετραχλωροαιθέριο (PCE) και τριχλωαιθέριο (TCE) είναι ρύποι ανθρωπογενούς κυρίως προέλευσης που έκαναν την εμφάνισή τους κατά τη δεκαετία του 1920. Η εκτεταμένη χρήση τους, σε συνδυασμό με την μη ελεγχόμενη διαχείριση και απόρριψή τους, οδήγησε σε ρύπανση του υπεδάφους. Η Αναερόβια Βιολογική Αναγωγική Αποχλωρίωση (Anaerobic Biological Reductive Dechlorination) αποτελεί μία αναπτυσσόμενη τεχνολογία αποκατάστασης υπόγειων υδροφορέων ρυπασμένων με χλωροαιθένια κατά την οποία, κάτω από αναερόβιες συνθήκες, οι μικροοργανισμοί ανάγουν τα χλωροαιθένια, τα χρησιμοποιούν δηλαδή ως δέκτες ηλεκτρονίων, αντλώντας ενέργεια από αυτήν την αντίδραση αναγωγής. Η εφαρμογή της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης στο πεδίο απαιτεί προσθήκη των απαιτούμενων δοτών ηλεκτρονίων, καθώς και μικροοργανισμών σε κάποιες περιπτώσεις. Αν και μέχρι σήμερα έχουν δημοσιευτεί πολυάριθμες εργαστηριακές κυρίως μελέτες σχετικά με την επίδραση πλήθους παραμέτρων στην επίδοση της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης, θεωρείται εξίσου χρήσιμο να μπορεί να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητά της και σε εφαρμογές πεδίου σε πλήρη κλίμακα. Αυτός είναι και ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Πρώτο βήμα στην επίτευξη του παραπάνω στόχου ήταν η δημιουργία του απαραίτητου δείγματος χώρων ρυπασμένων με χλωριωμένα αιθυλένια, στους οποίους η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση. Με αφετηρία διπλωματική εργασία που ολοκληρώθηκε προ δεκαετίας και με περαιτέρω αναζήτηση στη βιβλιογραφία, δημιουργήθηκε μία συλλογή πέντε χώρων ρυπασμένων με χλωριωμένα αιθυλένια στους οποίους η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση. Το βασικό κριτήριο επιλογής των περιστατικών ήταν η συστηματική παρακολούθησή τους και επομένως η ύπαρξη μακρίας χρονοσειράς μετρήσεων των συγκεντρώσεων στο πεδίο. Τα βασικά ζητούμενα στην παρούσα εργασία είναι η ποσοτική και η ποιοτική αξιολόγηση της μεθόδου κατά την εφαρμογή της στο πεδίο. Για τον λόγο αυτό, αξιοποιήθηκαν οι μετρήσεις των πηγαδιών παρακολούθησης του εκάστοτε ρυπασμένου χώρου, με σκοπό (α) την μελέτη της εξέλιξης των συγκεντρώσεων και (β) τον υπολογισμό του χρόνου ημιζωής για το κάθε στάδιο της αποχλωριωτικής διαδικασίας (δηλ. κατά την μετατροπή του τετραχλωροαιθέριου, σε τριχλωαιθέριο και στη συνέχεια σε διχλωροαιθέριο και βινυλοχλωρίδιο). Στη συνέχεια, αυτοί οι χρόνοι ημιζωής συγκρίθηκαν με χρόνους ημιζωής της ενδογενούς (χωρίς προσθήκη δότη) και της ενισχυμένης (με προσθήκη δότη) αποχλωρίωσης από την βιβλιογραφία. Η εξοικείωση με τις μετρήσεις στο πεδίο υπέδειξαν την ανάγκη κατηγοριοποίησης του μοτίβου των αλλαγών των συγκεντρώσεων. Έτσι, προτάθηκαν τέσσερις κατηγορίες τάσεων συμπεριφοράς με κωδικές ονομασίες Πρόοδος, Υποτροπή, Υστέρηση και Στασιμότητα, και προσδιορίστηκε η συχνότητα καταγραφής τους.

Η επεξεργασία των δεδομένων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η επίδοση της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης χαρακτηρίζεται ως μεικτή, εφόσον δεν μπορεί να κριθεί μονοσήμαντα ως επιτυχημένη ή αποτυχημένη. Ούτε οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθινίων ούτε οι ρυπασμένες εκτάσεις δεν μειώθηκαν συστηματικά σε όλους τους επιμέρους υδροφορείς σε κάποιο από τα πέντε περιστατικά που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία. Ως ένας λιγότερο φιλόδοξος στόχος, προτείνεται να θεωρείται ικανοποιητική η επίδοση της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης όταν το ποσοστό των πηγαδιών παρακολούθησης με συμπεριφορά Πρόοδος και Υστέρηση είναι μεγαλύτερο από 50%. Η συνθήκη αυτή ικανοποιείται για τρεις από τους πέντε ρυπασμένους χώρους που μελετήθηκαν. Επιπλέον, μια

σημαντική παράμετρος επιτυχίας είναι η ανάγκη επαναληπτικής προσθήκης δότη. Η συχνότητα προσθήκης δότη κυμάνθηκε μεταξύ κάθε ένα έτος περίπου έως κάθε 3.5 έτη. Οι υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής των χλωριωμένων αιθυλενίων κατά τις εφαρμογές πλήρους κλίμακας της ενισχυμένης αποχλωρίωσης που προέκυψαν από μετρήσεις πηγαδιών παρακολούθησης με συμπεριφορά Πρόοδο, Υποτροπή και Υστέρηση κυμαίνονται από περίπου δύο μήνες έως 1.6 έτη για τους πρωτογενείς ρύπους τετραχλωροαιθέριο και τριχλωαιθέριο. Για τα θυγατρικά προϊόντα οι χρόνοι ημιζωής αυξάνονται, φθάνοντας τις μέγιστες τιμές των δύο ετών για το cis 1,2-διχλωροαιθέριο (cis 1,2 DCE) και 2.5 ετών για το βινυλοχλωρίδιο (VC). Οι τιμές αυτές στην πλειονότητα των περιπτώσεων ήταν σημαντικά μικρότερες από τις αντίστοιχες της ενδογενούς αποχλωρίωσης, για την οποία οι μετρήσεις των περισσότερων πηγαδιών δείχνουν ότι μετά από 13-14 έτη συστηματικής παρακολούθησης η αποχλωριωτική διαδικασία προχωρά με αρκετά αργότερους ρυθμούς και σε κάποιες περιπτώσεις δίχως καν να ανιχνεύονται θυγατρικά προϊόντα.

Το μικρό δείγμα ρυπασμένων χώρων προς αξιολόγηση, αλλά και το γεγονός ότι η αποκατάσταση των περισσότερων εξ αυτών είναι εν εξελίξει, περιορίζει την ισχύ των ευρημάτων. Όμως, η παρούσα εργασία έχει ένα στοιχείο πρωτοτυπίας, καθώς προτείνει μια κατηγοριοποίηση των παρατηρούμενων τάσεων συμπεριφοράς των πηγαδιών παρακολούθησης, καταγράφει τα ποσοστά εμφάνισής τους και, με βάση αυτά τα ποσοστά, υποδεικνύει ένα κριτήριο αξιολόγησης της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης.

Λέξεις κλειδιά: Χλωριωμένα αιθυλένια, εξυγίανση υπόγειων υδροφορέων, Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση, εφαρμογές πλήρους κλίμακας

Assessment of the performance of Anaerobic Reductive Dechlorination in full scale applications

ABSTRACT

Chlorinated ethylenes tetrachloroethene (PCE) and trichloroethene (TCE) are pollutants of mainly anthropogenic origin that appeared in the 1920s. Their extensive use, combined with their uncontrolled management and disposal, led to subsurface contamination. Anaerobic Biological Reductive Dechlorination is a developing technology for the restoration of chloroethene-contaminated groundwater aquifers in which, under anaerobic conditions, microorganisms reduce chloroethenes, that is, they use them as electron acceptors, drawing energy from this reduction reaction. The application of Anaerobic Reductive Dechlorination in the field involves addition of the required electron donors, as well as addition of microorganisms in some cases. Numerous studies, mainly in the laboratory, have been published to date on the effect of a large number of parameters on the performance of Anaerobic Reductive Dechlorination. The ability to assess its effectiveness in full scale field applications is considered equally useful. This is the aim of the present thesis.

The first step in achieving the aforementioned aim was the creation of the necessary sample of chlorinated ethene-contaminated sites, for which the selected remedial technology is Anaerobic Reductive Dechlorination. Having as a starting point a thesis completed a decade ago, and with further literature search, a collection of five chlorinated ethene-contaminated sites was assembled. The main criterion for the selection of the cases was their systematic monitoring and therefore the existence of a long time series of measurements of concentrations in the field. The main objectives of the present thesis are the quantitative and qualitative evaluation of the remedial method during its application in the field. To this end, the measurements from the monitoring wells of each polluted site were used in order to (a) study the evolution of the concentrations and (b) calculate the half-life for each stage of the dechlorinating process (i.e. during the sequential conversion of tetrachloroethene to trichloroethene, and then to dichloroethene and vinyl chloride). These half-lives were then compared with half-lives of natural attenuation (without the addition of donor) and enhanced dechlorination (with the addition of donor) from the literature. Familiarization with the measurements in the field indicated the need to categorize the pattern of changes in concentrations. Thus, four categories of trends were proposed and given the code names Progress, Relapse, Hysteresis and Stagnation, and their recorded frequency was calculated.

The analysis of the data leads to the conclusion that the performance of Anaerobic Reductive Dechlorination is classified as mixed, since it cannot be judged unequivocally as

successful or failed. Neither the chloroethene concentrations nor the contaminated areas were systematically reduced in all individual aquifers in any of the five cases studied in this paper. As a less ambitious objective, we propose that the performance of Anaerobic Reductive Dechlorination be considered satisfactory when the proportion of the monitoring wells with Progress and Hysteresis behavior is greater than 50%. This condition is satisfied for three out of the five contaminated sites studied. In addition, an important parameter of success is the need for a repetitive addition of a donor. The frequency of donor addition ranged between approximately every one to every 3.5 years. The calculated half-life values of chlorinated ethylenes during full-scale applications of enhanced dechlorination resulting from measurements from monitoring wells with behavior Progress, Relapse and Hysteresis range from approximately two months to 1.6 years for the primary pollutants tetrachloroethene and trichloroethene. For daughter products the values of the half-lives increase, reaching maximum values of two years for cis 1,2-dichloroethene (cis 1,2-DCE) and 2.5 years for vinyl chloride (VC). In the majority of cases, these values were significantly lower than their counterparts for natural attenuation, for which the measurements of most of the wells indicate that after 13-14 years of systematic monitoring the dechlorinating process proceeds at a much slower pace and in some cases even without the detection of daughter products.

The small sample of contaminated sites to be evaluated, as well as the fact that the restoration of most of them is in progress, limit the validity of the findings. However, the present study has an element of originality, as it proposes a categorization of the trends observed at monitoring wells, records their occurrence rates and, based on these rates, puts forth a criterion for the evaluation of Anaerobic Reductive Dechlorination.

Key words: Chlorinated ethylenes, aquifer remediation, Anaerobic Reductive Dechlorination, full scale applications

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vi
ABSTRACT.....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	xii
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή	1
1.1. Στόχος	1
1.2. Πλαίσιο	1
1.3. Ιδιαιτερότητες και ζητούμενα	2
1.4. Βασικά σημεία μεθοδολογίας	2
1.5. Οργάνωση κειμένου.....	2
Κεφάλαιο 2 - Βιβλιογραφική ανασκόπηση	4
2.1. Εισαγωγή	4
2.2. Ρύπανση υπεδάφους.....	4
2.2.1. Τα χλωριωμένα αιθυλένια ως ρύποι στο υπόγειο νερό.....	4
2.3. Τεχνολογίες αποκατάστασης ρυπασμένων υδροφορέων.....	6
2.3.1. Το κανονιστικό πλαίσιο για ρυπασμένους χώρους στις Η.Π.Α.....	6
2.4. Η Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση ως τεχνολογία αποκατάστασης.....	7
2.4.1. Ενδογενής Αποχλωρίωση.....	9
2.4.2. Ενισχυμένη Αποχλωρίωση.....	10
2.4.2.1. Βιοδιέγερση.....	10
2.4.2.2. Βιοεπαύξηση	11
2.4.2.3. Δότες ηλεκτρονίων και μέθοδοι χορήγησης	11
2.5. Σύνοψη.....	12
Κεφάλαιο 3 - Μεθοδολογία	13
3.1. Εισαγωγή	13

3.2. Αναζήτηση περιστατικών	13
3.3. Κατηγοριοποίηση τάσεων συμπεριφοράς.....	14
3.4. Υπολογισμός χρόνων ημιζωής.....	19
3.5. Σύνοψη.....	21
Κεφάλαιο 4 - Περιστατικά εφαρμογής της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης σε πλήρη κλίμακα	22
4.1. Εισαγωγή	22
4.2. Δείγμα περιστατικών	22
4.3. Βασικά δεδομένα περιστατικών	23
4.4. Πινακοποίηση περιστατικών και συγκριτικός σχολιασμός.....	32
Κεφάλαιο 5 - Επεξεργασία δεδομένων.....	34
5.1. Εισαγωγή	34
5.2. Καταγεγραμμένες συμπεριφορές.....	34
5.3. Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής	38
5.3.1. Σχολιασμός.....	40
5.3.2. Τιμές χρόνων ημιζωής στη βιβλιογραφία	40
5.4. Αβεβαιότητα αποτελεσμάτων.....	46
Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα.....	47
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	52
ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	52
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	61
Παράρτημα Α: Αναλυτική παρουσίαση των πέντε περιστατικών ενισχυμένης αποχλωρίωσης.....	62
Παράρτημα Β: Υπολογισμός χρόνων ημιζωής - Γραμμικές προσεγγίσεις	128
Παράρτημα Γ: Γλωσσάρι ορολογίας	153
Παράρτημα Δ: Πίνακας συντμήσεων και αρκτικόλεξων	155

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Κατάλογος Πινάκων

2.1 Μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις χλωριωμένων αιθυλένιων στο πόσιμο νερό	5
4.1 Επιλεγμένα δεδομένα για τις εφαρμογές πλήρους κλίμακας και την πρόοδο της αποχλωρίωσης	33
5.1 Καταγραφή τάσεων συμπεριφοράς στις εφαρμογές πλήρους κλίμακας των πέντε περιστατικών αποχλωρίωσης.....	37
5.2 Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής στο δείγμα των πέντε περιστατικών αποχλωρίωσης.....	39
5.3 Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής κατά την εφαρμογή της ενδογενούς αποχλωρίωσης στο πεδίο	44
5.4 Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής κατά την εφαρμογή της ενισχυμένης αποχλωρίωσης στο πεδίο από ερευνητικές μελέτες.....	45
B.1 Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής ανά πηγάδι παρακολούθησης στην Περιοχή 6 της Αεροπορικής Βάσης Ντόβερ.....	132
B.2 Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής ανά πηγάδι παρακολούθησης στην Περιοχή 5 της Αεροπορικής Βάσης Ντόβερ.....	136
B.3 Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής ανά πηγάδι παρακολούθησης στην Περιοχή SS015 της Αεροπορικής Βάσης Τράβις	138
B.4 Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής ανά πηγάδι παρακολούθησης στην ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα.....	143
B.5 Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής ανά πηγάδι παρακολούθησης στην πρώην εγκατάσταση 87 της πρώην Αεροπορικής Βάσης Νιούαρκ	144

Κατάλογος Σχημάτων

2.1 Το μονοπάτι της Αναερόβιας Βιολογικής Αναγωγικής Αποχλωρίωσης με την κύρια πορεία να ακολουθεί τα βέλη	8
2.2 Διακρίσεις κατά την εφαρμογή της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης στο πεδίο	9
3.1 Πηγάδι παρακολούθησης με συμπεριφορά πρόοδο (MW214D), βαθεία στρώση υδροφορέα στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ.....	16

3.2 Πηγάδι παρακολούθησης με συμπεριφορά υποτροπή (DM3517M), βαθεία στρώση υδροφορέα στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ.....	17
3.3 Πηγάδι παρακολούθησης με συμπεριφορά υστέρηση (DM3019D), βαθεία στρώση υδροφορέα στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	18
3.4 Πηγάδι παρακολούθησης με συμπεριφορά στασιμότητα (M-20-D2), βαθεία στρώση 2 του υδροφορέα στην ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα.....	19
A.1.1 Φωτογραφία της ευρύτερης περιοχής της Αεροπορικής Βάσης Ντόβερ μαζί με τη ρυπασμένη έκταση της Περιοχής 6 στη βαθεία στρώση πριν από την έναρξη της εφαρμογής πλήρους κλίμακας το 2006	62
A.1.2 Τοποθεσίες πηγών ρύπανσης στη ρυπασμένη περιοχή της βαθείας στρώσης στην Περιοχή 6 της Αεροπορικής Βάσης Ντόβερ το 2006	64
A.1.3 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης WELL 7D κατά τη διενέργεια πιλοτικής δοκιμής στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	65
A.1.4 Τοποθεσίες συστημάτων αποκατάστασης και πηγαδιών παρακολούθησης πριν την εφαρμογή πλήρους κλίμακας το 2006 στη ρυπασμένη περιοχή της βαθείας στρώσης στην Περιοχή 6 της Αεροπορικής Βάσης Ντόβερ.....	67
A.1.5 Ρυπασμένες περιοχές με χλωροαιθένια στη ρηχή στρώση το 2006 στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	69
A.1.6 Ρυπασμένες περιοχές με χλωροαιθένια στη ρηχή στρώση το 2020 στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	70
A.1.7 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3030S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	71
A.1.8 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3001S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	72
A.1.9 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένια στη βαθεία στρώση το 2006 στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	74
A.1.10 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένια στη βαθεία στρώση το 2020 στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	75
A.1.11 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3019D της βαθείας στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	76
A.1.12 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3028D της βαθείας στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	77
A.1.13 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3018D της βαθείας στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	77

A.2.1 Φωτογραφία της ευρύτερης περιοχής της Αεροπορικής Βάσης Ντόβερ μαζί με τις ρυπασμένες εκτάσεις της βαθιάς στρώσης των Περιοχών 5 και 6 πριν από την έναρξη των εφαρμογών πλήρους κλίμακας.....	78
A.2.2 Τοποθεσίες πηγών ρύπανσης στην Περιοχή 5 της Αεροπορικής Βάσης Ντόβερ στη ρυπασμένη έκταση της βαθιάς στρώσης το Φεβρουάριο του 2006.....	79
A.2.3 Ρυπασμένες περιοχές με χλωροαιθένια στη ρηχή στρώση το 2006 στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ.....	82
A.2.4 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένια στη βαθιά στρώση το 2006 στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ.....	83
A.2.5 Ρυπασμένες περιοχές με χλωροαιθένια στη ρηχή στρώση το 2020 στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ.....	85
A.2.6 Ρυπασμένες περιοχές με χλωροαιθένια στη βαθιά στρώση το 2020 στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ.....	86
A.2.7 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3502S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ.....	87
A.2.8 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW214S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ.....	88
A.2.9 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM331D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ.....	88
A.2.10 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3517M της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ.....	89
A.3.1 Φωτογραφία της Αεροπορικής Βάσης Τράβις, Καλιφόρνια, Η.Π.Α.....	90
A.3.2 Φωτογραφίες της Περιοχής SS015 της Βάσης Τράβις τα έτη 1993 και 2020.....	91
A.3.3 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW216X15 στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις κατά τη διενέργεια της πιλοτικής δοκιμής (οι μετρήσεις συνεχίστηκαν και κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας).....	92
A.3.4 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης IW2128X15 στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις κατά τη διενέργεια της πιλοτικής δοκιμής.....	93
A.3.5 Ρυπασμένες περιοχές με TCE το 2015 στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις.....	95
A.3.6 Ρυπασμένες περιοχές με TCE το 2020 στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις.....	96

A.3.7 Ρυπασμένες περιοχές με cis 1,2 DCE το 2015 στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις.....	97
A.3.8 Ρυπασμένη περιοχή με cis 1,2 DCE το 2020 στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις.....	98
A.3.9 Ρυπασμένες περιοχές με VC το 2015 στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις.....	99
A.3.10 Ρυπασμένες περιοχές με VC το 2020 στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις.....	100
A.3.11 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW2124X15 της Περιοχής SS015 στη Βάσης Τράβις.....	101
A.3.12 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW2118X15 της Περιοχής SS015 στη Βάσης Τράβις.....	101
A.3.13 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW625X15 της Περιοχής SS015 στη Βάσης Τράβις.....	102
A.3.14 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW2103X15 της Περιοχής SS015 στη Βάσης Τράβις.....	102
A.4.1 Ρυπασμένες εκτάσεις με τετραχλωροαιθέριο στο ρηχό και στο βαθύ υδροφορέα πριν την έναρξη της πιλοτικής δοκιμής το 2007 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα στο Νεό Μεξικό των Η.Π.Α.....	104
A.4.2 Τοποθεσίες πηγαδιών άντλησης και ένεσης στην πηγή της ρύπανσης (χορηγούμενος δότης το EVO στη ρηχή στρώση) και στην περιοχή Hotspot (χορηγούμενος δότης το γαλακτικό ανιόν στη ρηχή στρώση) κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα.....	106
A.4.3 Τοποθεσίες πηγαδιών άντλησης και ένεσης 300 μέτρα κατάντη της πηγής ρύπανσης (χορηγούμενος δότης το EVO στη ρηχή στρώση) κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα.....	106
A.4.4 Τοποθεσίες πηγαδιών ένεσης στις βαθειές στρώσεις 1 και 2 (χορηγούμενος δότης το EVO) κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα.....	107
A.4.5 Ρυπασμένη έκταση με χλωροαιθένια στην πηγή της ρύπανσης και αμέσως κατάντη αυτής (Hotspot) στη ρηχή στρώση στην πόλη Εσπανιόλα το 2007.....	109
A.4.6 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένια στη ρηχή στρώση στην πόλη Εσπανιόλα το 2007.....	110
A.4.7 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένια στη ρηχή στρώση στην πόλη Εσπανιόλα το 2019.....	111

A.4.8 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένια στη βαθιά στρώση 1 στην πόλη Εσπανιόλα το 2007.....	113
A.4.9 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένια στη βαθιά στρώση 2 στην πόλη Εσπανιόλα το 2007.....	114
A.4.10 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένια στη βαθιά στρώση 1 στην πόλη Εσπανιόλα το 2019.....	115
A.4.11 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένια στη βαθιά στρώση 2 στην πόλη Εσπανιόλα το 2019.....	116
A.4.12 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης SMW-3D της ρηχής στρώσης (στην πηγή της ρύπανσης) στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα.....	117
A.4.13 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης SMW-2D της ρηχής στρώσης (στην πηγή της ρύπανσης) στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα.....	118
A.4.14 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης R-24 της ρηχής στρώσης (στην περιοχή Hotspot) στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα.....	119
A.4.15 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης EWMW-2 της ρηχής στρώσης (στην περιοχή Hotspot) στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα.....	119
A.4.16 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης BC-4 της ρηχής στρώσης (300 μέτρα κατάντη της πηγής ρύπανσης) στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα.....	120
A.4.17 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM2-D2 της βαθιάς στρώσης 2 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα.....	121
A.4.18 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM1-D1 της βαθιάς στρώσης 1 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα.....	121
A.5.1 Ρυπασμένη περιοχή με PCE το 2000 στην Πρώην Εγκατάσταση 87 της Πρώην Βάσης Νιούαρκ.....	123
A.5.2 Πηγάδια ένεσης δότη (πρώτη προσθήκη, πηγάδια ένεσης SIW-01 έως SIW-06) το 2001 στην πρώην εγκατάσταση 87 της Πρώην Βάσης Νιούαρκ.....	123
A.5.3 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW87-1 στην πρώην Εγκατάσταση 87 της Πρώην Βάσης Νιούαρκ κατά την εφαρμογή βιοδιέγερσης σε πλήρη κλίμακα.....	124

A.5.4 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW87-1A στην πρώην Εγκατάσταση 87 της Πρώην Βάσης Νιούαρκ κατά την εφαρμογή βιοδιέγερσης σε πλήρη κλίμακα.....	125
A.5.5 Περίμετρος εκσκαφής (οριοθετημένη με κόκκινο χρώμα) στην πρώτη εγκατάσταση 87 της πρώην Βάσης Νιούαρκ (η εκσκαφή και αφαίρεση εδάφους ολοκληρώθηκε κατά τα τέλη του 2008).....	125
A.5.6 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW87-11 στην Πρώην Εγκατάσταση 87 της πρώην Βάσης Νιούαρκ μετά από την εκσκαφή και αφαίρεση εδάφους (εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης στην περιοχή η ενδογενής αποχλωρίωση).....	126
A.5.7 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW87-3R στην Πρώην Εγκατάσταση 87 της πρώην Βάσης Νιούαρκ μετά από την εκσκαφή και αφαίρεση εδάφους (εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης στην περιοχή η ενδογενής αποχλωρίωση).....	127
B.1 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW608S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	128
B.2 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3001S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	129
B.3 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3003S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	129
B.4 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3031S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ	130
B.5 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3007D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	130
B.6 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3010D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	131
B.7 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM30011D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	131
B.8 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM30019D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ	132

B.9 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3501S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ.....	133
B.10 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3503S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ.....	133
B.11 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3505S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ.....	134
B.12 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW214S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ	134
B.13 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3507D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ	135
B.14 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3507D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ	135
B.15 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW214D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ	136
B.16 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW216X15 της Περιοχής SS015 της Βάσης Τραβις	137
B.17 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW2118X15 της Περιοχής SS015 της Βάσης Τραβις	137
B.18 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW625X15 της Περιοχής SS015 της Βάσης Τραβις	138
B.19 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης EMW-4B της ρηχής στρώσης στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα	139
B.20 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης SMW-6D της ρηχής στρώσης στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα	139
B.21 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης R-24 της ρηχής στρώσης στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα	140

B.22 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης HSE-10 της ρηχής στρώσης στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα	140
B.23 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης BC-4 της ρηχής στρώσης στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα	141
B.24 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM2-D1 της βαθειάς στρώσης 1 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα	141
B.25 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DI1-D1 της βαθειάς στρώσης 1 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα	142
B.26 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης R-21-D2 της βαθειάς στρώσης 2 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα	142
B.27 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW-87-1 της πρώην Εγκατάστασης 87 στην πρώην Αεροπορική Βάση Νιούαρκ.....	143
B.28 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW-87-1A της πρώην Εγκατάστασης 87 στην πρώην Αεροπορική Βάση Νιούαρκ.....	144
B.29 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης IRO5D της βαθειάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	145
B.30 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης EA5D της βαθειάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ.....	145
B.31 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM353DR της βαθειάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ	146
B.32 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης R-09-I1 της ενδιάμεσης στρώσης 1 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα	146
B.33 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης R-13-I2 της ενδιάμεσης στρώσης 2 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα	147

B.34 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης R-09-I2 της ενδιάμεσης στρώσης 2 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα	147
B.35 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης R-12-S1 της ρηχής στρώσης στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα.....	148
B.36 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων πηγαδιού παρακολούθησης σε ενεργή εγκατάσταση στις Η.Π.Α.	148
B.37 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης OLD-17-56B της Περιοχής SA17 στο πρώην Κέντρο Εκπαίδευσης Πολεμικού Ναυτικού στο Ορλάντο των Η.Π.Α.	149
B.38 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW89-7 της Ζώνης 4 στην Πρώην Αεροπορική Βάση Τσάρλεστον.....	149
B.39 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW29-6 της Ζώνης 4 στην Πρώην Αεροπορική Βάση Τσάρλεστον.....	150
B.40 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW-06 της Περιοχής SS032 στην Αεροπορική Βάση Κολόμπους	150
B.41 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης TW-21 της Περιοχής SS032 στην Αεροπορική Βάση Κολόμπους.....	151
B.42 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης TW-2 της Περιοχής SS032 στην Αεροπορική Βάση Κολόμπους.....	151
B.43 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW-70-PMW01B της Περιοχής 70 στο Σιλ Μπιτς.....	152
B.44 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW-70-PMW01A της Περιοχής 70 στο Σιλ Μπιτς.....	152

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1. Στόχος

Τα τελευταία 50 χρόνια έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για την αποκατάσταση των υπόγειων υδροφορέων κυρίως στις Η.Π.Α. αλλά και σε ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, έρευνες έδειξαν τα πρώτα σημάδια ότι τα χλωριωμένα αιθυλένια δύνανται να αποδομηθούν στο υπέδαφος απουσία οξυγόνου σε λιγότερο χλωριωμένες ενώσεις ή και σε μη χλωριωμένες (αιθένιο) υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις (Bradley, 2003). Η Αναερόβια Βιολογική Αναγωγική Αποχλωρίωση (Anaerobic Biological Reductive Dechlorination) αποτελεί μία αναπτυσσόμενη τεχνολογία αποκατάστασης υπόγειων υδροφορέων, κατά την οποία οι μικροοργανισμοί ανάγουν τα χλωριωμένα αιθυλένια (χρησιμοποιώντας τα δηλαδή ως δέκτες ηλεκτρονίων), αντλώντας ενέργεια από αυτήν την αντίδραση αναγωγής. Κατ' αναλογία με τους ανθρώπους που αναπνέουν οξυγόνο, θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι αυτοί μικροοργανισμοί «αναπνέουν» χλωριωμένα αιθυλένια. Η διαδικασία αυτή τελείται υπό συνθήκες απουσίας οξυγόνου και τα πολυχλωριωμένα αιθυλένια σε κάθε στάδιο της αντικαθιστούν ένα άτομο χλωρίου (Cl) από την αλυσίδα τους, προσλαμβάνοντας στη θέση του ένα άτομο υδρογόνο (H⁺).

Μέχρι σήμερα έχουν δημοσιευτεί πολυάριθμες πειραματικές μελέτες σχετικά με τη επίδραση πλήθους παραμέτρων στην επίδοση της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης, όπως η μικροβιακή κοινότητα, ο δότης ηλεκτρονίων και τα θειικά ιόντα. Παράλληλα, θεωρείται εξίσου χρήσιμο να μπορεί να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητά της και σε εφαρμογές πεδίου. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να προσφέρει μία εκτίμηση της επίδοσης της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης κατά την εφαρμογή της σε πλήρη κλίμακα.

1.2. Πλαίσιο

Προκειμένου να καταγραφούν τα νέα δεδομένα που έχουν προκύψει την τελευταία δεκαετία για την Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση αναζητήθηκαν ρυπασμένοι χώροι με χλωριωμένα αιθυλένια στους οποίους έχει εφαρμοστεί ή εφαρμόζεται μέχρι σήμερα η μέθοδος σε πλήρη κλίμακα. Το πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθορίστηκε από το δείγμα των περιστατικών εφαρμογής της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης στο πεδίο τα οποία αξιολογήθηκαν με βάση αποτελέσματα μακροχρόνιας παρακολούθησης. Η εργασία της Ζηκίδη (2010) με τίτλο «Συγκριτική Παρουσίαση και Ανάλυση Περιστατικών Βιοαποκατάστασης μέσω Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης» αποτέλεσε την αφητηρία

στη διαδικασία αναζήτησης περιστατικών στη βιβλιογραφία. Το δείγμα ρυπασμένων χώρων με χλωριωμένα αιθυλένια και εφαρμοζόμενη μέθοδο αποκατάστασης την Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση που τελικά δημιουργήθηκε απαρτίζεται από πέντε περιστατικά ρύπανσης· σε τέσσερα εξ αυτών, η αποκατάσταση είναι εν εξελίξει.

1.3. Ιδιαιτερότητες και ζητούμενα

Η βιοαποκατάσταση αποτελεί μία καινοτόμο τεχνολογία αποκατάστασης των υπόγειων υδροφορέων. Καθώς το επιστημονικό ενδιαφέρον έχει στραφεί στις επιτόπιες εφαρμογές στο πρόσφατο παρελθόν, οι βιολογικές μέθοδοι κερδίζουν έδαφος όσον αφορά στην συχνότητα επιλογής τους τις δύο τελευταίες δεκαετίες. Επειδή τα περισσότερα περιστατικά που μελετώνται στην παρούσα εργασία βρίσκονται σε εξέλιξη, η ισχύς των τελικών ευρημάτων είναι σχετικά περιορισμένη. Όμως, αυτός ο περιορισμός εξισορροπείται από τη συστηματική παρακολούθηση, καθώς όλα τα περιστατικά που επιλέχθηκαν παρακολουθούνται για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα έως την πλέον πρόσφατη μέτρηση.

1.4. Βασικά σημεία μεθοδολογίας

Με σκοπό την περιγραφή της προόδου της μεθόδου στο πεδίο προσδιορίστηκαν οι δείκτες αξιολόγησης για την εφαρμογή πλήρους κλίμακας στον εκάστοτε ρυπασμένο χώρο. Οι παρακάτω δείκτες θεωρούνται ικανοί να περιγράψουν τόσο ποσοτικά, όσο και ποιοτικά, την επίδοση της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης στο πεδίο:

- α. Η μεταβολή των συγκεντρώσεων των χλωριωμένων αιθυλενίων και της ρυπασμένης έκτασης από τις αρχικές συνθήκες της εφαρμογής έως την πλέον πρόσφατη μέτρηση ή τη λήξη αυτής.
- β. Η καταγραφή των τάσεων συμπεριφοράς των πηγαδιών παρακολούθησης (βλέπε Ενότητα 3.3).
- γ. Ο υπολογισμός του χρόνου ημιζωής του κάθε σταδίου της αποχλωριωτικής διαδικασίας, με βάση τις μετρήσεις στο πεδίο (βλέπε Ενότητα 5.3).

1.5. Οργάνωση κειμένου

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από έξι Κεφάλαια, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- Το παρόν Κεφάλαιο 1 αποτελεί μια επιγραμματική εισαγωγή σχετικά με τα χλωριωμένα αιθυλένια και την Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση ως μέθοδο αποκατάστασης

υδροφορέων, τον στόχο της παρούσας εργασίας και το πλαίσιο εντός του οποίου εκπονήθηκε αυτή.

- Στο Κεφάλαιο 2 αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο που προκύπτει από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και απαρτίζεται από τρεις βασικές ενότητες, στις οποίες αναπτύσσονται τα εξής: i) οι μέθοδοι απομάκρυνσης των χλωριωμένων αιθενίων στο υπόγειο νερό, ii) το κανονιστικό πλαίσιο για ρυπασμένους χώρους στις Η.Π.Α. και iii) η Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση και οι παραλλαγές αυτής ως μέθοδοι αποκατάστασης των υπόγειων υδροφορέων που έχουν ρυπανθεί από χλωριωμένους υδρογονάνθρακες.
- Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε με απώτερο σκοπό τη δημιουργία του δείγματος ρυπασμένων χώρων, τα κριτήρια επιλογής αυτών, το σκεπτικό κατηγοριοποίησης των τάσεων συμπεριφοράς των πηγαδιών παρακολούθησης και τον τρόπο υπολογισμού των τιμών των χρόνων ημιζωής αξιοποιώντας τις μετρήσεις στο πεδίο.
- Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα βασικά δεδομένα για τα πέντε περιστατικά εφαρμογής της μεθόδου μέσω της περιγραφής τυχόν πιλοτικής δοκιμής του εκάστοτε περιστατικού και, κυρίως, της αναδρομής από τις αρχικές συνθήκες της εφαρμογής πλήρους κλίμακας έως τη λήξη της ή την πλέον πρόσφατη μέτρηση.
- Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων του Κεφαλαίου 4, η οποία βασίζεται κατά κύριο λόγο στην καταγραφή των τάσεων συμπεριφοράς των πηγαδιών παρακολούθησης και στον υπολογισμό των χρόνων ημιζωής. Σε δεύτερη φάση, οι υπολογισθείσες τιμές των χρόνων ημιζωής για τα πέντε περιστατικά αποχλωρίωσης συγκρίνονται με τους χρόνους ημιζωής (που υπολογίστηκαν με όμοιο τρόπο) για άλλα πέντε περιστατικά ρύπανσης τα οποία επιλέχθηκαν με κριτήριο την ομοιότητα των υδρογεωλογικών συνθηκών.
- Στο Κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 2 - Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1. Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο αποτελείται από τρεις επιμέρους ενότητες. Στις δύο πρώτες γίνεται μία σύντομη αναδρομή στη ρύπανση του υπεδάφους με χλωριωμένα αιθυλένια (με τον όρο υπέδαφος εννοείται το έδαφος και το υπόγειο νερό) και επισημαίνεται η στροφή του επιστημονικού ενδιαφέροντος που καταγράφηκε τις τελευταίες δεκαετίες στην Βιοαποκατάσταση ως τεχνολογία απορρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων και ιδιαίτερα στις αναερόβιες διεργασίες. Εφόσον οι περισσότεροι ρυπασμένοι χώροι που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι εντός της Λίστας Χώρων Προτεραιότητας στις Η.Π.Α. (βλέπε Κεφάλαιο 4), στο εδάφιο 2.3.1 γίνεται μία σύντομη περιγραφή των Αναφορών που δημοσιοποιούνται μέσω της Αμερικάνικης Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος για αυτούς τους χώρους. Στην τελευταία ενότητα παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης και των διακρίσεων αυτής, δηλαδή της Ενδογενούς και της Ενισχυμένης Αποχλωρίωσης.

2.2. Ρύπανση υπεδάφους

Κατά κανόνα η τοξική ρύπανση είναι ανθρωπογενής, διότι προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από παραγωγικές δραστηριότητες (Χατζημπίρος, 2014). Διάφοροι ρύποι (ανόργανες και οργανικές ουσίες) απορρίφθηκαν στο υπέδαφος λόγω της καθυστερημένης επιβολής νομοθετικών περιορισμών με σκοπό την προστασία των εδαφών και των υπόγειων υδάτων ή και λόγω ατυχημάτων. Κάποιες χώρες έχουν δομήσει μέχρι σήμερα ένα ολοκληρωμένο κανονιστικό πλαίσιο για την αντιμετώπιση της ρύπανσης του υπεδάφους και έχουν αναπτύξει ή και εφαρμόσει συμβατικές και εναλλακτικές μεθόδους για την αποκατάσταση των υπόγειων υδροφορέων, όπως για παράδειγμα οι Η.Π.Α., η Ολλανδία, και η Σουηδία. Τα θέματα απορρύπανσης αφορούν στην ανάληψη ενεργειών για την περιβαλλοντική αποκατάσταση εδαφών και υδροφορέων που έχουν ήδη ρυπανθεί, ενώ τα θέματα προστασίας αφορούν τη λήψη μέτρων για να αποφευχθεί η περαιτέρω επέκταση της ρύπανσης από περιοχές που έχουν ρυπανθεί προς άλλες περιοχές, για παράδειγμα μέσω της κίνησης του υπόγειου νερού (Καββαδάς, 2013).

2.2.1. Τα χλωριωμένα αιθυλένια ως ρύποι στο υπόγειο νερό

Τα χλωριωμένα αιθυλένια ή χλωροαιθένια είναι πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds-VOCs) κυρίως ανθρωπογενούς προέλευσης. Διαφέρουν ως προς τον αριθμό των χλωρίων στο μόριο τους, που μπορεί να είναι από 4 (τετραχλωροαιθυλένιο-PCE) έως 1 (βινυλοχλωρίδιο-VC) (Bradley, 2003). Τα κύρια παράγωγα της αποχλωρίωσης του

τετραχλωροαιθυλένιου είναι το τριχλωροαιθυλένιο (TCE), τα ισομερή του διχλωροαιθυλένιου (1,1 cis DCE, cis 1,2 DCE και trans DCE), το βινυλοχλωρίδιο και το αιθένιο (ETH).

Από την ομάδα των χλωριωμένων αιθυλενίων, μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι πρωτογενείς ρύποι τετραχλωροαιθένιο και τριχλωροαιθένιο. Οι ενώσεις αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στο στρατιωτικό τομέα ως απολιπαντικά μεταλλικών μερών και από τη δεκαετία του 1940 χρησιμοποιούνται επίσης ως υγρά στεγνού καθαρισμού, ενώ το TCE χρησιμοποιείται ως διαλύτης τα τελευταία 50 έτη. Η ευρύτατη χρήση τους, σε συνδυασμό με τις μη ορθές πρακτικές αποθήκευσης και απόρριψης που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν, οδήγησαν στη ρύπανση του υπόγειου νερού. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την Αμερικάνικη Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (United States Environmental Protection Agency-USEPA), το TCE είναι ο πιο συχνά ανιχνευόμενος οργανικός ρύπος σε ρυπασμένους χώρους εθνικής προτεραιότητας (National Priority List-NPL) και ο 16^{ος} πιο συχνά ανιχνευόμενος και τοξικός ρύπος στη λίστα της αρμόδιας Αμερικανικής Υπηρεσίας για τη μελέτη των τοξικών ενώσεων στην ανθρώπινη υγεία (Agency for Toxic Substances and Disease Registry-ATSDR) το 2019. Στην ίδια λίστα, στην οποία συγκαταλέγονται συνολικά 375 ρύποι, το PCE καταλαμβάνει την 33^η θέση. Οι ενώσεις αυτές χαρακτηρίζονται κατά κανόνα ως «Μη υδατικής φάσης βάρεια υγρά» (Dense Non Aqueous Phase Liquids-DNAPLs) καθώς είναι πυκνότερες από το νερό. Η μη υδατική φάση αυτή διηθείται στο υπέδαφος, μέχρι να συναντήσει κάποιο χαμηλής περατότητας στρώμα και να σχηματίσει «λιμνούλες», με αποτέλεσμα να δρα ως μακροχρόνια πηγή ρύπου έως ότου να διαλυθεί εντελώς. Ταυτόχρονα διαλύεται αργά στο υπόγειο νερό, ροφάται στο έδαφος και παράγει ατμούς οι οποίοι μεταβαίνουν στην ακόρεστη ζώνη. Στον Πίνακα 2.1 παρατίθενται τα μέγιστα όρια των συγκεντρώσεων των χλωριωμένων αιθυλενίων που έχουν θεσμοθετηθεί στις Η.Π.Α. για το πόσιμο νερό.

Πίνακας 2.1 Μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις χλωριωμένων αιθυλενίων στο πόσιμο νερό (USEPA, 2009)

Ουσία	Μέγιστη αποδεκτή συγκέντρωση (µg/L)
PCE	5
TCE	5
cis 1,2 DCE	70
trans DCE	100
1,1 DCE	7
VC	5

2.3. Τεχνολογίες αποκατάστασης ρυπασμένων υδροφορέων

Σε πρώτη φάση, οι τεχνολογίες αποκατάστασης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε επιτόπιες (in situ) και μη-επιτόπιες (ex situ), ανάλογα με τον βαθμό επέμβασης, δηλαδή το αν εφαρμόζονται εντός του πεδίου ή αν εξάγονται από το ρυπασμένο υπόγειο νερό με σκοπό την επεξεργασία τους. Αν και μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1990 οι μη επιτόπιες τεχνολογίες αποκατάστασης ήταν πολύ πιο διαδεδομένες, με συχνότερα εφαρμοζόμενη μέθοδο αποκατάστασης όσον αφορά στους υπόγειους υδροφορείς τη μέθοδο της άντλησης και επεξεργασίας (Pump & Treat), το επιστημονικό ενδιαφέρον έχει στραφεί στις επιτόπιες τεχνολογίες αποκατάστασης και κυρίως στην Βιοαποκατάσταση (Bioremediation) και την Χημική Επεξεργασία (Chemical Treatment).

Οι τάσεις μείωσης της χρήσης μη-επιτόπιων εφαρμογών αλλά και της αύξησης της επιτόπιας βιολογικής εξυγίανσης, μάλλον οφείλονται στα πλεονεκτήματα που προσφέρει η βιοαποκατάσταση, εφόσον δύναται με σχετικά μικρό κόστος να αποκαταστήσει αποτελεσματικά ρυπασμένες περιοχές από επικίνδυνα απόβλητα, δίχως να συμπεριλαμβάνει εξωτερική επεξεργασία και δίχως να απαιτεί έντονες παρεμβάσεις στο πεδίο. Στον αντίποδα, η μέθοδος άντλησης και επεξεργασίας έχει υψηλότερο κόστος εφαρμογής, δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε ανομοιογενή εδάφη και απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα εφαρμογής ώστε να συνοδεύεται από επίτευξη συγκεντρώσεων-στόχων για ρύπους του υπόγειου νερού (Voudrias, 2001). Η τάση αύξησης της χρήσης επιτόπιων τεχνολογιών αποκατάστασης δείχνει να σταθεροποιείται σταδιακά και η επιτόπια βιοαποκατάσταση υπό αναερόβιες συνθήκες επιλέγεται συχνότερα έναντι της χημικής επεξεργασίας κατά τα έτη 2009-2014 σε ρυπασμένους χώρους στις Η.Π.Α. (USEPA, 2013; 2017).

2.3.1. Το κανονιστικό πλαίσιο για ρυπασμένους χώρους στις Η.Π.Α

Η διαδικασία χαρακτηρισμού και διαχείρισης των ρυπασμένων χώρων της Αμερικής θεμελιώθηκε με την πράξη CERCLA (Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act) η οποία θεσπίστηκε από το Κογκρέσο το 1980, ενώ είχαν ήδη αποκαλυφθεί οι περιπτώσεις ρύπανσης του Love Canal και Valley of the Drums (USEPA, 2011). Έτσι δημιουργήθηκε το πρόγραμμα Superfund με σκοπό τη χρηματοδότηση των έργων αποκατάστασης ρυπασμένων χώρων στους οποίους τα υπεύθυνα μέρη είτε δεν είναι σε θέση να αναλάβουν το κόστος, είτε δεν μπορούν να ταυτοποιηθούν (CHEJ, 2015).

Εφόσον ένας ρυπασμένος χώρος καταχωρηθεί στη Λίστα Χώρων Προτεραιότητας εκδίδεται το Πρακτικό Απόφασης (Record of Decision-ROD), στο οποίο περιγράφεται η επιλεγείσα μέθοδος αποκατάστασής του. Επιπλέον, σε αυτό περιλαμβάνονται πληροφορίες για το ιστορικό του ρυπασμένου χώρου, τις υδρογεωλογικές συνθήκες στην ευρύτερη περιοχή, το είδος του ρυπασμένου μέσου, την φύση και την έκταση της ρύπανσης.

Καταγράφονται όλες οι εναλλακτικές μέθοδοι αποκατάστασης του ρυπασμένου μέσου ενδιαφέροντος, οι στόχοι της αποκατάστασης, καθώς και ο εκτιμώμενος χρόνος ολοκλήρωσης της αποκατάστασης ανά εναλλακτική μέθοδο. Κάποιοι ρυπασμένοι χώροι ενδέχεται να περιλαμβάνουν διάφορα είδη ρυπασμένων μέσων ή και να περιλαμβάνουν εκτάσεις στις οποίες οι ρύποι ή και οι πηγές της ρύπανσης ποικίλλουν. Για τον λόγο αυτό, ένας χώρος πολλές φορές διαιρείται σε υποενοτήτες διαχείρισης της ρύπανσης (Operable Units- OUs) και κάθε μία από αυτές αντιμετωπίζεται ξεχωριστά.

Όταν ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός (Remedial Design-RD), η υλοποίηση της μεθόδου στο πεδίο (Remedial Action-RA) και συμπληρωθούν πέντε έτη παρακολούθησης του ρυπασμένου χώρου, εκδίδεται η πρώτη Αναφορά Προόδου Πενταετίας (Five-year Review-FYR). Οι αναφορές συνεχίζουν να εκδίδονται ανά πενταετία έως ότου η αποκατάσταση του ρυπασμένου χώρου ολοκληρωθεί.

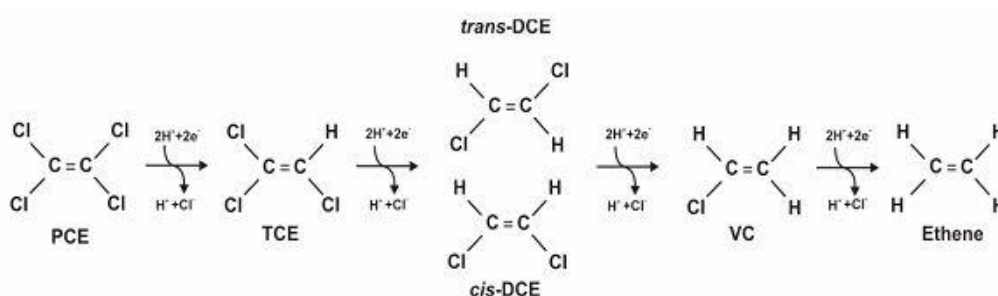
2.4. Η Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση ως τεχνολογία αποκατάστασης

Ως τις αρχές της δεκαετίας του 1980, η αντίληψη που επικρατούσε ήταν ότι τα χλωροαιθυλένια δεν αποχλωριώνονται μέσω βιολογικών μηχανισμών. Μία δεκαετία αργότερα η αποχλωρίωσή τους αποδιδόταν πλέον σε βακτήρια, τα οποία ανάγοντας κάποιον αποδέκτη ηλεκτρονίων, αποχλωρίωναν τις ενώσεις αυτές σε λιγότερο χλωριωμένες ενώσεις, εφαρμόζοντας το λεγόμενο συμμεταβολισμό (cometabolism), δηλαδή την οξειδωσή τους από ένα ένζυμο ή συνεργό παράγοντα (co-factor) που παράγεται κατά το μικροβιακό μεταβολισμό κάποιας άλλης ουσίας (Bradley, 2003; Parsons, 2004). Παρόλα αυτά, η εντατική ερευνητική προσπάθεια που ακολούθησε την επόμενη δεκαετία απέδειξε ότι η αποχλωρίωση των χλωροαιθυλενίων πραγματοποιείται κυρίως μέσω μεταβολικών, παρά συμμεταβολικών μηχανισμών, υπό αναερόβιες συνθήκες, από βακτήρια τα οποία ανάγοντας τα χλωροαιθυλένια παρουσία κατάλληλου δότη ηλεκτρονίων, εξασφαλίζουν την απαραίτητη για αυτά ενέργεια (Bradley, 2003).

Τα χλωροαιθυλένια είναι δυνατόν να αποδομούνται μέσω μιας σειράς μηχανισμών. Ο μηχανισμός με τον οποίο τείνουν να αποχλωριώνονται παρουσιάζει διαφορές από ένωση σε ένωση και σχετίζεται με τον αριθμό των ατόμων χλωρίου στο μόριο (Vogel et al., 1987). Πιο συγκεκριμένα, τα PCE και TCE παρουσιάζουν εντονότερη τάση για αναγωγή παρά για οξειδωση, δηλαδή εντονότερη τάση να δρουν ως αποδέκτες παρά ως δότες ηλεκτρονίων. Το αντίστροφο ισχύει για τα ισομερή του DCE και το VC που παρουσιάζουν μεγαλύτερη τάση να δρουν ως δότες ηλεκτρονίων και να οξειδώνονται παρά ως αποδέκτες ηλεκτρονίων και να ανάγονται (Vogel et al., 1987). Η πλήρης αποχλωρίωση των χλωροαιθυλενίων είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί συμμεταβολικά υπό αερόβιες είτε υπό αναερόβιες συνθήκες, ενώ

αντίθετα μόνο ο μηχανισμός της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης (Anaerobic Reductive Dechlorination) είναι δυνατόν να εξασφαλίσει πλήρη αποχλωρίωση των PCE και TCE μέσω μεταβολικών διεργασιών.

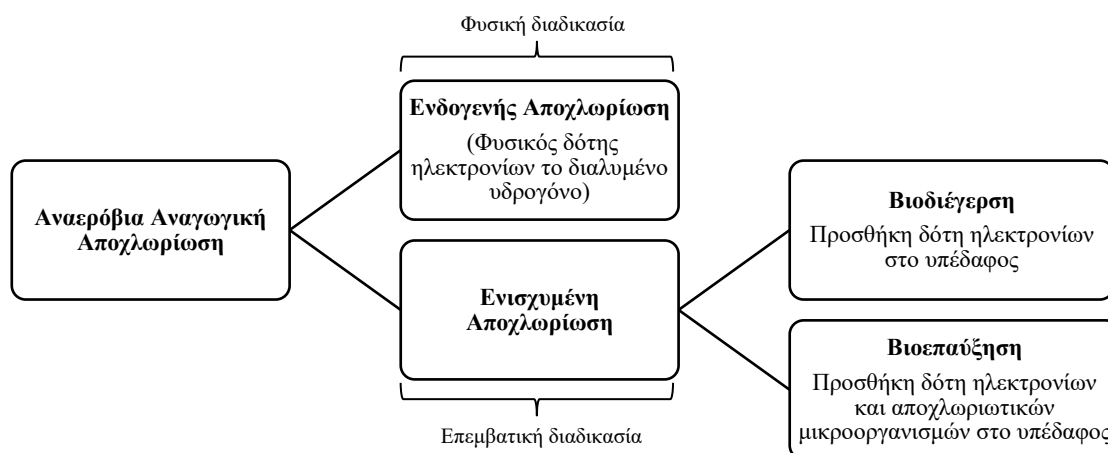
Η Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση χαρακτηρίζεται από την κατανάλωση του τετραχλωροαιθενίου (PCE) και τη συσσώρευση των άλλων χλωροαιθηνίων όπως το τριχλωροαιθένιο (TCE), τα ισομερή του διχλωροαιθενίου (DCE) και το βιλυνοχλωρίδιο (VC). Το παραπάνω επιτυγχάνεται μέσω του μονοπατιού της υδρογονόλυσης, όπου ένα μόριο υδρογόνου αντικαθιστά μόριο χλωρίου, δηλαδή μια οργανική ή μη ουσία παρέχει ηλεκτρόνια στις οργανοχλωριωμένες ενώσεις με τελικό προϊόν το αιθένιο. Στο Σχήμα 2.1 αναπαρίσταται το μονοπάτι της Αναερόβιας Βιολογικής Αναγωγικής Αποχλωρίωσης.



Σχήμα 2.1 Το μονοπάτι της Αναερόβιας Βιολογικής Αναγωγικής Αποχλωρίωσης με την κύρια πορεία να ακολουθεί τα βέλη (Parsons, 2004)

Οι αναγκαίες προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται για την πραγματοποίηση της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης των χλωροαιθυλενίων είναι τρεις: (α) η διαθεσιμότητα δότη ηλεκτρονίων, (β) η παρουσία αποχλωριωτικών μικροοργανισμών και (γ) το κατάλληλο οξειδοαναγωγικό καθεστώς. Διάφορες οργανικές ουσίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δότες ηλεκτρονίων εφόσον η ζύμωσή τους οδηγεί στην παραγωγή διαλυμένου υδρογόνου, το οποίο είναι ο τελικός δότης ηλεκτρονίων για την αναγωγή των χλωροαιθηνίων. Όσον αφορά στην παρουσία αποχλωριωτικών μικροοργανισμών, πολλά βακτήρια έχουν βρεθεί να ανάγουν το TCE σε DCE, αλλά μόνο το γένος *Dehalococcoides* έχει την ικανότητα να πραγματοποιεί την πλήρη αποχλωρίωση σε αιθένιο (Parsons, 2004). Ωστόσο, μια κοινότητα με αποχλωριωτική ικανότητα είναι δυνατόν να αποτελείται από περισσότερα του ενός είδους βακτήρια τα οποία από κοινού μπορούν να επιτύχουν είτε τη μερική ή και την πλήρη αποχλωρίωση των χλωροαιθυλενίων σε αιθένιο (Bradley, 2003). Επιπλέον, ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει την αποχλωρίωση είναι η ύπαρξη και η ποσότητα άλλων αποδεκτών ηλεκτρονίων, αφού θα υπάρξει ανταγωνισμός για το αναγωγικό μέσο. Μεταξύ άλλων, οι κύριοι ανταγωνιστές των χλωριωμένων αιθυλενίων είναι ο τρισθενής σίδηρος (Fe^{3+}) και τα θειικά ιόντα (SO_4^{2-}).

Η Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση δύναται να εφαρμοστεί στο πεδίο είτε ως Ενδογενής (Intrinsic Bioremediation) είτε ως Ενισχυμένη (Enhanced In Situ Bioremediation). Η βασική διάκριση των δύο παραλλαγών της μεθόδου έγκειται στη διαδικασία επέμβασης (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 Διακρίσεις κατά την εφαρμογή της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης στο πεδίο

2.4.1. Ενδογενής Αποχλωρίωση

Ως Ενδογενής Βιολογική Αποκατάσταση (Intrinsic Bioremediation) ή Φυσική Εξασθένιση (Natural Attenuation) ορίζεται ως η μέθοδος εξυγίανσης ρυπασμένων υπόγειων υδροφορέων που πραγματοποιείται αποκλειστικά με τη δράση της γηγενούς μικροβιακής κοινότητας, δίχως την εφαρμογή οποιασδήποτε επεμβατικής τεχνολογίας. Η εφαρμογή της στο πεδίο είναι είτε αυτόνομη είτε συνδυάζεται με άλλες τεχνολογίες αποκατάστασης και προϋποθέτει (α) την έρευνα στο πεδίο με σκοπό τον ενδελεχή χαρακτηρισμό του ρυπασμένου υπόγειου υδροφορέα και (β) τη συνεχή παρακολούθηση, προκειμένου να ελεγχθούν οι επιδόσεις της. Στο στάδιο της έρευνας πεδίου γίνεται η προκαταρκτική αξιολόγηση της μεθόδου μέσω της προσομοίωσης της μεταφοράς των ρύπων στον υπόγειο υδροφορέα με τη χρήση υπολογιστικών μοντέλων, ώστε να καθοριστεί εάν μπορεί να εφαρμοστεί στον εκάστοτε ρυπασμένο χώρο σε πλήρη κλίμακα και αν δύναται μέσω αυτής να επιτευχθούν οι στόχοι της αποκατάστασης εντός ενός εύλογου χρονικού διαστήματος συγκριτικά με άλλες εναλλακτικές μεθόδους (USEPA, 1998).

Η ύπαρξη της κατάλληλης μικροβιακής κοινότητας αποχλωρίωσης και κατάλληλου και επαρκούς δότη ηλεκτρονίων αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την πραγματοποίηση της

Ενδογενούς Βιολογικής Εξυγίανσης υπόγειων υδροφορέων ρυπασμένων με χλωροαιθυλένια. Πολλές φορές, αν και υφίσταται μικροβιακή κοινότητα ικανή για πλήρη αποχλωρίωση, η Ενδογενής Βιολογική Εξυγίανση καταλήγει να μην είναι επαρκώς αποδοτική εξαιτίας της ανεπαρκούς παρουσίας δότη ηλεκτρονίων στους υπόγειους υδροφορείς. Αν και ο φυσικός δότης ηλεκτρονίων συνήθως είναι το διαλυμένο υδρογόνο, ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι περιπτώσεις όπου ως δότες ηλεκτρονίων κατά τη διαδικασία της Ενδογενούς Αποχλωρίωσης δρουν άλλοι ρύποι, όπως τα πετρελαιοειδή.

2.4.2. Ενισχυμένη Αποχλωρίωση

Σκοπός της Ενισχυμένης Αποχλωρίωσης (Enhanced In Situ Bioremediation) είναι η αποκατάσταση των ρυπασμένων υπόγειων υδροφορέων μέσω της τόνωσης των βιολογικών ενδογενών διεργασιών. Η μέθοδος αυτή διαφοροποιείται από την Ενδογενή Αποχλωρίωση αφού προϋποθέτει την ανθρώπινη παρέμβαση και διακρίνεται σε δύο επιμέρους μεθόδους: (α) τη Βιοδιέγερση και (β) τη Βιοεπαύξηση. Οι δύο αυτές παραλλαγές της Ενισχυμένης αποχλωρίωσης διαφοροποιούνται με τη σειρά τους βάσει της ύπαρξης ή της απουσίας ικανής σε μέγεθος κοινότητας γηγενών αποχλωριωτικών μικροοργανισμών στο υπέδαφος. Όταν ο υπόγειος υδροφορέας διαθέτει την απαραίτητη μικροβιακή κοινότητα αποχλωρίωσης, η προσθήκη κατάλληλου δότη ηλεκτρονίων ή και θρεπτικών συστατικών ίσως να είναι ικανές να επιτύχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα εξυγίανσης. Αν όμως οι μικροβιολογικές αναλύσεις υποδείξουν ανεπαρκές μέγεθος της κατάλληλης μικροβιακής κοινότητας αποχλωρίωσης ή την ύπαρξη μικροβιακής κοινότητας η οποία δεν μπορεί να επιτύχει την πλήρη αποχλωρίωση των χλωριωμένων αιθυλένιων, με αποτέλεσμα το σταμάτημα της αποχλωριωτικής διαδικασίας στο στάδιο του cDCE ή του VC και τη συσσώρευση θυγατρικών προϊόντων, μπορεί να εξεταστεί το ενδεχόμενο η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης να είναι η βιοεπαύξηση (Parsons, 2004).

2.4.2.1. Βιοδιέγερση

Η Βιοδιέγερση (Biostimulation) αποτελεί τη μέθοδο Ενισχυμένης Επιτόπου Βιολογικής Εξυγίανσης κατά την οποία, παρουσία μικροβιακής κοινότητας ικανής για πλήρη αποχλωρίωση, οι ενδογενείς μηχανισμοί αποδόμησης των ρύπων ενισχύονται με τη προσθήκη κατάλληλου δότη ηλεκτρονίων. Σκοπός της μεθόδου είναι η διέγερση των βιολογικών διεργασιών έτσι ώστε ή να ξεκινήσει η αποχλωρίωση των συσσωρευμένων πρωτογενών χλωροαιθινίων ή να ολοκληρωθεί η αποχλωριωτική διαδικασία μέχρι το στάδιο του αιθενίου. Ο δότης ηλεκτρονίων ή το μείγμα δοτών που εισπνέζεται στο υπέδαφος είναι συνήθως διαλυμένος σε νερό και ο μέθοδοι χορήγησης αυτού ποικίλουν (βλέπε §2.4.2.3).

2.4.2.2. Βιοεπαύξηση

Στην περίπτωση που αποδειχθεί ότι η κατάλληλη κοινότητα βακτηρίων δεν είναι επαρκής, εξετάζεται η εφαρμογή της Βιοεπαύξησης (Bioaugmentation). Η μέθοδος αυτή αφορά στην προσθήκη συγκεκριμένων βακτηρίων ή κατάλληλης μικροβιακής κοινότητας στο υπέδαφος συνδυαστικά με την προσθήκη κατάλληλου δότη ηλεκτρονίων, με σκοπό την ενίσχυση της αποχλωριωτικής διαδικασίας. Οι μικροβιακοί πληθυσμοί που χορηγούνται συνήθως προέρχονται από υφιστάμενους ρυπασμένους χώρους όπου καταγράφεται ολοκλήρωση της αποχλωριωτικής διαδικασίας μέχρι και το στάδιο του αιθενίου.

2.4.2.3. Δότες ηλεκτρονίων και μέθοδοι χορήγησης

Πολλά είναι τα είδη των ουσιών που έχουν έως σήμερα χρησιμοποιηθεί στο πεδίο και έχουν διερευνηθεί στο εργαστήριο ως δότες ηλεκτρονίων. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο της Parsons Corporation (2004), οι δότες ηλεκτρονίων διακρίνονται σε διαλυτές ουσίες, στερεές ουσίες και υγρά υψηλού ή χαμηλού ιξώδους. Οι διαλυτές ουσίες χορηγούνται σε υδατική φάση, δηλαδή υπό τη μορφή διαλύματος. Αν και απαιτείται η χορήγησή τους στο υπέδαφος ανά τακτά χρονικά διαστήματα, προσφέρουν το πλεονέκτημα της εν δυνάμει ομοιόμορφης κατανομής στη ρυπασμένη ζώνη. Οι μελάσες (molasses) και το γαλακτικό ανιόν (lactate) αποτελούν τις πιο κοινές διαλυτές ουσίες που χορηγούνται ως δότες ηλεκτρονίων με αυτή τη σύσταση. Λόγω της ανάγκης για επαναληπτική χορήγηση, συνήθως οι υδατοδιαλυτοί δότες χορηγούνται στο υπέδαφος μέσω μόνιμων πηγαδιών ένεσης (permanent injection wells). Αντίθετως, τα διαλύματα υψηλού ιξώδους απελευθερώνονται αργά στο υπέδαφος και συνήθως απαιτείται μία μόνο χορήγησή τους σε αυτό. Η κατανομή τους στη ρυπασμένη ζώνη βασίζεται στα φαινόμενα της οριζόντιας μεταφοράς και της εξάπλωσης των διαλυμένων παραγώγων τους. Τα πιο κοινά διαλύματα υψηλού ιξώδους είναι οι ενώσεις απελευθέρωσης υδρογόνου (Hydrogen Release Compound-HRC) και τα φυτικά λάδια (vegetable oils). Ο δότης HRC είναι τυποποιημένο μείγμα το οποίο απελευθερώνει αργά στο υπέδαφος γαλακτικό οξύ ως δότη ηλεκτρονίων. Συνήθως χορηγούνται απευθείας στο υπέδαφος μέσω σημείων εισπίεσης (direct push probes). Τα διαλύματα χαμηλού ιξώδους είναι φυτικά λάδια που χρησιμοποιούνται υπό τη μορφή γαλακτωμάτων (oil emulsions) και μικρογαλακτωμάτων (microemulsions) με σκοπό την καλύτερη κατανομή τους στην ρυπασμένη ζώνη. Λόγω του χαμηλότερου ιξώδους, οι προσθήκες τους στο υπέδαφος είναι συνήθως επαναληπτικές. Το γαλακτοποιημένο φυτικό λάδι (emulsified vegetable oil-EVO) είναι ο πιο κοινός δότης αυτής της σύστασης που χορηγείται σε εφαρμογές ενισχυμένης αποχλωρίωσης. Στερεές ουσίες, όπως η νεκρή φυτική ύλη (mulch) και τα προϊόντα κομποστοποίησης (compost), μπορούν να τοποθετηθούν στο υπέδαφος ως υλικό πλήρωσης περατών διαφραγμάτων είτε απευθείας στον

πυθμένα πρότερων εκσκαφών. Επίσης είναι πιθανή η χορήγηση μείγματος δοτών, όπως για παράδειγμα ο συνδυασμός υδατοδιαλυτού δότη με διάλυμα υψηλού ιξώδους, ώστε σε πρώτη φάση να εγκαθιδρυθούν αναερόβιες συνθήκες στη ρυπασμένη ζώνη και ο δότης αργής δράσης να συνεχίζει να δρα μακροπρόθεσμα. Τέλος, μία ακόμη εναλλακτική μέθοδος χορήγησης είναι μέσω συστήματος επανακυκλοφορίας νερού (recirculation system). Ένα σύστημα επανακυκλοφορίας αποτελείται από πηγάδια άντλησης και ένεσης του υπόγειου νερού. Το υπόγειο νερό που αντλείται τροποποιείται με την προσθήκη δότη ή και θρεπτικών συστατικών και επανατροφοδοτείται στον υδροφορέα μέσω παρακείμενου πηγαδιού ένεσης του συστήματος. Η μέθοδος αυτή μπορεί να επιτύχει ομοιόμορφη κατανομή του δότη σε ρυπασμένους χώρους με δυσμενείς υδρογεωλογικές συνθήκες.

2.5. Σύνοψη

Τα χλωριωμένα αιθυλένια με τα οποία ασχολείται η παρούσα εργασία και ιδιαίτερα τα PCE και TCE χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα τις τελευταίες δεκαετίες. Τα τελευταία 15 έτη η βιοαποκατάσταση υπό αναερόβιες συνθήκες φαίνεται να κερδίζει έδαφος έναντι άλλων επιτόπιων και μη-επιτόπιων τεχνολογιών αποκατάστασης. Η Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση διακρίνεται στην Ενδογενή και την Ενισχυμένη Αποχλωρίωση βάσει της διαδικασίας επέμβασης στο πεδίο. Η ενδογενής αποχλωρίωση πραγματοποιείται αποκλειστικά με τη δράση της γηγενούς μικροβιακής κοινότητας και προϋποθέτει τη συστηματική παρακολούθηση, ενώ η ενισχυμένη διακρίνεται (α) στη βιοδιέγερση κατά την εφαρμογή της οποίας οι ενδογενείς μηχανισμοί αποδόμησης των ρύπων ενισχύονται με τη προσθήκη κατάλληλου δότη ηλεκτρονίων και (β) στη βιοεπαύξηση κατά την εφαρμογή της οποίας πραγματοποιείται η προσθήκη κατάλληλου δότη ηλεκτρονίων και κατάλληλης μικροβιακής κοινότητας στο υπέδαφος. Επιτυχημένη εφαρμογή της εκάστοτε παραλλαγής στο πεδίο συνεπάγεται την ολοκλήρωση όλων των σταδίων της αποχλωριωτικής διαδικασίας μέχρι το αιθένιο.

Κεφάλαιο 3 - Μεθοδολογία

3.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε με απώτερο σκοπό τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων τα οποία έπειτα από επεξεργασία, μπορούν να οδηγήσουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το τι μπορεί να επιτύχει η Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση στο πεδίο. Η επιλογή των περιστατικών ρύπανσης αποτέλεσε το πρώτο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση με αφετηρία τη διπλωματική εργασία της Ζηκίδη (2010) και έγινε με βασικό κριτήριο την πληρότητα δεδομένων και αναφορών. Σε δεύτερη φάση, η εξέλιξη των εφαρμογών και οι διακυμάνσεις των μετρήσεων στο πεδίο υπέδειξαν την ανάγκη κατηγοριοποίησης των τάσεων συμπεριφοράς των πηγαδιών δειγματοληψίας, οι οποίες συνδυαστικά με τον υπολογισμό των χρόνων ημιζωής των χλωροαιθενίων, αποτελούν τα βασικά εργαλεία στην απόπειρα αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας της μεθόδου. Στη συνέχεια αναλύεται το σκεπτικό αναζήτησης των περιστατικών, ο τρόπος κατηγοριοποίησης των παρατηρούμενων τάσεων συμπεριφοράς, καθώς και ο τρόπος υπολογισμού των χρόνων ημιζωής των χλωροαιθενίων.

3.2. Αναζήτηση περιστατικών

Προκειμένου να καταγραφούν τα νέα δεδομένα που έχουν προκύψει την τελευταία δεκαετία για την Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση, σε πρώτη φάση αναζητήθηκαν περιστατικά στα οποία έχει εφαρμοστεί ή εφαρμόζεται μέχρι σήμερα η μέθοδος σε πλήρη κλίμακα. Το κριτήριο επιλογής των περιστατικών ρύπανσης ήταν σαφές: έπρεπε να αποτελούν περιπτώσεις ρυπασμένων χώρων των οποίων η παρακολούθηση είναι συστηματική και έχει συμπληρώσει ένα χρονικό διάστημα ικανό για την αξιολόγηση της επίδοσης της μεθόδου στο πεδίο. Τα κριτήρια αυτά εμμέσως καθήθυνε την αναζήτηση στη Λίστα Χώρων Προτεραιότητας των Η.Π.Α. (National Priorities List-NPL), λόγω της πρωτοπορίας της χώρας στην καταγραφή, την αποκατάσταση και στην συστηματική παρακολούθηση ρυπασμένων χώρων γενικότερα.

Η εργασία της Ζηκίδη (2010) αποτέλεσε την αφετηρία στη διαδικασία αναζήτησης περιστατικών. Η εκτενής και συστηματική βιβλιογραφική έρευνα της διπλωματικής της εργασίας με τίτλο «Συγκριτική Παρουσίαση και Ανάλυση Περιστατικών Βιοαποκατάστασης μέσω Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης» εντόπισε 32 ρυπασμένους χώρους με χλωριωμένα αιθυλένια. Εξ αυτών, οι 19 αφορούσαν σε εφαρμογές ενισχυμένης αποχλωρίωσης σε πλήρη κλίμακα (είτε ολοκληρωμένες είτε τότε εν εξελίξει) και ακόμη οκτώ σε πιλοτικές δοκιμές της μεθόδου με προοπτική εξέλιξης σε εφαρμογές πλήρους κλίμακας

στο μέλλον. Εξ αυτών, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιλέχθηκαν δύο περιστατικά εφαρμογής της μεθόδου σε πλήρη κλίμακα και ακόμη ένα περιστατικό πιλοτικής δοκιμής της μεθόδου (το οποίο τελικώς αναβαθμίστηκε σε πλήρους κλίμακας). Το κριτήριο επιλογής των περιστατικών αυτών ήταν (α) η δυνατότητα ταυτοποίησής τους και (β) η πληρότητα δεδομένων και αναφορών προόδου για την εξέλιξη της αποκατάστασής τους. Με περαιτέρω αναζήτηση στη βιβλιογραφία εντοπίστηκαν ακόμη δύο ρυπασμένοι χώροι και τελικώς δημιουργήθηκε η συλλογή πέντε περιστατικών ρύπανσης με χλωριωμένα αιθυλένια, για τα οποία το ρυπασμένο μέσο είναι το υπόγειο νερό, η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης σε πλήρη κλίμακα είναι η Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση και ταυτόχρονα πληρούν το κριτήριο επιλογής της ύπαρξης μακριάς χρονοσειράς μετρήσεων συγκεντρώσεων. Η αναζήτηση ρυπασμένων χώρων στη βάση δεδομένων Superfund είχε ως αποτέλεσμα την επιλογή περιστατικών των οποίων η αποκατάσταση βρίσκεται μέχρι σήμερα σε εξέλιξη, λόγω της καινοτομίας της μεθόδου. Σε δεύτερη φάση θεωρήθηκε χρήσιμη η ανεύρεση αναφορών σχετικά με τις πιλοτικές δοκιμές των επιλεχθέντων περιστατικών ρύπανσης επειδή, αν και προφανώς η κλίμακα επέμβασης διαφέρει, μπορεί να γίνει μία σύγκριση της καταγεγραμμένης επίδοσης της αποχλωρίωσης μεταξύ των δύο εφαρμογών για το ίδιο περιστατικό.

3.3. Κατηγοριοποίηση τάσεων συμπεριφοράς

Αφού ολοκληρώθηκε η δημιουργία του δείγματος περιστατικών ρύπανσης, ακολούθησε η διαδικασία συλλογής των απαραίτητων δεδομένων προς επεξεργασία, η οποία βασίστηκε κατά κύριο λόγο στις μετρήσεις των πηγαδιών δειγματοληψίας του εκάστοτε ρυπασμένου χώρου. Τα πηγάδια παρακολούθησης αποτελούν σημεία «μάρτυρες» για την εξέλιξη των εφαρμογών πλήρους κλίμακας μέσω των συστηματικών μετρήσεών τους. Οι μετρήσεις κάθε πηγαδιού αφορούν και στα τέσσερα χλωροαιθένια (PCE, TCE, DCE και VC) και η διαδοχική ένωσή τους δημιουργεί μία χρονοσειρά για κάθε χλωροαιθένιο με αρχή την έναρξη της εφαρμογής πλήρους κλίμακας και τέλος τις πλέον πρόσφατες συνθήκες ή την ολοκλήρωση της εφαρμογής.

Στο δείγμα των 5 περιστατικών ρύπανσης, οι εφαρμοζόμενες μέθοδοι αποκατάστασης ήταν ή είναι η βιοδιέγερση ή η βιοεπαύξηση συνδυαστικά με την ενδογενή αποχλωρίωση. Η ενδογενής αποχλωρίωση και στα πέντε περιστατικά ρύπανσης αποτελεί την εφαρμοζόμενη μέθοδο αποκατάστασης στα απομακρυσμένα από την εστία τμήματα της ρυπασμένης έκτασης, όπου οι συγκεντρώσεις των ρύπων είναι σημαντικά μικρότερες από τις μέγιστες καταγεγραμμένες και στα οποία δεν πραγματοποιήθηκαν χορηγήσεις με σκοπό την αποκατάσταση του ρυπασμένου υπόγειου νερού. Έτσι, απομονώθηκαν (α) οι υποπεριοχές της ρυπασμένης έκτασης κάθε περιστατικού στις οποίες η εφαρμοζόμενη μέθοδος ήταν η

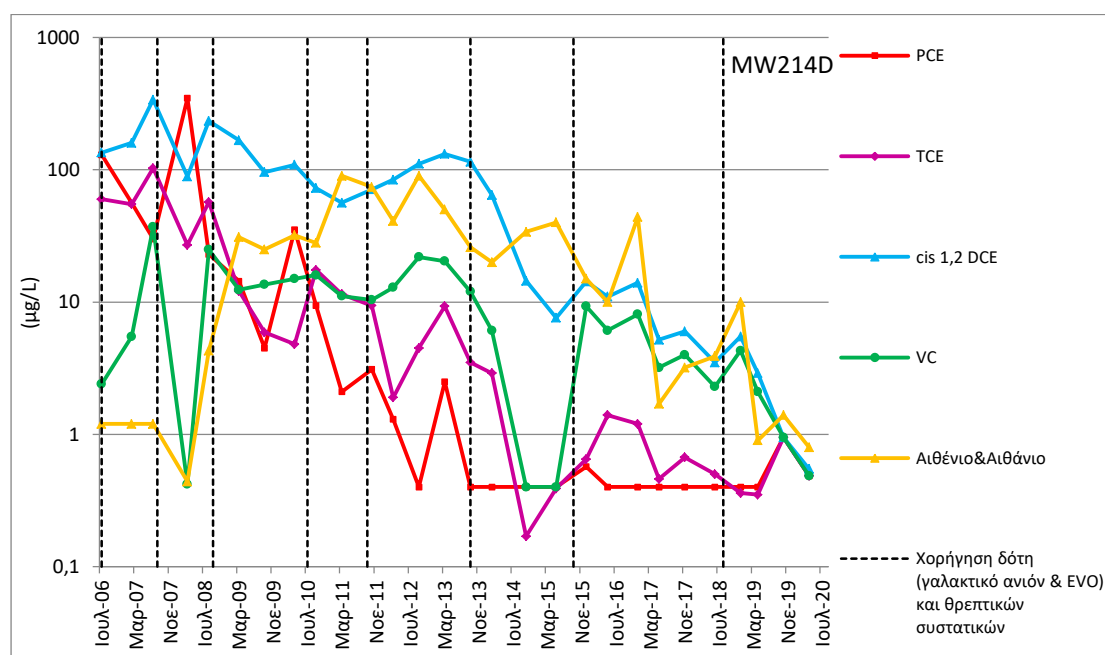
βιοδιέγερση ή η βιοεπάυξηση και (β) τα δειγματοληπτικά πηγάδια τα οποία αναμενόταν, βάσει των Αναφορών Προόδου των περιστατικών, να επωφεληθούν από τις χορηγήσεις δότη που πραγματοποιήθηκαν μέσω του εκάστοτε συστήματος χορήγησης (συστήματα επανακυκλοφορίας νερού, διατομές απευθείας εισπίεσης δότη μέσω σημείων εισπίεσης και πηγάδια ένεσης). Στην συντριπτική πλειοψηφία των ρυπασμένων χώρων του δείγματος, οι χορηγήσεις δότη που πραγματοποιήθηκαν ήταν περισσότερες από μία και η συχνότητα της χορήγησης από σύστημα σε σύστημα του ίδιου ρυπασμένου χώρου, όσο και από χώρο σε χώρο, διαφέρει (βλέπε Κεφάλαιο 5, Πίνακας 5.1).

Προς εξοικείωση του αναγνώστη, αναφέρεται ότι οι μετρήσεις που λαμβάνουν χώρα στο πεδίο μέσω των πηγαδιών παρακολούθησης είναι αναμενόμενο να παρουσιάζουν ποσοτικές διακυμάνσεις. Πέρα από την αναμενόμενη διακύμανση, σε ορισμένες περιπτώσεις οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων είναι αρκετά μεγάλες ώστε να χωρίζουν την ίδια χρονοσειρά σε παραπάνω από ένα διακριτά επεισόδια. Εκτός αυτού, κατά την καταγραφή της προόδου στο δείγμα των περιστατικών, παρατηρήθηκε σημαντική διακύμανση και στην ποιοτική συμπεριφορά των πηγαδιών παρακολούθησης. Έτσι, η ανάγκη κατηγοριοποίησης των τάσεων συμπεριφοράς ήταν επιτακτική. Η εξοικείωση με τις μετρήσεις στο πεδίο είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία τεσσάρων κατηγοριών τάσεων συμπεριφοράς (από εδώ και πέρα θα αναφέρονται ως συμπεριφορές) των πηγαδιών παρακολούθησης, σε κάθε μία από τις οποίες ορίστηκε μία σύντομη κωδική ονομασία προς διευκόλυνση του αναγνώστη. Οι παρατηρούμενες συμπεριφορές είναι οι εξής:

- **Συμπεριφορά «Πρόοδος»:**

Σε πηγάδια με αυτή την συμπεριφορά οι συγκεντρώσεις των πρωτογενών ρύπων μειώνονται σταδιακά, οι συγκεντρώσεις των θυγατρικών προϊόντων παρουσιάζουν αύξηση και έπειτα από ένα χρονικό διάστημα (της τάξεως κάποιων μηνών ή και λίγων χρόνων) ξεκινούν και αυτές την πτωτική πορεία, φθάνοντας τελικά σε τιμές κοντά στα όρια αποκατάστασης (ή ακόμη και σε μη ανιχνεύσιμα επίπεδα) και φαίνεται να έχουν σταθεροποιηθεί σε αυτές τις χαμηλές τιμές μέχρι και την τελευταία διαθέσιμη μέτρηση. Η σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων των χλωροαιθινίων σε χαμηλές τιμές σχετίζεται άμεσα με την συγκέντρωση του αιθενίου. Αν η συγκέντρωση του αιθενίου έχει φτάσει στη μέγιστη τιμή της και στη συνέχεια, όταν οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθινίων έχουν φτάσει σε τιμές κοντά στα όρια αποκατάστασης, έχει και αυτή μειωτική τάση, τότε φαίνεται ότι η αποχλωρωτική διαδικασία οδεύει προς την πλήρη ολοκλήρωση. Στο Σχήμα 3.1 δίνεται ενδεικτικά ένα παράδειγμα πηγαδιού δειγματοληψίας με συμπεριφορά «πρόοδος», όπου παρατηρείται συστηματική (με τις αναμενόμενες μικρο-διακυμάνσεις) μείωση των συγκεντρώσεων των πρωτογενών και των

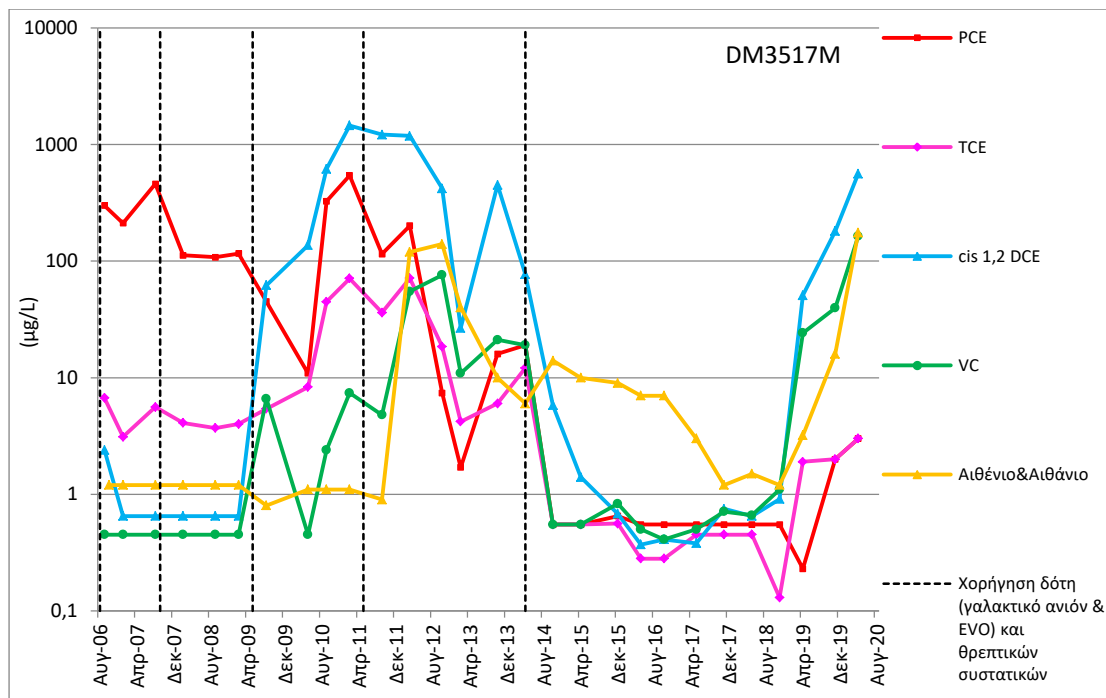
θυγατρικών ρύπων σε μια περίοδο 14 ετών (2006-2020). Η συγκέντρωση του αιθενίου φτάνει τελευταία στην μέγιστη τιμή της (μέσα στο 2014), και στη συνέχεια μειώνεται και αυτή.



Σχήμα 3.1 Πηγάδι παρακολούθησης με συμπεριφορά πρόοδο (MW214D), βαθιά στρώση υδροφορέα στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007a; 2008a; 2008b; 2008e; 2009a; 2009c; 2011a; 2011b; 2012b; 2012c; 2013a; 2013e; 2014a; 2014b; 2015a; 2018b; AECOM, 2016a; 2016b; 2017a; 2017b; 2018b; 2019a; 2019b; 2020a; 2020b)

- **Συμπεριφορά «Υποτροπή»:**

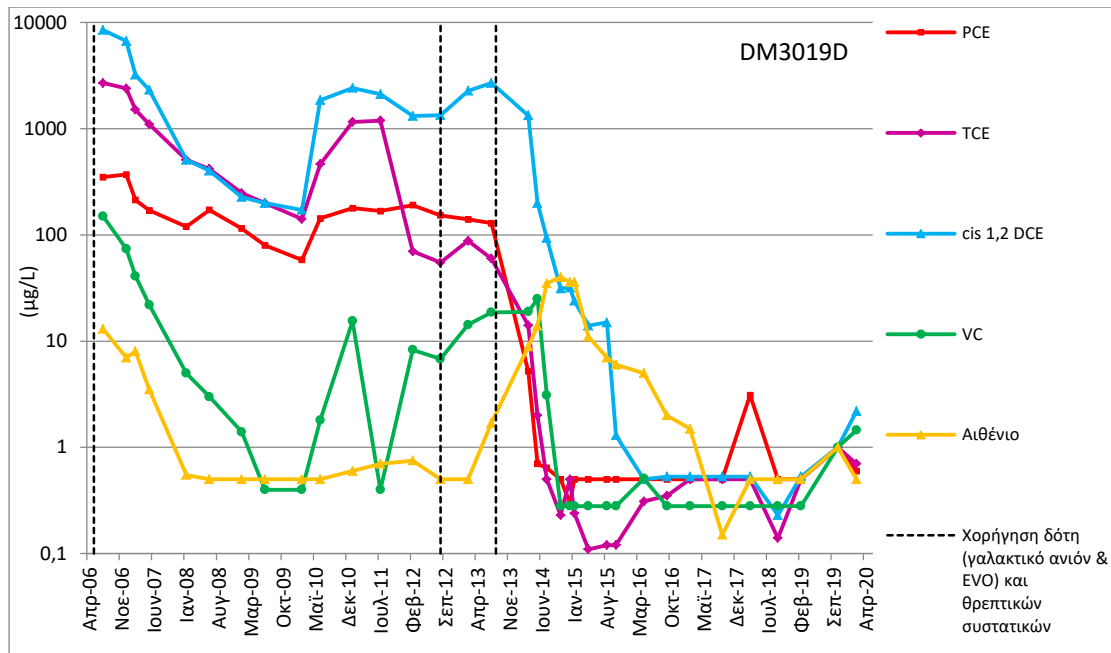
Σε πηγάδια με αυτή την συμπεριφορά, ενώ έχουν πραγματοποιηθεί κάποιες χορηγήσεις δότη και οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθινίων φαίνεται να έχουν σταθεροποιηθεί σε χαμηλά επίπεδα (ενδεχομένως να σημειώνεται μέχρι και επίτευξη των συγκεντρώσεων-στόχων), στη συνέχεια καταγράφονται σταδιακές ή και απότομες αυξήσεις των συγκεντρώσεων κατά δύο τάξεις μεγέθους και άνω. Η συμπεριφορά αυτή ενδεχομένως να οφείλεται είτε στην παρουσία DNAPL, η οποία αποτελεί μία σταθερή πηγή ρύπου ώσπου να διαλυθεί εντελώς, είτε στην εκρόφιση ρύπου με υστέρηση, δηλαδή στην καθυστερημένη μετάβαση του διαλυμένου ρύπου από τη στερεά στην υδατική φάση. Στην πλειονότητα των πηγαδιών με αυτή την συμπεριφορά, αφού καταγράφηκε η αύξηση των συγκεντρώσεων, πραγματοποιήθηκε επαναληπτική χορήγηση δότη με στόχο την επαναφορά των συγκεντρώσεων των χλωροαιθινίων σε χαμηλές τιμές. Στο Σχήμα 3.2 δίνεται ενδεικτικά ένα παράδειγμα πηγαδιού δειγματοληψίας με συμπεριφορά «υποτροπή», όπου μετά από σχεδόν έξι έτη (2011-2018) πτωτικής τάσης, παρατηρείται αύξηση συγκεντρώσεων δύο τάξεων μεγέθους και άνω για τα θυγατρικά προϊόντα.



Σχήμα 3.2 Πηγάδι παρακολούθησης με συμπεριφορά υποτροπή (DM3517M), βαθειά στρώση υδροφορέα στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007a; 2008a; 2008b; 2008e; 2009a; 2009c; 2011a; 2011b; 2012b; 2012c; 2013a; 2013e; 2014a; 2014b; 2015a; 2018b; AECOM, 2016a; 2016b; 2017a; 2017b; 2018b; 2019a; 2019b; 2020a; 2020b)

- **Συμπεριφορά «Υστέρηση»:**

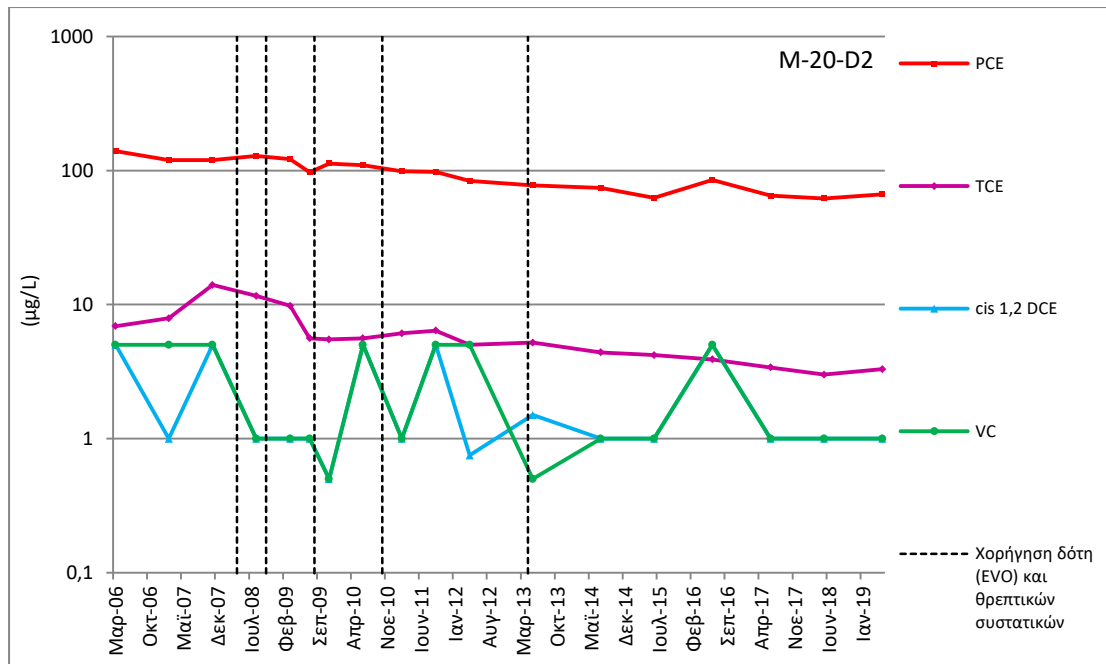
Σε πηγάδια με αυτή τη συμπεριφορά, ενώ έχουν πραγματοποιηθεί κάποιες χορηγήσεις δότη, οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθινίων παρουσιάζουν μικρή μείωση ή παραμένουν σταθερά στις τιμές των αρχικών συνθηκών. Σε μεταγενέστερο γύρο χορήγησης δότη, οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθινίων μειώνονται απότομα και σχετικά ταυτόχρονα, φθάνοντας σε χαμηλές τιμές ή μέχρι και σε μη ανιχνεύσιμα επίπεδα. Στο Σχήμα 3.3 δίνεται ενδεικτικά ένα παράδειγμα πηγαδιού δειγματοληψίας με συμπεριφορά «υστέρηση», όπου μετά από την τρίτη κατά σειρά χορήγηση δότη (καλοκαίρι 2013), παρατηρείται μείωση συγκεντρώσεων έως και τέσσερις τάξεις μεγέθους.



Σχήμα 3.3 Πηγάδι παρακολούθησης με συμπεριφορά υστέρησης (DM3019D), βαθειά στρώση υδροφορέα στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007b; 2007c; 2008c; 2008d; 2008e; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2017; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM, 2016c; 2018a; 2020c; 2020d)

- **Συμπεριφορά «Στασιμότητα»:**

Η κατηγορία αυτή αφορά σε πηγάδια στα οποία οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθενίων είτε (α) παραμένουν σχεδόν σταθερές από την έναρξη της εφαρμογής έως την πλέον πρόσφατη μέτρηση, ή (β) έχουν σημειώσει πολύ μικρή μείωση για τους πρωτογενείς ρύπους ενώ οι συγκεντρώσεις των θυγατρικών ρύπων παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα, ή (γ) έχουν σημειώσει μέχρι και αύξηση για τους πρωτογενείς ρύπους. Εν ολίγοις, πηγάδια με αυτή την συμπεριφορά τελικώς δεν επωφελήθηκαν από τις χορηγήσεις δότη ή/και μικροοργανισμών που πραγματοποιήθηκαν και η πρόοδος που καταγράφεται σε αυτά είναι από μικρή έως και αμελητέα. Στο Σχήμα 3.4 δίνεται ενδεικτικά ένα παράδειγμα πηγαδιού παρακολούθησης με συμπεριφορά «στασιμότητα» της περίπτωσης (α) για ένα χρονικό διάστημα 13 ετών.



Σχήμα 3.4 Πηγάδι παρακολούθησης με συμπεριφορά στασιμότητα (M-20-D2), βαθιά στρώση 2 του υδροφορέα στην ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)

3.4. Υπολογισμός χρόνων ημιζωής

Ο χρόνος ημιζωής αποτελεί παράμετρο «κλειδί» για την αξιολόγηση της αποκατάστασης του υπόγειου νερού γενικότερα, αφού αντιπροσωπεύει τον ρυθμό αποδόμησης ενός ρύπου. Ως χρόνος ημιζωής ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου η συγκέντρωση ενός ρύπου στο υπόγειο νερό να μειωθεί κατά 50%.

Όσον αφορά στα χλωριωμένα αιθυλένια με τα οποία ασχολείται η παρούσα εργασία, οι τιμές των χρόνων ημιζωής που έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία αφορούν είτε σε μελέτες στο εργαστήριο είτε σε μελέτες στο πεδίο. Οι τιμές των χρόνων ημιζωής των χλωροαιθενίων που προκύπτουν μέσω εργαστηριακών μελετών συνήθως έχουν μεγάλη απόκλιση από εκείνες που τελικά καταγράφονται στο πεδίο. Οι συνθήκες που διέπουν μία πειραματική δοκιμή (π.χ. θερμοκρασία ή pH) είναι προκαθορισμένες και δύσκολα μπορούν να προσομοιάσουν τις συνθήκες που διέπουν το πεδίο στην πραγματικότητα. Στην παρούσα εργασία υπολογίστηκαν οι τιμές για κάθε στάδιο της αποχλωρίωσης στο πεδίο με σκοπό την αξιολόγηση της επίδοσης της μεθόδου, αλλά και εν συνεχεία τη σύγκριση των υπολογισθεισών τιμών με τους αντίστοιχους της ενισχυμένης και της ενδογενούς αποχλωρίωσης από μελέτες πεδίου στη βιβλιογραφία.

Σε πρώτη φάση, έγινε γραμμική προσέγγιση της κάθε καμπύλης μεταβολής της συγκέντρωσης ενός χλωροαιθενίου στο χρόνο και στη συνέχεια ο χρόνος ημιζωής υπολογίστηκε ως εξής:

$$T^{1/2} = \ln(2)/\lambda, \text{ όπου:}$$

$$\lambda = -\ln(C/C_0)/\Delta t, \lambda: \text{ συντελεστής βιομετασχηματισμού}$$

C: τελική συγκέντρωση του ρύπου στο υπόγειο νερό,

C₀: αρχική συγκέντρωση του ρύπου στο υπόγειο νερό και

Δt: χρονική απόσταση της μέτρησης των δύο συγκεντρώσεων

Ωστόσο, το σκεπτικό υλοποίησης της γραμμικής προσέγγισης έπρεπε να είναι σαφώς ορισμένο επειδή, όπως προαναφέρθηκε οι μετρήσεις στο πεδίο συχνά παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις. Έτσι, αρχικά έγινε ο εξής διαχωρισμός μεταξύ των χρονοσειρών στο πεδίο:

- Χρονοσειρές στις οποίες παρατηρείται αποκλειστικά ένα διακριτό επεισόδιο:
Τέτοιες χρονοσειρές αφορούν σε πηγάδια με συμπεριφορά πρόοδο ή στασιμότητα. Στις περιπτώσεις αυτές αξιοποιήθηκε ολοκληρω το χρονικό διάστημα των μετρήσεων στο πεδίο για την γραμμική προσέγγιση και εν συνεχεία για τον υπολογισμό των χρόνων ημιζωής.
- Χρονοσειρές στις οποίες παρατηρούνται παραπάνω από ένα διακριτά επεισόδια:
Τέτοιες χρονοσειρές αφορούν σε πηγάδια με συμπεριφορά υποτροπή ή υστέρηση. Στις περιπτώσεις αυτές, γίνονται δύο διαφορετικές γραμμικές προσεγγίσεις (μία ανά διακριτό επεισόδιο) για κάθε χλωροαιθέριο και υπολογίζονται οι χρόνοι ημιζωής ανά επεισόδιο, ώστε τελικώς να υπολογιστεί η μέση τιμή του χρόνου ημιζωής του κάθε χλωροαιθενίου.

Για τις περιπτώσεις πηγαδιών δειγματοληψίας με συμπεριφορά υποτροπή στα οποία η αύξηση των συγκεντρώσεων είναι πολύ πρόσφατη, η γραμμική προσέγγιση βασίστηκε στο χρονικό διάστημα από την έναρξη της εφαρμογής πλήρους κλίμακας μέχρι πριν καταγραφεί η αύξηση των συγκεντρώσεων των χλωροαιθίων, αγνοώντας δηλαδή το μεταγενέστερο διακριτό επεισόδιο. Τέλος, οι γραμμικές προσεγγίσεις που γίνονται για το ίδιο πηγάδι, προκύπτουν από την ένωση σημείων που αφορούν στις ίδιες ή κοντινές χρονολογίες για όλα τα χλωροαιθένια της ίδιας χρονοσειράς, εκτός αν σε κάποιες περιπτώσεις για τα πρωτογενή χλωροαιθένια έχουν επιτευχθεί τα όρια αποκατάστασης αρκετά νωρίτερα από ότι για τα θυγατρικά.

3.5. Σύνοψη

Ξεκινώντας από τη βάση δεδομένων περιστατικών εφαρμογής της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης της Ζηκίδη (2010), αναζητήθηκαν νέα δεδομένα της τελευταίας δεκαετίας και επιπλέον περιστατικά. Η κατηγοριοποίηση των συμπεριφορών των πηγαδιών παρακολούθησης και ο υπολογισμός των χρόνων ημιζωής θα αποτελέσουν τα εργαλεία με τα οποία θα γίνει η, ποιοτική και ποσοτική αντίστοιχα, περιγραφή της προόδου της αποχλωρίωσης στο πεδίο.

Κεφάλαιο 4 - Περιστατικά εφαρμογής της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης σε πλήρη κλίμακα

4.1. Εισαγωγή

Το πρώτο βήμα για την αξιολόγηση της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης κατά την εφαρμογή της σε πλήρη κλίμακα ήταν η συλλογή του απαραίτητου δείγματος περιστατικών. Το παρόν κεφάλαιο και το Κεφάλαιο 5 θα συμβάλουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για την επίδοση της μεθόδου στο πεδίο.

Οι βασικές πηγές της αναζήτησης ήταν οι βάσεις δεδομένων του προγράμματος Superfund και της Πολεμικής Αεροπορίας των Η.Π.Α.. Σε αυτές εντοπίστηκαν πέντε περιστατικά ρύπανσης του υπεδάφους με τα απαραίτητα πρακτικά απόφασης και τις αναφορέα προόδου αυτών. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά τα περιστατικά ρύπανσης τα οποία απαρτίζουν το δείγμα προς αξιολόγηση και σε δεύτερη φάση οι περιγραφές συνοψίζονται και παρουσιάζονται υπό τη μορφή πίνακα (Πίνακας 4.1). Η εκτενέστερη παρουσίαση των περιστατικών γίνεται στο Παράρτημα Α.

4.2. Δείγμα περιστατικών

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε αναζήτηση περιστατικών ρύπανσης του υπεδάφους με χλωριωμένα αιθυλένια στα οποία η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης σε πλήρη κλίμακα είναι η Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση. Τα κριτήρια επιλογής των περιστατικών έχουν ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3. Οι βασικές πηγές αναζήτησης ήταν οι βάσεις δεδομένων του προγράμματος Superfund της Αμερικάνικης Υπηρεσίας Περιβάλλοντος (<https://www.epa.gov/superfund/superfund-national-priorities-list-npl>) και της Πολεμικής Αεροπορίας των Η.Π.Α. (<https://ar.afcec-cloud.af.mil/>) λόγω του πλούτου πληροφοριών και αναφορών, αλλά και της ελεύθερης πρόσβασης σε αυτές. Έτσι προέκυψε ένα δείγμα πέντε ρυπασμένων χώρων εκ των οποίων οι τέσσερις είναι εντός της Λίστας Χώρων Προτεραιότητας των Η.Π.Α. και η αποκατάστασή τους βρίσκεται μέχρι σήμερα σε εξέλιξη (περιστατικά (i) – (iv)) και ένας είναι εκτός αυτής και η αποκατάστασή του έχει ολοκληρωθεί (περιστατικό (v)). Για τις τέσσερις περιπτώσεις ρυπασμένων χώρων εντός της Λίστας Χώρων Προτεραιότητας σημειώνονται παρακάτω και οι κωδικοί Υπηρεσίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. (EPA ID). Τα περιστατικά ρύπανσης είναι τα εξής:

- i. Περιοχή 6 (Area 6), Αεροπορική Βάση Ντόβερ (Dover Air Force Base-DAFB), Ντέλαγουερ, Η.Π.Α. (EPA ID: DE8570024010)
- ii. Περιοχή 5 (Area 5), Αεροπορική Βάση Ντόβερ (Dover Air Force Base-DAFB), Ντέλαγουερ, Η.Π.Α. (EPA ID: DE8570024010)

- iii. Περιοχή SS015 (Solvent Spill Area 15), Αεροπορική Βάση Τράβις (Travis Air Force Base), Καλιφόρνια, Η.Π.Α. (EPA ID: CA5570024575)
- iv. Ρυπασμένη έκταση στην πόλη Εσπανιόλα (Esplanola, North Railroad Avenue Plume), Νέο Μεξικό, Η.Π.Α. (EPA ID: NMD986670156)
- v. Πρώην Εγκατάσταση 87 (Former Facility 87), πρώην Αεροπορική Βάση Νιούαρκ (Former Newark Air Force Base), Οχάιο, Η.Π.Α.

Αν και οι περισσότερες εφαρμογές των περιστατικών που επιλέχθηκαν βρίσκονται σε εξέλιξη, η συστηματική παρακολούθησή τους έχει συμπληρώσει από πέντε (5) έως και δεκατέσσερα (14) έτη, χρονικό διάστημα που θεωρείται ικανό προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

4.3. Βασικά δεδομένα περιστατικών

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα βασικά δεδομένα των περιστατικών. Σκοπός είναι να μην χαθεί ο αναγνώστης σε λεπτομέρειες για τις ενέργειες αποκατάστασης που πραγματοποιήθηκαν στον κάθε ρυπασμένο χώρο κατά την εξέλιξη της εφαρμογής. Αντιθέτως, τα περιστατικά παρουσιάζονται με τρόπο ώστε να δίνουν στον αναγνώστη τις απαραίτητες πληροφορίες (όπως η τοποθεσία, ο εδαφικός σχηματισμός και το βάθος της ρύπανσης) προκειμένου (α) να συνθέσει την γενική εικόνα του χώρου και (β) να κατανοήσει την πρόοδο που έχει σημειωθεί σε αυτόν μέσω της περιγραφής της πιλοτικής δοκιμής του και της αναδρομής από τις αρχικές συνθήκες της εφαρμογής πλήρους κλίμακας έως τη λήξη της ή την πλέον πρόσφατη μέτρηση. Στο Παράρτημα Α γίνεται εκτενέστερη παρουσίαση των περιστατικών.

i) Περιστατικό ρύπανσης υπεδάφους με χλωροαιθένια: Περιοχή 6 (Area 6), Αεροπορική Βάση Ντόβερ (Dover Air Force Base-DAFB), Ντέλαγουερ, Η.Π.Α.

Η Βάση Πολεμικής Αεροπορίας Ντόβερ βρίσκεται στην πολιτεία Ντέλαγουερ στην ανατολική ακτή της Αμερικής. Ξεκίνησε να λειτουργεί το 1941 και είναι ενεργή μέχρι σήμερα. Το 1983 ξεκίνησε η αξιολόγηση της Βάσης ως ρυπασμένου χώρου και το 1995 βρέθηκε ότι η έκτασή της είναι ρυπασμένη περίπου στο 25% (4 km²). Πιθανώς λόγω της σημαντικής υπάρχουσας ρύπανσης, η Βάση Πολεμικής Αεροπορίας Ντόβερ χρησιμοποιήθηκε ως χώρος πιλοτικών εφαρμογών (Groundwater Remediation Field Laboratory-GRFL) στον οποίο ερευνήθηκαν μια σειρά από τεχνολογίες αποκατάστασης (USEPA, 1996).

Το συγκεκριμένο περιστατικό που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια εστιάζει στην Περιοχή 6 που είναι ρυπασμένη κυρίως με χλωριωμένα αιθυλένια. Ο ρυπασμένος υδροφορέας έχει

συνολικό πάχος περίπου 11 μέτρα και έχει χωριστεί σε δύο στρώσεις, την ρηχή 4-7.5 μέτρα και την βαθειά, 7.5-15 μέτρα.

Οι δράσεις απορρύπανσης περιλαμβάνουν μία πιλοτική δοκιμή το διάστημα 1996-1998 με συνδυασμό βιοδιέγερσης και βιοεπαύξεσης. Στόχος της πιλοτικής δοκιμής ήταν να εξακριβωθεί εάν η αποχλωριωτική διαδικασία μπορεί να συνεχιστεί μέχρι και το τελικό στάδιο του αιθενίου στη βαθειά στρώση του υδροφορέα. Στην περιοχή υλοποίησης οι μέγιστες συγκεντρώσεις ήταν της τάξεως των 7,500 $\mu\text{g/L}$ και αφορούσαν στο TCE. Έπειτα από σχεδόν 9 μήνες συνεχούς χορήγησης μείγματος δοτών μέσω συστήματος επανακυκλοφορίας νερού, η αποχλωριωτική διαδικασία έδειχνε να σταματά στο στάδιο του cis 1,2 DCE. Τότε πραγματοποιήθηκαν δύο προσθήκες μικροοργανισμών μέσω εισπίεσης και η πιλοτική δοκιμή ολοκληρώθηκε με επιτυχία στις αρχές του 1998 (Ellis et al., 2000).

Το 2006 ξεκίνησε η εφαρμογή πλήρους κλίμακας με μέθοδο αποκατάστασης τη βιοδιέγερση συνδυαστικά με ενδογενή αποχλωρίωση. Ο εκτιμηθείς χρόνος ολοκλήρωσης της αποκατάστασης ήταν (i) 6 έως 22 χρόνια για τις υποπεριοχές όπου η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η βιοδιέγερση και (ii) παραπάνω από 50 έτη για τις υποπεριοχές όπου η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η ενδογενής αποχλωρίωση. Το όριο αποκατάστασης για το PCE είναι τα 5 $\mu\text{g/L}$, για τα TCE και VC το 1 $\mu\text{g/L}$ και για το cis 1,2 DCE τα 70 $\mu\text{g/L}$. Ο ενδιάμεσος στόχος αποκατάστασης για την Περιοχή 6 αφορά στη μείωση του αθροίσματος των συγκεντρώσεων όλων των χλωροαιθενίων, τόσο στη ρηχή όσο και στη βαθειά στρώση, σε τιμή μικρότερη των 500 $\mu\text{g/L}$ (USACE, 2006b).

Κατά τις αρχικές συνθήκες (2006) η ρύπανση στην ρηχή στρώση εκτεινόταν σε τρεις διακριτές περιοχές, για περίπου 170-400 μέτρα στην κατεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού η κάθε μία, ενώ στην βαθύτερη στρώση η ρύπανση εκτεινόταν για περίπου 2 χιλιόμετρα στην κατεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού. Στη μεγαλύτερη εκ των τριών διακριτών ρυπασμένων περιοχών της ρηχής στρώσης η μέγιστη συγκέντρωση ήταν ίση με 16,600 $\mu\text{g/L}$ και αφορούσε στο cis 1,2 DCE, ενώ στις άλλες δύο διακριτές περιοχές ήταν ίση με 710 $\mu\text{g/L}$ και 280 $\mu\text{g/L}$ αντίστοιχα και αμφότερες αφορούσαν στο TCE. Στη βαθειά στρώση οι μέγιστες συγκεντρώσεις ήταν της τάξεως των 9,300 $\mu\text{g/L}$ και αφορούσαν στο cis 1,2 DCE (ORNL, 2008d). Το γεγονός ότι και στις δύο στρώσεις οι μέγιστες συγκεντρώσεις αφορούν στο cis 1,2 DCE αποτελεί ένδειξη παλαιάς ρύπανσης στην περιοχή.

Με βάση τις πιο πρόσφατες διαθέσιμες μετρήσεις του 2020, η πρόοδος της αποκατάστασης κρίνεται ως αρκετά πετυχημένη. Συγκεκριμένα στη ρηχή στρώση, στη μεγαλύτερη εκ των τριών διακριτών ρυπασμένων περιοχών και με τη μέγιστη συγκέντρωση κατά τις αρχικές συνθήκες, έχει σημειωθεί μείωση της έκτασης κατά 55% και μείωση των μέγιστων συγκεντρώσεων κατά μία τάξη μεγέθους το 2020 (από τα 16,600 $\mu\text{g/L}$ στα 5,290 $\mu\text{g/L}$ για το cis 1,2 DCE). Στις άλλες δύο μικρότερες διακριτές ρυπασμένες περιοχές της ρηχής στρώσης, το 2020 η μία έχει αποκατασταθεί πλήρως (μείωση συγκεντρώσεων κατά

δύο τάξεις μεγέθους), ενώ στην άλλη η έκταση έχει μειωθεί κατά 45% και οι μέγιστες συγκεντρώσεις έχουν σημειώσει μείωση κατά μία τάξη μεγέθους (από τα 710 µg/L για το TCE στα 23 µg/L για το VC το 2020). Αντίθετα στη βαθειά στρώση η ρυπασμένη έκταση παραμένει περίπου η ίδια, με τη μέγιστη συγκέντρωση να είναι της τάξεως των 1,000 µg/L το 2020 και να καταγράφεται αποκλειστικά σε δύο πηγάδια παρακολούθησης για το cis 1,2 DCE (1,210 µg/L και 1,050 µg/L αντίστοιχα) (AECOM, 2020d). Εκτός αυτών των δύο πηγαδιών, στην περιοχή των οποίων η προσπάθεια αποκατάστασης δεν ήταν εντατική αφού το μείγμα δοτών εισπιάστηκε στη βαθειά στρώση μόνο μία φορά κατά την έναρξη της εφαρμογής, κατά σειρά οι αμέσως επόμενες μέγιστες συγκεντρώσεις σε δύο πηγάδια παρακολούθησης είναι ίσες με 811 µg/L (cDCE) και 268 µg/L (TCE), ενώ όλα τα υπόλοιπα πηγάδια παρακολούθησης της βαθειάς στρώσης έχουν μέγιστες συγκεντρώσεις της τάξεως των 10 µg/L και αφορούν στο VC.

ii) Περιστατικό ρύπανσης υπεδάφους με χλωροαιθένια: Περιοχή 5 (Area 5), Αεροπορική Βάση Ντόβερ (Dover Air Force Base-DAFB), Ντέλαγουερ, Η.Π.Α.

Μια ακόμη ρυπασμένη περιοχή με χλωριωμένα αιθυλένια στη Βάση Ντόβερ είναι η Περιοχή 5 που βρίσκεται ανατολικά της Περιοχής 6. Παρά το γεγονός ότι οι δύο περιοχές είναι άμεσα γειτνιάζουσες, η ρύπανση της κάθε μίας έχει προκύψει από διαφορετικές πηγές και αντιμετωπίζεται στο πλαίσιο ξεχωριστών δράσεων. Οι υδρογεωλογικές συνθήκες στην Περιοχή 5 είναι κοινές με της Περιοχής 6 και έχουν ήδη περιγραφεί .

Οι δράσεις απορρύπανσης περιλαμβάνουν μία πιλοτική δοκιμή που έλαβε χώρα το 1997 δίχως επιτυχία, κατά την οποία η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης ήταν η επί τόπου επεξεργασία του υπόγειου νερού μέσω περατού διαφράγματος με υλικό πλήρωσης το σίδηρο. Λόγω λανθασμένου σχεδιασμού δεν έχουν εξαχθεί χρήσιμα συμπεράσματα από τη διενέργεια της πιλοτικής δοκιμής, αφού το ρυπασμένο υπόγειο νερό κινείται τελικώς περισσότερο γύρω από τον χημικό αντιδραστήρα, παρά μέσα από αυτόν (USACE, 2006a).

Το 2006 ξεκίνησε η εφαρμογή πλήρους κλίμακας με μέθοδο αποκατάστασης τη βιοδιέγερση συνδυαστικά με ενδογενή αποχλωρίωση. Ο εκτιμηθείς χρόνος ολοκλήρωσης της αποκατάστασης ήταν (i) 6 έως 20 χρόνια για τις υποπεριοχές όπου η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η βιοδιέγερση και (ii) παραπάνω από 50 έτη για τις υποπεριοχές όπου η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η ενδογενής αποχλωρίωση (USACE, 2006a). Τα όρια αποκατάστασης, όπως και ο ενδιάμεσος στόχος αυτής, είναι κοινά με αυτά της Περιοχής 6 και έχουν ήδη αναφερθεί.

Κατά την έναρξη της εφαρμογής πλήρους κλίμακας στην Περιοχή 5 (2006), η ρύπανση εκτείνεται τόσο στη ρηχή όσο και στη βαθειά στρώση, όπως και στην Περιοχή 6. Στη βαθειά στρώση του υδροφορέα η ρυπασμένη περιοχή είναι ενιαία και εκτείνεται για περίπου 900

μέτρα στην κατεύθυνση κίνησης του υπόγειου νερού, με τη μέγιστη συγκέντρωση να είναι ίση με 1,400 µg/L και να αφορά στο PCE. Στη ρηχή στρώση, η ρύπανση εκτείνεται σε τέσσερις διακριτές περιοχές. Στη μεγαλύτερη εξ αυτών, η οποία εκτείνεται για περίπου 270 μέτρα στην κατεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού, η μέγιστη συγκέντρωση που καταγράφεται το 2006 είναι ίση με 3,800 µg/L και αφορά στο VC. Στην αμέσως μεγαλύτερη διακριτή περιοχή της ρηχής στρώσης, η ρύπανση εκτείνεται για περίπου 70 μέτρα, η μέγιστη συγκέντρωση αφορά στο PCE και είναι ίση με 4,700 µg/L. Οι άλλες δύο διακριτές ρυπασμένες περιοχές της ρηχής στρώσης εκτείνονται για περίπου 30 μέτρα η κάθε μία, έχουν μέγιστες συγκεντρώσεις ίσες με 90 µg/L και 210 µg/L και αφορούν στο cis 1,2 DCE και στο PCE αντίστοιχα.

Η πρόοδος της αποκατάστασης κρίνεται ως σχετικά επιτυχημένη στην Περιοχή 5. Η δειγματοληψία του Μαρτίου 2017 ήταν η δεύτερη συνεχόμενη δειγματοληψία κατά την οποία είχε επιτευχθεί ο ενδιάμεσος στόχος αποκατάστασης στην Περιοχή, τόσο στη ρηχή όσο και στη βαθειά στρώση του υδροφορέα (ORNL, 2018b). Έκτοτε η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης στην περιοχή επρόκειτο να είναι αποκλειστικά η ενδογενής αποχλωρίωση. Πολύ σύντομα όμως αυτό ανεκλήθη, αφού κατά τα τέλη του 2017 οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθενίων σε ένα πηγάδι παρακολούθησης της βαθειάς στρώσης επανήλθαν σε τιμές μεγαλύτερες των 500 µg/L, με αποτέλεσμα να πραγματοποιηθούν επαναληπτικές χορηγήσεις δότη. Κατά τα τέλη του 2018 και τα μέσα του 2019, παρόμοια συμπεριφορά κατεγράφη σε ακόμη δύο πηγάδια παρακολούθησης της ρηχής στρώσης. Σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες μετρήσεις του 2020, οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθενίων είναι μεγαλύτερες των 500 µg/L σε δύο πηγάδια παρακολούθησης της Περιοχής 5, ένα στη ρηχή και ένα στη βαθειά στρώση. Πιο συγκεκριμένα, στη βαθειά στρώση η ρυπασμένη περιοχή έχει μειωθεί περίπου κατά 45% το 2020 και έχει διαχωριστεί σε τέσσερις μικρότερες περιοχές, με τις μέγιστες συγκεντρώσεις να έχουν σημειώσει μείωση κατά μία τάξη μεγέθους (από τα 1,400 µg/L για το PCE κατά τις αρχικές συνθήκες στα 563 µg/L για το cis 1,2 DCE το 2020). Στη ρηχή στρώση, η μεγαλύτερη ρυπασμένη περιοχή του 2006 έχει μειωθεί περίπου κατά 60% το 2020 και έχει διαχωριστεί σε δύο μικρότερες περιοχές με μέγιστες συγκεντρώσεις της τάξεως των 630 µg/L (μείωση κατά μία τάξη μεγέθους), ενώ και η δεύτερη μεγαλύτερη ρυπασμένη περιοχή του 2006 έχει μειωθεί περίπου κατά 60% το 2020 και η μέγιστη συγκέντρωση έχει σημειώσει μείωση κατά δύο τάξεις μεγέθους (από τα 4,700 µg/L το 2006 για το PCE στα 19.9 µg/L το 2020 για το VC). Οι άλλες δύο μικρότερες διακριτές ρυπασμένες περιοχές της ρηχής στρώσης του 2006 έχουν αποδομηθεί πλήρως το 2020.

iii) Περιστατικό ρύπανσης υπεδάφους με χλωροαιθένια: Περιοχή SS015 (Solvent Spill Area 15), Αεροπορική Βάση Τράβις (Travis Air Force Base), Καλιφόρνια, Η.Π.Α.

Η Βάση Πολεμικής Αεροπορίας Τράβις βρίσκεται στην πολιτεία της Καλιφόρνια στην Αμερική. Ξεκίνησε να λειτουργεί το 1943 και είναι ακόμα ενεργή. Το 1983 ξεκίνησε ο χαρακτηρισμός της ως ρυπασμένου χώρου και βρέθηκε ότι η έκταση της είναι ρυπασμένη περίπου στο 20% (5 km²). Η Αεροπορική Βάση Τράβις χρησιμοποιείται ως χώρος στον οποίο ερευνώνται μια σειρά από καινοτόμες τεχνολογίες αποκατάστασης των υπόγειων υδροφορέων, όπως η Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση με δότη ηλεκτρονίων το γαλακτοποιημένο φυτικό λάδι (emulsified vegetable oil-EVO) και η Φυτοαποκατάσταση (DOD, 2017).

Το συγκεκριμένο περιστατικό εστιάζει στην Περιοχή SS015 που είναι ρυπασμένη με χλωριωμένα αιθυλένια. Η ιδιαιτερότητά του έγκειται στις δυσμενείς υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην Περιοχή. Στην εστία της ρύπανσης, το βραχώδες υπόβαθρο αποτελούμενο από χαλαρό ψαμμίτη και καρστικοποιημένο αργιλικό σχιστόλιθο, βρίσκεται σχεδόν στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Προς την κατεύθυνση κίνησης του υπόγειου νερού το βραχώδες υπόβαθρο βρίσκεται σε βάθος μέχρι και 6 μέτρα από την ελεύθερη επιφάνεια και ο υπερκείμενος εδαφικός σχηματισμός αποτελείται από άργιλο και ιλύ. Ο ρυπασμένος υδροφορέας έχει συνολικό πάχος περίπου 3.5 μέτρα.

Οι δράσεις απορρύπανσης περιλαμβάνουν μία πιλοτική δοκιμή βιοδιέγερσης διάρκειας 8 μηνών που ξεκίνησε το 2000 και αμέσως προέκυψε η αναβάθμιση σε πλήρη κλίμακα, η οποία αν και είχε θετικά αποτελέσματα τερματίστηκε το 2001 λόγω ανοικοδόμησης στην περιοχή υλοποίησης, η οποία ήταν η εστία της ρύπανσης. Το 2010 διενεργήθηκε εκ νέου πιλοτική δοκιμή στην εστία της ρύπανσης. Τότε η περιοχή υλοποίησης είχε έκταση περίπου 110 m² και η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης ήταν η βιοδιέγερση με χορηγούμενο δότη ηλεκτρονίων το γαλακτοποιημένο φυτικό λάδι (EVO). Η ρύπανση εκτεινόταν για περίπου 120 μέτρα στην κατεύθυνση κίνησης του υπόγειου νερού και οι μέγιστες συγκεντρώσεις στην εστία αφορούσαν στα cis 1,2 DCE και VC και ήταν ίσες με 8,080 μg/L και 5,140 μg/L αντίστοιχα. Κατά τα τέλη του 2010 πραγματοποιήθηκαν δύο διαδοχικές χορηγήσεις δότη (EVO) μέσω πηγαδιών ένεσης στην περιοχή υλοποίησης (CH2MHILL, 2011a). Η πιλοτική δοκιμή ολοκληρώθηκε με επιτυχία και οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθινίων σε όλα τα πηγάδια παρακολούθησης εντός της περιοχής υλοποίησης έφτασαν μέχρι και σε μη ανιχνεύσιμες τιμές σε λιγότερο από μία πενταετία και παραμένουν σε αυτά τα επίπεδα μέχρι και την τελευταία διαθέσιμη μέτρηση του 2020.

Το 2015 ξεκίνησε η εφαρμογή πλήρους κλίμακας με συνδυασμό βιοδιέγερσης (χορηγούμενος δότης το EVO το 2015), βιοεπαύξεσης (χορηγούμενος δότης το nano-EVO και μικροοργανισμοί της κοινότητας KB1-Plus το 2017) και ενδογενούς αποχλωρίωσης. Ο

εκτιμηθείς χρόνος ολοκλήρωσης της αποκατάστασης ήταν 5 έως 10 χρόνια για τις υποπεριοχές όπου η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η βιοδιέγερση και 70 χρόνια για τις υποπεριοχές όπου η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η ενδογενής αποχλωρίωση. Τα όρια αποκατάστασης είναι τα 5 µg/L για τα PCE και TCE, τα 6 µg/L για το cis 1,2 DCE και τα 0.5 µg/L για το VC (AFCEC, 2014).

Κατά τις αρχικές συνθήκες (2015) η ρύπανση εκτεινόταν σε δύο διακριτές περιοχές για περίπου 70 και 35 μέτρα αντίστοιχα. Ωστόσο επειδή η απόσταση της πρώτης διακριτής περιοχής από τη δεύτερη είναι της τάξεως των 10 μέτρων, τόσο για την αναδρομή στις αρχικές συνθήκες στην πλέον πρόσφατη μέτρηση, όσο για τον Πίνακα 4.1, θεωρείται ότι η ρύπανση εκτείνεται σε μία ενιαία περιοχή για περίπου 105 μέτρα. Η μέγιστη συγκέντρωση το 2015 ήταν ίση με 810 µg/L και αφορούσε στο cis 1,2 DCE (CH2MHILL, 2016b).

Η πρόοδος της αποκατάστασης από το 2015, όταν ξεκίνησε η εφαρμογή πλήρους κλίμακας, μέχρι και το 2020 δεν μπορεί να χαρακτηριστεί εξίσου επιτυχημένη όσο με εκείνη που σημειώθηκε κατά τη διενέργεια πιλοτικής δοκιμής το 2010. Πιο συγκεκριμένα, η ρυπασμένη έκταση με TCE του 2015 έχει μειωθεί κατά περίπου κατά 70% αλλά η μέγιστη συγκέντρωση παραμένει ίδιας τάξης μεγέθους (από τα 300 µg/L το 2015 στα 130 µg/L το 2020). Η ρυπασμένη έκταση με cis 1,2 DCE έχει σημειώσει τη μικρότερη μείωση (περίπου κατά 20%) από το 2015 στο 2020 και η μέγιστη συγκέντρωση επίσης παραμένει ίδιας τάξης μεγέθους (από τα 810 µg/L το 2015 στα 130 µg/L το 2020). Η ρυπασμένη έκταση με VC του 2015 έχει μειωθεί περίπου κατά 70% και η μέγιστη συγκέντρωση έχει μειωθεί κατά μία τάξη μεγέθους το 2020 (από τα 100 µg/L το 2015 στα 16 µg/L). Σχετικά με το PCE, στις αρχές του 2010 οι μέγιστες συγκεντρώσεις ήταν της τάξεως των 100 µg/L στην εστία της ρύπανσης. Μετά από τη χορήγηση δότη το ίδιο έτος κατά τη διενέργεια πιλοτικής δοκιμής, οι συγκεντρώσεις του πρωτογενούς ρύπου μειώθηκαν απότομα και παραμένουν σταθερά σε τιμές κάτω ή κοντά στα 5 µg/L σε όλα τα πηγάδια παρακολούθησης της περιοχής μέχρι και το 2020.

Παρά το γεγονός ότι η αξιολόγηση της προόδου γίνεται μέσω της σύγκρισης μεταξύ των αρχικών συνθηκών (2015) και της πλέον πρόσφατης μέτρησης (2020) σημειώνεται ότι στο συγκεκριμένο περιστατικό από το 2017, όταν έλαβε χώρα η χορήγηση δότη και μικροοργανισμών, δεν καταγράφηκε σημαντική πρόοδος στην περιοχή. Τόσο οι ρυπασμένες εκτάσεις, όσο και οι μέγιστες συγκεντρώσεις, παρέμειναν περίπου σταθερές και για τα τρία χλωροαιθέρια από το 2017 στο 2020.

iv) Περιστατικό ρύπανσης υπεδάφους με χλωροαιθέρια: Ρυπασμένη έκταση στην πόλη Εσπανιόλα (Española, North Railroad Avenue Plume), Νέο Μεξικό, Η.Π.Α.

Η ρυπασμένη περιοχή βόρεια της πόλης Εσπανιόλα στο Νέο Μεξικό έχει έκταση περίπου 0.17 km². Η ρύπανση του υπόγειου νερού με χλωριωμένα αιθυλένια προκλήθηκε από

στεγνοκαθαριστήριο που βρισκόταν στην περιοχή και λειτουργούσε το χρονικό διάστημα 1970-2007 (USEPA, 2015). Εκτός της περιοχής του πρώην στεγνοκαθαριστηρίου, θεωρείται πιθανό το ενδεχόμενο ύπαρξης μίας ακόμη πηγής ρύπανσης περίπου 150 μέτρα κατάντη, αφού από το 2012 και έπειτα ξεκίνησαν να καταγράφονται σταθερά αυξητικές τάσεις για τις συγκεντρώσεις των πρωτογενών χλωροαιθινίων σε πηγάδια παρακολούθησης τα οποία προηγουμένως είχαν χαμηλές συγκεντρώσεις των ρύπων αυτών. Η σχετική έρευνα βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη (USEPA, 2020).

Η ιδιαιτερότητα του περιστατικού αυτού έγκειται στην παρουσία DNAPL στην πηγή της ρύπανσης, αλλά και στο μεγάλο βάθος της ρύπανσης που φτάνει μέχρι και τα 80 μέτρα από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Οι ρυπασμένοι υδροφορείς είναι δύο, ο ρηχός και ο βαθύς. Η ρηχός υδροφορέας έχει πάχος περίπου 3 μέτρα και αποτελείται από αμμοχάλικο. Ο βαθύς υδροφορέας χωρίζεται σε τέσσερις διαφορετικές στρώσεις, δύο ενδιάμεσες (ενδιάμεση στρώση 1 και 2) και δύο βαθύτερες (βαθεία στρώση 1 και 2), αποτελούμενες από λεπτόκοκκη άμμο με προσμίξεις ιλύος. Οι δύο ενδιάμεσες στρώσεις έχουν πάχος 15 μέτρα η κάθε μία και οι δύο βαθιές έχουν πάχος 14 και 11 μέτρα αντιστοίχως. Μετάξύ της ρηχής στρώσης και των βαθύτερων παρεμβάλλεται στρώμα αμμόδους αργίλου και αργίλου με ιλύ το οποίο δεν είναι συνεχόμενο πλευρικά της πηγής ρύπανσης.

Οι δράσεις απορρύπανσης περιλαμβάνουν μια πιλοτική δοκιμή βιοδιέγερσης που ξεκίνησε το 2007 και διήρκεσε περίπου επτά μήνες. Διάφοροι δότες ηλεκτρονίων (EVO, γαλακτικός αιθελεστέρας, ορός τυρογάλακτος και μείγμα EVO και αέριου υδρογόνου) χορηγήθηκαν στη ρηχή στρώση μέσω τεσσάρων διαφορετικών συστημάτων επανακυκλοφορίας νερού αποτελούμενα από ένα πηγάδι ένεσης και ένα άντλησης το καθένα. Το ένα σύστημα εξ αυτών βρισκόταν στην πηγή της ρύπανσης και τα υπόλοιπα 3 βρισκόντουσαν 40-70 μέτρα κατάντη αυτής (περιοχή επονομαζόμενη ως Hotspot). Σκοπός της πιλοτικής δοκιμής ήταν η επιλογή του καταλληλότερου δότη και η χορήγησή του κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας τόσο στη ρηχή όσο και στις βαθύτερες στρώσεις (Guerra et al., 2021).

Η εφαρμογή πλήρους κλίμακας του συγκεκριμένου περιστατικού ξεκίνησε τον Απρίλιο του 2008. Ωστόσο για τη ρηχή στρώση και συγκεκριμένα για τα πηγάδια παρακολούθησης της πηγής και της περιοχής αμέσως κατάντη αυτής (Hotspot) δεν είναι διαθέσιμες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διενέργεια της πιλοτικής δοκιμής ή αμέσως πριν από την έναρξη της εφαρμογής πλήρους κλίμακας. Για το λόγο αυτό οι μέγιστες συγκεντρώσεις που αναφέρονται παρακάτω και παρατίθενται στον Πίνακα 4.1 αφορούν στις δειγματοληψίες που πραγματοποιήθηκαν το 2007 και οι οποίες στις αναφορές προόδου του περιστατικού αναφέρονται ως οι μετρήσεις που αντιστοιχούν στις αρχικές συνθήκες (Baseline Sampling). Το 2007 η ρύπανση στη ρηχή στρώση εκτεινόταν για περίπου 800 μέτρα στην κατεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού, ενώ η ρύπανση στις δύο ενδιάμεσες

και στις δύο βαθιές στρώσεις εκτεινόταν για περίπου 350-400 μέτρα στην κατεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού. Ο ρύπος με τις μέγιστες συγκεντρώσεις σε όλες τις στρώσεις είναι το PCE, γεγονός που αποτελεί ένδειξη καινούργιας ρύπανσης. Στη ρηχή στρώση η μέγιστη συγκέντρωση ήταν ίση με 65,000 µg/L. Στις ενδιάμεσες στρώσεις 1 και 2 οι μέγιστες συγκεντρώσεις ήταν ίσες με 26 µg/L και 48 µg/L αντίστοιχα, ενώ στις βαθιές στρώσεις 1 και 2 οι μέγιστες συγκεντρώσεις ήταν ίσες με 750 µg/L και 530 µg/L αντίστοιχα (USEPA, 2015).

Το 2008 ξεκίνησε η εφαρμογή πλήρους κλίμακας με μέθοδο αποκατάστασης τη βιοδιέγερση και χορηγούμενους δότες ηλεκτρονίων το γαλακτοποιημένο φυτικό λάδι και το γαλακτικό αιθυλεστέρα. Ο εκτιμηθείς χρόνος ολοκλήρωσης της αποκατάστασης είναι 30 χρόνια και τα όρια αποκατάστασης είναι τα 5 µg/L για τα PCE και TCE, τα 70 µg/L για το cis 1,2 DCE και τα 2 µg/L για το VC (USEPA, 2015).

Σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες διαθέσιμες μετρήσεις του 2019, η πρόοδος της αποκατάστασης κρίνεται ως μετρίως πετυχημένη. Σχετικά με τη ρηχή στρώση, η ρυπασμένη περιοχή το 2019 έχει αποκατασταθεί πλήρως με εξαίρεση τις περιοχές της πηγής ρύπανσης και Hotspot, στις οποίες η μέγιστη συγκέντρωση είναι πλέον ίση με 10,000 µg/L και αφορά στο cis 1,2 DCE (το 2007 ήταν ίση με 65,000 µg/L και αφορούσε στο PCE). Επισημαίνεται ότι στη ρυπασμένη έκταση της ρηχής στρώσης το 2019 που παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1 δεν συνυπολογίζεται η ρυπασμένη περιοχή που ανακαλύφθηκε πρόσφατα και για την όποια η έρευνα είναι ακόμα σε εξέλιξη. Στις δύο ενδιάμεσες στρώσεις, τα πηγάδια ένεσης δότη ήταν αρχικώς εγκατεστημένα εκτός των περιοχών με τις μέγιστες συγκεντρώσεις χλωροαιθινίων λόγω λανθασμένης εκτίμησης των ρυπασμένων περιοχών στις στρώσεις αυτές. Κατά το χρονικό διάστημα 2009-2019 δεν έχει πραγματοποιηθεί καμία νέα ενέργεια με σκοπό την αποκατάσταση του ρυπασμένου υπόγειου νερού στις ενδιάμεσες στρώσεις, γι' αυτό και δεν αναφέρονται στον Πίνακα 4.1. Στις δύο βαθύτερες στρώσεις, αν και τα πηγάδια ένεσης δότη είναι εγκατεστημένα εντός των περιοχών με τις μέγιστες συγκεντρώσεις χλωροαιθινίων, η πρόοδος που έχει σημειωθεί δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η ρυπασμένη περιοχή της βαθιάς στρώσης 1 το 2019 έχει παραμείνει περίπου σταθερή και με ίδια τάξη μεγέθους μέγιστες συγκεντρώσεις (από τα 750 µg/L το 2007 στα 310 µg/L το 2019 για το PCE). Η ρυπασμένη περιοχή της βαθιάς στρώσης 2 το 2019 έχει παραμείνει επίσης σχεδόν σταθερή αλλά οι μέγιστες συγκεντρώσεις έχουν σημειώσει μείωση κατά μία τάξη μεγέθους (από τα 530 µg/L το 2007 στα 85 µg/L το 2019 για το PCE).

v) Περιστατικό ρύπανσης υπεδάφους με χλωροαιθίνια: Πρώην Εγκατάσταση 87 (Former Facility 87), Πρώην Αεροπορική Βάση Νιούαρκ (Former Newark Air Force Base), Οχάιο, Η.Π.Α.

Η πρώην Αεροπορική Βάση Νιούαρκ βρίσκεται στην πολιτεία Οχάιο της Αμερικής και παρέμεινε ενεργή κατά το χρονικό διάστημα 1950-1990. Το συγκεκριμένο περιστατικό

εστιάζει στην Πρώην Εγκατάσταση 87 η οποία χρησιμοποιείτο με σκοπό την αποθήκευση επικίνδυνων υλικών κατά τα έτη 1977-1996 και ήταν ρυπασμένη κυρίως με χλωριωμένα αιθυλένια (IT, 2001).

Ο ρυπασμένος υδροφορέας έχει συνολικό πάχος περίπου 4 μέτρα και αποτελείται από ιλύδη άμμο και άμμο με προσμίξεις χαλκιού. Κατά τις πρότερες συνθήκες (2000) η ρύπανση εκτεινόταν για περίπου 30 μέτρα στην κατεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού και οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθινίων ήταν μεγαλύτερες των ορίων αποκατάστασης σε μόνο δύο πηγάδια παρακολούθησης. Πιο συγκεκριμένα, στα δύο αυτά πηγάδια οι μέγιστες συγκεντρώσεις ήταν ίσες με 1,200 µg/L και 150 µg/L αντίστοιχα και αμφότερες αφορούσαν στο PCE (Parsons, 2007).

Οι δράσεις απορρύπανσης περιλαμβάνουν μία εκσκαφή και αφαίρεση εδάφους το 1991 και την εφαρμογή βιοδιέγερσης πλήρους κλίμακας κατά το χρονικό διάστημα 2001-2008 με χορηγούμενο δότη ηλεκτρονίων το γαλακτοποιημένο φυτικό λάδι (EVO). Τα όρια αποκατάστασης για τα PCE και TCE ήταν τα 5 µg/L, για το cis 1,2 DCE τα 20 µg/L και για το VC τα 2 µg/L. Λόγω ενδείξεων ότι η διαρροή στην περιοχή δεν έχει σταματήσει, κατά τα τέλη του 2008 πραγματοποιήθηκε μία ακόμη εκσκαφή και αφαίρεση εδάφους. Έκτοτε η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης ήταν η ενδογενής αποχλωρίωση. Τα όρια της αποκατάστασης επιτεύχθηκαν και το 2015 η αποκατάσταση του χώρου ολοκληρώθηκε.

Όσον αφορά στην εφαρμογή της βιοδιέγερσης σε πλήρη κλίμακα, η πρόοδος που σημειώθηκε δεν ήταν η αναμενόμενη, αφού αν και καταγράφηκε μείωση των μέγιστων συγκεντρώσεων, δεν προσεγγίστηκαν οι συγκεντρώσεις-στόχοι. Έπειτα από την πρώτη χορήγηση δότη το 2001 η ρυπασμένη περιοχή είχε παραμείνει σχεδόν σταθερή και με ίδια τάξη μεγέθους συγκεντρώσεις, αφού στο ένα πηγάδι είχε σημειωθεί μείωση της μέγιστης συγκέντρωσης κατά δύο τάξεις μεγέθους για το PCE (από τα 150 µg/L το 2000 στο 1 µg/L το 2003), αλλά στο άλλο η μέγιστη συγκέντρωση είχε παραμείνει σταθερή. Τότε πραγματοποιήθηκε ένας ακόμη γύρος χορήγησης δότη στην τοποθεσία του πηγαδιού αυτού, αφού θεωρήθηκε πως κατά πάσα πιθανότητα ο δότης τελικώς δεν την προσέγγισε (Parsons, 2007). Παρά το γεγονός ότι το 2008 σημειώθηκε μείωση της συγκέντρωσης PCE κατά μία τάξη μεγέθους (από τα 1,200 µg/L το 2003 στα 150 µg/L το 2008), η συγκέντρωση cis 1,2 DCE αμέσως μετά από τη δεύτερη χορήγηση δότη ξεκίνησε να έχει αυξητικές τάσεις, φθάνοντας τα 500 µg/L το 2008 από τα 150 µg/L το 2003 (Parsons, 2009).

Εφόσον υπήρχαν ενδείξεις ότι στην εγγύς περιοχή αυτού του πηγαδιού παρακολούθησης η διαρροή PCE δεν έχει σταματήσει και ο ρύπος κινείται από την ακόρεστη ζώνη του εδάφους στον υδροφορέα κατά τις εποχιακές διακυμάνσεις της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, αλλά ενδεχομένως και λόγω της μικρής ρυπασμένης έκτασης στην περιοχή, το 2008 πραγματοποιήθηκε εκσκαφή και αφαίρεση του άμεσα υποκείμενου εδάφους της εγκατάστασης βάθους περίπου 5 μέτρων. Η εκσκαφή προφανώς και επιτάχυνε κατά πολύ το

ρυθμό της αποκατάστασης του υπόγειου νερού. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις στο υπόγειο νερό μετά από την εκσκαφή αφορούσαν στο cis 1,2 DCE και ήταν της τάξεως των 70 µg/L, ενώ οι συγκεντρώσεις των πρωτογενών χλωροαιθινίων ήταν της τάξεως του 1 µg/L και παρέμειναν σε αυτή την τιμή μέχρι και την ολοκλήρωση της αποκατάστασης. Τα όρια αποκατάστασης για τα cis 1,2 DCE και VC είχαν επιτευχθεί στην περιοχή ήδη από τα τέλη του 2013 και το 2015 η αποκατάσταση του χώρου ολοκληρώθηκε.

4.4. Πινακοποίηση περιστατικών και συγκριτικός σχολιασμός

Ακολούθως παρατίθεται ο Πίνακας 4.1 στον οποίο παρουσιάζεται συνοπτικά η πρόοδος της αποκατάστασης στα πέντε περιστατικά, εκφρασμένης ως αλλαγή στην εξάπλωση της ρυπασμένης περιοχής και αλλαγή στις μέγιστες συγκεντρώσεις. Για κάθε περιστατικό δίνεται η διάρκεια παρακολούθησης, το είδος του εδαφικού ή βραχώδους υδροφορέα, το πάχος και το βάθος του υδροφορέα, καθώς και το συνολικό πλήθος των πηγαδιών παρακολούθησης.

Όλοι οι ρυπασμένοι χώροι έχουν περατούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Επιπλέον σε τέσσερις από τους ρυπασμένους χώρους το βάθος της ρύπανσης είναι μικρό (μικρότερο των 15 μέτρων) με εξαίρεση το περιστατικό της πόλης Εσπανιόλα όπου το βάθος της ρύπανσης φθάνει μέχρι και τα 80 μέτρα από την ελεύθερη επιφάνεια.

Κανένα περιστατικό δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως αμιγώς επιτυχές, δηλαδή σε κανένα περιστατικό κατά την εξέλιξη της εφαρμογής πλήρους κλίμακας δεν μειώνονται συστηματικά σε όλους τους επιμέρους υδροφορείς τόσο οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθινίων, όσο και οι ρυπασμένες εκτάσεις. Στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ καταγράφεται ταυτόχρονη μείωση των συγκεντρώσεων και της ρυπασμένης έκτασης και στις δύο στρώσεις στην πλέον πρόσφατη μέτρηση, ωστόσο η μείωση αυτή δεν είναι συστηματική αφού στο συγκεκριμένο περιστατικό από το 2017 και έπειτα σε ορισμένα πηγάδια παρακολούθησης οι συγκεντρώσεις επανήλθαν σε αυξημένες τιμές από χαμηλά επίπεδα.

Η διαπιστωμένη ύπαρξη DNAPL στο περιστατικό ρύπανσης της πόλης Εσπανιόλα στη ρηχή στρώση του υδροφορέα συμπίπτει με μειωμένη επιτυχία. Επίσης μεγαλύτερο βάθος μοιάζει να συμπίπτει με μειωμένη επιτυχία, αλλά εφόσον το περιστατικό ρύπανσης στην πόλη Εσπανιόλα είναι το μόνο με μεγάλο βάθος ρύπανσης, το συμπέρασμα αυτό ενδεχομένως να είναι εν μέρει αποτέλεσμα της ύπαρξης DNAPL στη ρηχή στρώση του υδροφορέα.

Πίνακας 4.1 Επιλεγμένα δεδομένα για τις εφαρμογές πλήρους κλίμακας και την πρόοδο της αποχλωρίωσης

Ρυπασμένος χώρος	Διάρκεια παρακολούθησης ¹	Ρυπασμένη έκταση (m)		Εδαφικός-Βραχώδης σχηματισμός	Υδροφορέας		Μέγιστες συγκεντρώσεις (μg/L) Αρχικές → Τελικές συνθήκες ¹	Πλήθος πηγαδιών παρακολούθησης
		Αρχικές	Τελικές συνθήκες ¹		Μέσο πάχος υδροφορέα (m)	Μέση απόσταση από Ε.Ε. ³ (m)		
Περιοχή 6, Αεροπορική Βάση Ντόβερ Ντέλαγουερ, Η.Π.Α.	2006-2020	Ρηχή στρώση	(1) 405 → 180 (2) 170 → 90 (3) 215 → 0	Άμμος με ιλύ και φακούς αργίλου	4	3.5	(1) 16,600 (cDCE) → 5,290 (cDCE) (2) 710 (TCE) → 23 (VC) (3) 280 (TCE) → 3 (cDCE)	15
		Βαθεία στρώση	2,000 → 2,000		7.5	7.5	9,300 (cDCE) → 1,210 (cDCE)	24
Περιοχή 5, Αεροπορική Βάση Ντόβερ Ντέλαγουερ, Η.Π.Α.	2006-2020	Ρηχή στρώση	(1) 270 → 110 (2) 70 → 30 (3) 30 → 0 (4) 30 → 0	Άμμος με ιλύ και φακούς αργίλου	4	3.5	(1) 3,800 (VC) → 631 (cDCE) (2) 4,700 (PCE) → 19.9 (VC) (3) 210 (PCE) → 1.2 (VC) (4) 90 (cDCE) → MA ⁴	11
		Βαθεία στρώση	900 → 530		7.5	7.5	1,400 (PCE) → 563 (cDCE)	16
Περιοχή SS015, Αεροπορική Βάση Τράβις Καλιφόρνια, Η.Π.Α.	2015-2020		105 → 80	Ψαμμίτης	3.4	2.6	810 (cDCE) → 130 (TCE & cDCE)	5
Ρυπασμένη έκταση στην πόλη Εσπανιόλα Νέο Μεξικό, Η.Π.Α. (Διαπιστωμένη ύπαρξη DNAPL)	2008-2019	Ρηχή στρώση (Διαπιστωμένη ύπαρξη DNAPL)	800 ⁵ → 80	Αμμοχάλικο	3	3	65,000 (PCE) ⁵ → 10,000 (cDCE)	37
		Βαθεία στρώση 1	350 ⁵ → 380	Λεπτόκοκκη άμμος με ιλύ	14	47	750 (PCE) ⁵ → 310 (PCE)	7
		Βαθεία στρώση 2	400 ⁵ → 420	Λεπτόκοκκη άμμος με ιλύ	11	69	530 (PCE) ⁵ → 85.3 (PCE)	6
Πρώην Εγκατάσταση 87, Πρώην Αεροπορική Βάση Νιούαρκ Οχάιο, Η.Π.Α.	2001-2008		30 → 30	Ιλύδης άμμος με χαλίκι	4	3.5	1,200 (PCE) → 500 (cDCE)	2

Σημειώσεις: ¹ το τέλος της διάρκειας παρακολούθησης καθώς και οι τελικές συνθήκες αντιστοιχούν στην πλέον πρόσφατη μέτρηση

² η αρίθμηση n = 1, 2, ... N δηλώνει περισσότερες από μία διακριτές ρυπασμένες περιοχές

³ επιφάνεια εδάφους

⁴ μη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση

⁵ η έκταση της ρύπανσης και οι τιμές των μέγιστων συγκεντρώσεων κατά τις αρχικές συνθήκες αντιστοιχούν στη δειγματοληψία του 2007

Κεφάλαιο 5 - Επεξεργασία δεδομένων

5.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν για το δείγμα των περιστατικών αποχλωρίωσης. Απώτερος σκοπός της επεξεργασίας είναι η περιγραφή της επίδοσης της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης στο πεδίο. Τα κληνητήρια ερωτήματα που διαμορφώθηκαν κατηύθυναν τη διαδικασία της επεξεργασίας· κάποια ερωτήματα προϋπήρχαν ήδη από την έναρξη της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, άλλα προέκυψαν αφού είχε ολοκληρωθεί η συλλογή των δεδομένων από τις αναφορές προόδου των πέντε περιστατικών.

Αρχικώς τίθεται το εύλογο ερώτημα που αφορά στο πλήθος των χορηγήσεων δότη ή και μικροοργανισμών που πραγματοποιούνται σε ένα ρυπασμένο χώρο με σκοπό την καταγραφή αξιολογής προόδου σε αυτόν και την αποκατάσταση του υπόγειου νερού. Επιπλέον, αφού η εξοικείωση με τις μετρήσεις πεδίου έχει οδηγήσει στην κατηγοριοποίηση των συμπεριφορών των πηγαδιών παρακολούθησης, τίθεται το ερώτημα που αφορά στον τρόπο με τον οποίο μπορούν αυτές να συμβάλουν στην αξιολόγηση της μεθόδου στο πεδίο. Το ίδιο ερώτημα τίθεται και για τους υπολογισθέντες χρόνους ημιζωής. Γι' αυτά τα ερωτήματα αναζητήθηκαν τόσο ποιοτικές όσο και ποσοτικές απαντήσεις. Για τον λόγο αυτό, (α) προσδιορίστηκε η συχνότητα καταγραφής της κάθε συμπεριφοράς και (β) υπολογίστηκαν οι χρόνοι ημιζωής των χλωροαιθινίων για ένα υποσύνολο των πηγαδιών παρακολούθησης του εκάστοτε ρυπασμένου χώρου. Παρακάτω αναλύεται η συχνότητα καταγραφής, εκφρασμένη ως ποσοστό, των τεσσάρων κατηγοριών συμπεριφοράς για κάθε ένα από τα πέντε περιστατικά αποχλωρίωσης. Ο Πίνακας 5.1 συνοψίζει αυτήν την πληροφορία για τα πέντε περιστατικά, μαζί με πληροφορία για την διάρκεια παρακολούθησης, τον τύπο της εφαρμοζόμενης αποκατάστασης, το πλήθος πηγαδιών παρακολούθησης και το πλήθος των χορηγήσεων δότη/μικροοργανισμών. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι τιμές των χρόνων ημιζωής που υπολογίστηκαν στο δείγμα των πέντε περιστατικών αποχλωρίωσης και σε δεύτερη φάση συγκρίνονται με τους αντίστοιχους της ενδογενούς και της ενισχυμένης αποχλωρίωσης στη βιβλιογραφία από ερευνητικές μελέτες στο πεδίο (Πίνακες 5.3 και 5.4).

5.2. Καταγεγραμμένες συμπεριφορές

Στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ το πλήθος των πηγαδιών παρακολούθησης στη ρηχή στρώση είναι 15 και στη βαθειά 24. Στη ρηχή στρώση το μεγαλύτερο ποσοστό των πηγαδιών είχε συμπεριφορά υποτροπή (46.7%), ενώ μόλις ένα πηγάδι παρακολούθησης είχε

συμπεριφορά στασιμότητα και βρισκόταν στην εστία της ρύπανσης με μέγιστες συγκεντρώσεις της τάξεως των 16,600 $\mu\text{g/L}$ (cDCE) κατά τις αρχικές συνθήκες της εφαρμογής πλήρους κλίμακας. Αντίθετα, στη βαθειά στρώση περισσότερο από τα μισά πηγάδια δειγματοληψίας είχαν συμπεριφορά πρόοδο. Οι τρεις περιπτώσεις πηγαδιών παρακολούθησης με συμπεριφορά στασιμότητα αφορούν σε πηγάδια μακριά από την εστία της ρύπανσης, στην περιοχή των οποίων το μείγμα δοτών εισπιάστηκε μόνο μία φορά στη βαθειά στρώση κατά την έναρξη της εφαρμογής το 2006 και έκτοτε δεν πραγματοποιήθηκε καμία επαναληπτική χορήγηση. Επίσης, σημειώνεται ότι σε έξι από τα 11 συνολικά πηγάδια δειγματοληψίας με συμπεριφορά υποτροπή πραγματοποιήθηκε επαναληπτική χορήγηση δότη μετά από την αύξηση των συγκεντρώσεων των χλωροαιθενίων και σε πέντε από αυτά καταγράφηκε επαναφορά σε χαμηλές τιμές συγκεντρώσεων. Το πλήθος χορηγήσεων δότη κυμαίνεται εντός του εύρους 1-13. Στον συγκεκριμένο χώρο πραγματοποιήθηκαν οι περισσότερες χορηγήσεις. Ταυτόχρονα ήταν ο μόνος χώρος στον οποίο φαίνεται να δοκιμάστηκε η αποκατάσταση του υπόγειου νερού με μόνο μία χορήγηση δότη, με σχετική αποτυχία τελικά: μόνο δύο από τα πέντε πηγάδια είχαν συμπεριφορά πρόοδο μετά από μία μόνο χορήγηση δότη.

Στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ το πλήθος των πηγαδιών παρακολούθησης στη ρηχή στρώση είναι 11 και στη βαθειά 16. Στη ρηχή στρώση, επτά από τα 11 πηγάδια παρακολούθησης είχαν συμπεριφορά πρόοδο, ενώ μόλις ένα είχε συμπεριφορά στασιμότητα και βρισκόταν στην εστία της ρύπανσης με μέγιστες συγκεντρώσεις της τάξεως των 2,590 $\mu\text{g/L}$ (cDCE) κατά τις αρχικές συνθήκες. Αντίθετα, στη βαθειά στρώση η υποτροπή ήταν ποσοστιαία μεγαλύτερη από τη ρηχή, με το 50% των πηγαδιών παρακολούθησης να εμφανίζει τη συμπεριφορά αυτή. Σε πέντε από τα 11 συνολικά πηγάδια δειγματοληψίας με συμπεριφορά υποτροπή πραγματοποιήθηκε επαναληπτική χορήγηση δότη μετά από την αύξηση των συγκεντρώσεων των χλωροαιθενίων και σε όλα καταγράφηκε επαναφορά των συγκεντρώσεων σε χαμηλές τιμές. Το πλήθος χορηγήσεων του μείγματος δοτών κυμαίνεται εντός του εύρους 5-9.

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις η εστία της ρύπανσης αποκαταστάθηκε πλήρως κατά τη διενέργεια της πιλοτικής δοκιμής. Το πλήθος των πηγαδιών παρακολούθησης κατά την εξέλιξη της εφαρμογής πλήρους κλίμακας είναι πέντε και ένα εξ αυτών είναι πηγάδι παρακολούθησης που βρισκόταν στην εστία της ρύπανσης, για το οποίο οι μετρήσεις συνεχίστηκαν και κατά την εξέλιξη της εφαρμογής πλήρους κλίμακας. Το συγκεκριμένο πηγάδι και ακόμη ένα που βρίσκεται μακριά από την εστία είχαν συμπεριφορά πρόοδο, ενώ τα υπόλοιπα τρία είχαν συμπεριφορά στασιμότητα. Στην εφαρμογή πλήρους κλίμακας στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις, το πλήθος χορηγήσεων δότη είναι 2-3 και σε τέσσερα από τα πέντε πηγάδια παρακολούθησης πραγματοποιήθηκε και μία προσθήκη μικροοργανισμών.

Στη ρηχή στρώση του υδροφορέα στην πόλη Εσπανιόλα το πλήθος των πηγαδιών παρακολούθησης είναι 37. Εξ αυτών τα 31 είχαν συμπεριφορά πρόοδο, ενώ τα υπόλοιπα έξι είχαν συμπεριφορά υποτροπή. Από τα έξι πηγάδια με συμπεριφορά υποτροπή, τα τέσσερα βρίσκονται εντός της εστίας της ρύπανσης και τα άλλα δύο βρίσκονται κοντά και μακριά από αυτήν αντίστοιχα. Σε πέντε από τα έξι συνολικά πηγάδια δειγματοληψίας της ρηχής στρώσης με συμπεριφορά υποτροπή πραγματοποιήθηκε επαναληπτική χορήγηση δότη μετά από την αύξηση των συγκεντρώσεων των χλωροαιθενίων και σε μόλις δύο εξ αυτών καταγράφηκε επαναφορά σε χαμηλές τιμές συγκεντρώσεων. Στη ρηχή στρώση πραγματοποιήθηκαν 6-8 χορηγήσεις δότη. Στις βαθύτερες στρώσεις 1 και 2 η συντριπτική πλειοψηφία των πηγαδιών είχε συμπεριφορά στασιμότητα (έξι στα συνολικά επτά πηγάδια παρακολούθησης για τη βαθιά στρώση 1 και πέντε στα έξι πηγάδια παρακολούθησης για τη βαθιά στρώση 2 είχαν τη συμπεριφορά αυτή). Στις βαθιές στρώσεις πραγματοποιήθηκαν πέντε χορηγήσεις δότη.

Στην εγκατάσταση 87 της Πρώην Αεροπορικής Βάσης Νιούαρκ τα πηγάδια παρακολούθησης ήταν δύο. Εξ αυτών το ένα είχε συμπεριφορά πρόοδο και το άλλο είχε συμπεριφορά στασιμότητα. Στην περιοχή πραγματοποιήθηκαν δύο χορηγήσεις δότη.

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζεται το πλήθος των πηγαδιών παρακολούθησης ανά συμπεριφορά για τα πέντε περιστατικά αποχλωρίωσης μαζί με τη διάρκεια παρακολούθησης και το πλήθος των χορηγήσεων δότη ή/και μικροοργανισμών που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε χώρο. Για περιπτώσεις ρυπασμένων χώρων με περισσότερα από 10 πηγάδια παρακολούθησης, η παρουσίαση γίνεται και υπό την μορφή ποσοστού. Επισημαίνεται ότι για τις περιπτώσεις χώρων με περισσότερες από μία ρυπασμένες στρώσεις (Περιοχές 6 και 5 της Βάσης Ντόβερ και περιστατικό ρύπανσης στην πόλη Εσπανιόλα), τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.1 αφορούν σε όλους τους επιμέρους υδροφορείς.

Πίνακας 5.1 Καταγραφή τάσεων συμπεριφοράς στις εφαρμογές πλήρους κλίμακας των πέντε περιστατικών αποχλωρίωσης

Ρυπασμένος χώρος	Διάρκεια παρακολούθησης ¹	Εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης	Πλήθος πηγαδιών παρακολούθησης	Πλήθος χορηγήσεων δότη ή/και μικ/μωv ²	Πλήθος πηγαδιών παρακολούθησης ανά συμπεριφορά			
					Πρόοδος	Υποτροπή	Υστέρηση	Στασιμότητα
Περιοχή 6, Αεροπορική Βάση Ντόβερ Ντέλαγουερ, Η.Π.Α.	2006-2020	Βιοδιέγερση	39	1-13	19 (48.7%)	11 (28.2%)	5 (12.8%)	4 (10.3%)
Περιοχή 5, Αεροπορική Βάση Ντόβερ Ντέλαγουερ, Η.Π.Α.	2006-2020	Βιοδιέγερση	27	5-9	14 (51.9%)	11 (40.7%)	1 (3.7%)	1 (3.7%)
Περιοχή SS015, Αεροπορική Βάση Τράβις Καλιφόρνια, Η.Π.Α.	2015-2020	Βιοεπαύξηση	5	2-4	2	-	-	3
Ρυπασμένη έκταση στην πόλη Εσπανιόλα Νέο Μεξικό, Η.Π.Α. (Διαπιστωμένη ύπαρξη DNAPL)	2008-2019	Βιοδιέγερση	50	5-8	33 (66%)	6 (12%)	-	11 (22%)
Πρώην Εγκατάσταση 87, Πρώην Αεροπορική Βάση Νιούαρκ Οχάιο, Η.Π.Α.	2001-2008	Βιοδιέγερση	2	2	1	-	-	1

Σημειώσεις:

¹ το τέλος της διάρκειας παρακολούθησης αντιστοιχεί στην πλέον πρόσφατη μέτρηση

² αφορά στο πλήθος χορηγήσεων δότη ή και μικροοργανισμών που έχουν πραγματοποιηθεί από την έναρξη της εφαρμογής πλήρους κλίμακας έως και την πλέον πρόσφατη μέτρηση

5.3. Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής

Για τον υπολογισμό των χρόνων ημιζωής των χλωροαιθενίων απομονώθηκε ένα υποσύνολο των πηγαδιών παρακολούθησης του εκάστοτε ρυπασμένου χώρου. Το υποσύνολο αυτό αποτελείται από πηγάδια παρακολούθησης με όλες τις καταγεγραμμένες συμπεριφορές, ώστε να είναι σχετικά αντιπροσωπευτικό του συνολικού πλήθους πηγαδιών παρακολούθησης. Το σκεπτικό χάραξης της γραμμικής προσέγγισης των χρονοσειρών έχει ήδη αναλυθεί στο Κεφάλαιο 3.

Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι χρόνοι ημιζωής των χλωροαιθενίων στο δείγμα των περιστατικών αποχλωρίωσης. Για τις περιπτώσεις πηγαδιών παρακολούθησης με συμπεριφορά στασιμότητα, οι υπολογισθέντες χρόνοι ημιζωής για όλα τα χλωροαιθένια προέκυψαν οι μέγιστοι, γεγονός το οποίο κρίνεται ως αναμενόμενο. Τα πηγάδια με αυτή τη συμπεριφορά παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2 ξεχωριστά από τους υπολογισμούς που αφορούν σε πηγάδια με συμπεριφορά πρόοδο, υποτροπή και υστέρηση, ώστε ο αναγνώστης να έχει μία ιδέα για τις αποκλίσεις που προκύπτουν. Ο τρόπος χάραξης της γραμμικής προσέγγισης κάθε χρονοσειράς συνέβαλε στο να υπολογιστούν χρόνοι ημιζωής με σχετικά μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους στα πηγάδια δειγματοληψίας με συμπεριφορά πρόοδο, υποτροπή και υστέρηση. Έτσι, οι υπολογισθέντες χρόνοι ημιζωής παρουσιάζονται συλλογικά για πηγάδια με τις συμπεριφορές αυτές υπό τη μορφή εύρους (ελάχιστη-μέγιστη τιμή) ανά χλωροαιθένιο. Υπό τη μορφή εύρους παρουσιάζεται και το πλήθος των χορηγήσεων δότη ή και μικροοργανισμών, αλλά και οι δειγματοληψίες που πραγματοποιήθηκαν στο υποσύνολο των πηγαδιών παρακολούθησης των οποίων οι χρονοσειρές αξιοποιήθηκαν με σκοπό τον υπολογισμό των χρόνων ημιζωής των χλωροαιθενίων. Οι γραμμικές προσεγγίσεις των χρονοσειρών όλων των περιστατικών αποχλωρίωσης παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

Πίνακας 5.2. Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής στο δείγμα των πέντε περιστατικών αποχλωρίωσης

Ρυπασμένος χώρος	Εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης	Πλήθος πηγαδιών ¹	Εύρος δειγματοληψιών ¹	Εύρος πλήθους χορηγήσεων δότη ή/και μικ/μων ¹	Πλήθος πηγαδιών ανά συμπεριφορά ¹	T _{1/2} - PCE (έτη)	T _{1/2} - TCE (έτη)	T _{1/2} - cDCE (έτη)	T _{1/2} - VC (έτη)
Περιοχή 6, Αεροπορική Βάση Ντόβερ Ντέλαγουερ, Η.Π.Α.	Βιοδιέγερση	8	26 - 34	1-13	Πρόοδος: 3 Υποτροπή: 4 Υστέρηση: 1	0.3 - 1.35	0.3 - 1.37	0.52 - 1.59	0.71 - 2.46
Περιοχή 5, Αεροπορική Βάση Ντόβερ Ντέλαγουερ, Η.Π.Α.	Βιοδιέγερση	7	28 - 30	5-8	Πρόοδος: 5 Υποτροπή: 1 Στασιμότητα: 1	0.69 - 0.84 MA ²	0.84 - 1.33 2.59	0.85 - 2.06 4.01	0.87 - 2.33 4.38
Περιοχή SS015, Αεροπορική Βάση Τράβις Καλιφόρνια, Η.Π.Α.	Βιοεπαύξηση	3	10 - 17	2-3	Πρόοδος: 2 Στασιμότητα: 1	0.17 - 1.21 1.96	0.17 - 1.26 1.96	0.95 - 1.26 3.09	0.95 - 1.42 3.88
Ρυπασμένη έκταση στην πόλη Εσπανιόλα Νέο Μεξικό, Η.Π.Α. (Διαπιστωμένη ύπαρξη DNAPL)	Βιοδιέγερση	9	9 - 18	4-8	Πρόοδος: 8 Στασιμότητα: 1	0.22 - 1.54 4.07	0.25 - 1.61 4.81	0.25 - 1.88 25.11	0.66 - 2.36 30.4
Πρώην Εγκατάσταση 87, Πρώην Αεροπορική Βάση Νιούαρκ Οχάιο, Η.Π.Α.	Βιοδιέγερση	2	31	2	Πρόοδος: 1 Στασιμότητα: 1	0.53 1.51	0.55 2.78	1.21 2.95	1.85 3.06

Σημειώσεις: ¹ τα δεδομένα αφορούν αποκλειστικά στο δείγμα των πηγαδιών παρακολούθησης που αξιοποιήθηκε για τον υπολογισμό των τιμών των χρόνων ημιζωής

5.3.1. Σχολιασμός

Σε όλα τα πηγάδια παρακολούθησης των οποίων οι χρονοσειρές αξιοποιήθηκαν με σκοπό τον υπολογισμό των χρόνων ημιζωής των χλωροαιθενίων επαναλήφθηκε η προσθήκη δότη, ενώ στην περίπτωση της Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις πραγματοποιήθηκε και μία προσθήκη μικροοργανισμών. Η μέγιστη συχνότητα προσθήκης, υπολογισμένη ως ο λόγος της διάρκειας παρακολούθησης της εφαρμογής πλήρους κλίμακας προς το μέγιστο πλήθος χορηγήσεων δότη, κυμάνθηκε μεταξύ κάθε περίπου 1 έτος (για την Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ) και κάθε περίπου 3.5 χρόνια (για την εγκατάσταση 87 της πρώην Βάσης Νιούαρκ).

Αγνοώντας τις υπολογισθείσες τιμές για πηγάδια παρακολούθησης με συμπεριφορά στασιμότητα, οι τιμές των χρόνων ημιζωής κυμαίνονται από λίγους μήνες (σχεδόν 2 μήνες για τους πρωτογενείς ρύπους) μέχρι λίγα χρόνια (σχεδόν 2.5 χρόνια για το VC). Η μέση τιμή του χρόνου ημιζωής του κάθε χλωροαιθενίου στο δείγμα των πέντε ρυπασμένων χώρων προέκυψε ίση με 0.73 έτη (8.76 μήνες) για το PCE, 0.84 έτη (10.08 μήνες) για το TCE, 1.25 έτη για το cis 1,2 DCE και 1.61 έτη για το VC.

Όπως αναμενόταν, οι χρόνοι ημιζωής αυξάνονται καθώς μειώνεται ο αριθμός χλωρίων στο μόριο. Η σχετική όμως αύξηση του μέγιστου χρόνου ημιζωής του VC σε σχέση με τον μέγιστο χρόνο ημιζωής του PCE διαφέρει σημαντικά και κυμαίνεται για τα περιστατικά βιοδιέγερσης από 1.5 φορές (για το περιστατικό ρύπανσης στην πόλη Εσπανιόλα) σε 3.5 φορές (για το περιστατικό ρύπανσης στην πρώην Βάση Νιούαρκ), ενώ είναι ακόμα μικρότερη, ίση με 1.2 φορές, για το περιστατικό βιοεπαύξεσης (Περιοχή SS015 στη Βάση Τράβις).

5.3.2. Τιμές χρόνων ημιζωής στη βιβλιογραφία

Εφόσον η παρούσα εργασία ασχολείται με την εφαρμογή της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης στο πεδίο, η σύγκριση των υπολογισθέντων χρόνων ημιζωής για τα πέντε περιστατικά αποχλωρίωσης γίνεται με τις τιμές που προκύπτουν από τη βιβλιογραφία και ομοίως αφορούν σε εφαρμογές πλήρους κλίμακας της μεθόδου. Στους Πίνακες 5.3 και 5.4 οι υπολογισθείσες τιμές συγκρίνονται με τις αντίστοιχες της ενδογενούς και της ενισχυμένης αποχλωρίωσης από ερευνητικές μελέτες στο πεδίο. Ο τρόπος υπολογισμού των τιμών των χρόνων ημιζωής είναι ίδιος με εκείνον που εφαρμόστηκε και για τα πέντε περιστατικά αποχλωρίωσης· από την βιβλιογραφία αντλούνται οι μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στο πεδίο ώστε να δημιουργηθεί η εκάστοτε χρονοσειρά του πηγαδιού δειγματοληψίας και στη συνέχεια να γίνει η γραμμική προσέγγιση αυτής. Στην τελευταία γραμμή των Πινάκων 5.3 και 5.4 παρατίθενται οι χρόνοι ημιζωής που υπολογίστηκαν για τα πέντε περιστατικά ενισχυμένης αποχλωρίωσης υπό τη μορφή εύρους (ελάχιστη-μέγιστη τιμή). Σε κάθε

περίπτωση, η γραμμική προσέγγιση της εκάστοτε χρονοσειράς παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β.

Όσον αφορά στην ενδογενή αποχλωρίωση, για τον υπολογισμό των χρόνων ημιζωής αξιοποιήθηκαν οι μετρήσεις συνολικά επτά πηγαδιών, από τα οποία τα τρία αποτελούν πηγάδια παρακολούθησης της βαθιάς στρώσης για το περιστατικό ρύπανσης της Περιοχής 6 της Βάσης Ντόβερ και τα υπόλοιπα τέσσερα είναι πηγάδια της ρυπασμένης έκτασης στην πόλη Εσπανιόλα (τρία είναι πηγάδια δειγματοληψίας των ενδιάμεσων στρώσεων 1 και 2 και ακόμη ένα είναι πηγάδι δειγματοληψίας της ρηχής στρώσης). Και τα επτά αυτά πηγάδια αξιοποιούνται με σκοπό την συστηματική παρακολούθηση της ενδογενούς αποχλωρίωσης στο εκάστοτε περιστατικό και κατά τις αρχικές συνθήκες καταγράφονταν σε αυτά αξιολογες συγκεντρώσεις χλωροαιθενίων. Στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ οι μέγιστες συγκεντρώσεις ήταν της τάξεως των 1,000 $\mu\text{g/L}$, ενώ στη ρυπασμένη έκταση στην πόλη Εσπανιόλα ήταν της τάξεως των 100 $\mu\text{g/L}$ για το πηγάδι παρακολούθησης της ρηχής στρώσης (R-12-S1) και της τάξεως των 50 $\mu\text{g/L}$ για τα πηγάδια των ενδιάμεσων στρώσεων.

Οι υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής για την ενδογενή αποχλωρίωση κυμαίνονται από λίγα έτη για τους πρωτογενείς ρύπους και φθάνουν στην πλειονότητα των περιπτώσεων σε τιμές που τείνουν στο άπειρο για τα θυγατρικά προϊόντα. Σημειώνεται ότι χρόνοι ημιζωής που παρατίθενται ίσοι με άπειρο είναι συμβολικοί και αφορούν στις περιπτώσεις πηγαδιών όπου φαίνεται ότι η αποχλωριωτική διαδικασία προχωρά με αργό ρυθμό ή δεν έχει προχωρήσει και καθόλου, δηλαδή είτε (α) οι συγκεντρώσεις των cDCE και VC έχουν σταθερά αυξητικές τάσεις καθώς οι συγκεντρώσεις των πρωτογενών ρύπων μειώνονται σταδιακά, είτε (β) καταγράφεται μικρή μείωση των πρωτογενών ρύπων, χωρίς όμως να έχει σημειωθεί αύξηση των θυγατρικών προϊόντων. Και για τους δύο αυτούς χώρους, από τους οποίους χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις στο πεδίο για τον υπολογισμό των χρόνων ημιζωής κατά την εφαρμογή της ενδογενούς αποχλωρίωσης, παρατίθενται οι υπολογισμοί από ένα πηγάδι δειγματοληψίας αντίστοιχα (DM353DR για την Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ και R-12-S1 για το περιστατικό ρύπανσης στην πόλη Εσπανιόλα), στο οποίο η αποχλωριωτική διαδικασία φαίνεται να έχει ολοκληρωθεί μέσα σε περίπου 15 έτη παρακολούθησης και τα όρια αποκατάστασης στην πλέον πρόσφατη μέτρηση έχουν επιτευχθεί. Τα πηγάδια αυτά δίνουν τους μικρότερους χρόνους ημιζωής για την ενδογενή αποχλωρίωση στον Πίνακα 5.3, οι οποίοι είναι μεγαλύτεροι κατά λίγους μόλις μήνες έως και περίπου 4.5 έτη από την μέγιστη τιμή που υπολογίστηκε για το εκάστοτε χλωροαιθένιο στο δείγμα των πέντε περιστατικών αποχλωρίωσης και δεν αφορά σε χρονοσειρά πηγαδιού με συμπεριφορά στασιμότητα.

Για την ενισχυμένη παραλλαγή της μεθόδου, αναζητήθηκαν στην πρόσφατη βιβλιογραφία κάποιοι ακόμη ρυπασμένοι χώροι και ενδεικτικά υπολογίστηκαν οι χρόνοι ημιζωής των χλωριωμένων αιθυλενίων κατά την διάρκεια της εκόστοτε εφαρμογής πλήρους

κλίμακας. Οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο πεδίο αντλήθηκαν από ερευνητικές μελέτες και αναφορές προόδου ρυπασμένων χώρων με χλωριωμένα αιθυλένια. Μαζί με τις υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής για την ενισχυμένη αποχλωρίωση, στον Πίνακα 5.4 αναφέρεται η ταυτότητα του ρυπασμένου χώρου, η διάρκεια παρακολούθησης, το πηγάδι δειγματοληψίας, το πλήθος των μετρήσεων και των χορηγήσεων δότη ή και μικροοργανισμών που πραγματοποιήθηκαν σε αυτό, καθώς και ο τύπος του δότη. Σε κάθε περίπτωση γίνεται αναφορά στη βιβλιογραφία από την οποία αντλήθηκαν τα παραπάνω δεδομένα. Το κριτήριο επιλογής των περιστατικών ρύπανσης ήταν οι υδρογεωλογικές συνθήκες και για τους έξι ρυπασμένους χώρους που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4, ο εδαφικός σχηματισμός είναι σχετικά περατός, όπως και για τα πέντε περιστατικά ρύπανσης που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4 και σε πέντε από αυτούς το βάθος ρύπανσης είναι επίσης σχετικά μικρό (μικρότερο των 15 μέτρων), με εξαίρεση το περιστατικό ρύπανσης στην Περιοχή 70 στο Σιλ Μπιτς (Seal Beach) στην Καλιφόρνια, όπου το βάθος της ρύπανσης φθάνει περίπου 50 μέτρα από την ελεύθερη επιφάνεια και συνάγεται η παρουσία DNAPL. Παρουσία DNAPL συνάγεται και για το περιστατικό ρύπανσης στη Ζώνη 4 της Πρώην Αεροπορικής Βάσης Τσάρλεστον. Για την ενισχυμένη παραλλαγή της μεθόδου, η σύγκριση των υπολογισθεισών τιμών στη βιβλιογραφία με τις αντίστοιχες των πέντε περιστατικών ενισχυμένης αποχλωρίωσης γίνεται μόνο για τα TCE, cis 1,2 DCE και VC. Οι γραμμικές προσεγγίσεις των πηγαδιών παρακολούθησης του Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

Όσον αφορά στα δύο περιστατικά ρύπανσης με ενδεχόμενη ύπαρξη DNAPL, η επίδοση της μεθόδου σε κάθε περίπτωση είναι μεικτή. Στο Σιλ Μπιτς, η επίδοση της μεθόδου κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας αξιολογείται ως μεικτή, αφού σε κάποια πηγάδια παρακολούθησης της περιοχής καταγράφεται συσσώρευση των θυγατρικών προϊόντων ενώ σε άλλα καταγράφεται αξιόλογη πρόοδος. Για παράδειγμα στο πηγάδι εντός της εστίας (MW-70-PMW01B), αν και οι συγκεντρώσεις TCE αποδομήθηκαν αμέσως μετά από την πρώτη χορήγηση δότη και μικροοργανισμών, οι συγκεντρώσεις cDCE παρέμειναν σε αυξημένες τιμές παρόλο που πραγματοποιήθηκε επαναληπτική προσθήκη δότη. Αντιθέτως, στο πηγάδι MW-70-PMW01A το οποίο επίσης βρίσκεται εντός της εστίας και κατά τις αρχικές συνθήκες και η μέγιστη συγκέντρωση TCE ήταν κατά μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του MW-70-PMW01B, στην πλέον πρόσφατη μέτρηση οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθινίων είναι σε μη ανιχνεύσιμα επίπεδα. Στη Ζώνη 4 της Πρώην Αεροπορικής Βάσης Τσάρλεστον, ενώ και τα δύο πηγάδια παρακολούθησης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4 βρισκόντουσαν κοντά στο εκάστοτε σύστημα χορήγησης δότη, στο ένα (MW89-7) οι συγκεντρώσεις TCE έχουν σημειώσει πολύ μικρή μείωση (μικρότερη και από εκείνη των θυγατρικών προϊόντων), η αποχλωριωτική διαδικασία δεν έχει προχωρήσει και οι χρόνοι ημιζωής μειώνονται από το κάθε στάδιο αποχλωρίωσης στο

επόμενο. Στο άλλο πηγάδι (MW-29-6), μέχρι την τελευταία διαθέσιμη μέτρηση η συγκέντρωση VC παραμένει σταθερά σε τιμές ίδιας τάξης μεγέθους κατά τη διάρκεια της πενταετούς παρακολούθησης. Στα πηγάδια στα οποία καταγράφεται συσσώρευση των θυγατρικών προϊόντων, οι χρόνοι ημιζωής των προηγούμενων σταδίων αποχλωρίωσης είναι σημαντικά μικρότεροι από εκείνους που προκύπτουν στο στάδιο της συσσώρευσης (πηγάδια παρακολούθησης MW-70-PMW01B και MW29-6). Στο δεύτερο περιστατικό εφαρμογής της βιοεπαύξεσης στην Περιοχή SS032 της Αεροπορικής Βάσης Κολόμπους, η πρόοδος είναι μεγαλύτερη και οι χρόνοι ημιζωής κυμαίνονται από λίγους μήνες μέχρι περίπου τρία έτη για τα θυγατρικά προϊόντα. Στα άλλα δύο περιστατικά ρύπανσης (ενεργή εγκατάσταση στις Η.Π.Α. και Περιοχή SA17) οι χρόνοι ημιζωής επίσης βρίσκονται εντός τους εύρους των υπολογισθείσων τιμών για τα πέντε περιστατικά ενισχυμένης αποχλωρίωσης. Το περιστατικό ρύπανσης στην ενεργή εγκατάσταση των Η.Π.Α. επιλέχθηκε διότι, εκτός του ότι πληροί το βασικό κριτήριο υπάρξης κοινών υδρογεωλογικών συνθηκών, (α) η αποκατάστασή του ολοκληρώθηκε μέσα σε μία διετία με μία μόνο χορήγηση δότη και (β) σύμφωνα με τους μελετητές κατά τις πρότερες συνθήκες παρατηρήθηκε σχεδόν παντελής απουσία αποχλωρίωσης στο πεδίο. Για τον χώρο αυτό οι χρόνοι ημιζωής είναι της τάξεως λίγων μηνών για όλα τα χλωριωμένα αιθυλένια.

Πίνακας 5.3. Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής κατά την εφαρμογή της ενδογενούς αποχλωρίωσης στο πεδίο

Τύπος αποχλωρίωσης	Ρυπασμένος χώρος	Πηγάδι παρακολούθησης	Πλήθος μετρήσεων στο πεδίο	Χρόνοι ημιζωής - $T_{1/2}$ (έτη)				Αναφορά		
				PCE	TCE	cis 1,2 DCE	VC			
Ενδογενής	Περιοχή 6, Αεροπορική Βάση Ντόβερ Ντέλαγουερ, Η.Π.Α.	IRO5D	25	6.49	8.62	12.29	$+\infty$	ORNL (2007b; 2007c; 2008b; 2008c; 2008d; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2011b; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM (2016c; 2018a; 2020c; 2020d)		
		EA5D	28	6.42	6.96	31.58	$+\infty$			
		DM353DR	24	1.92	2.06	2.23	3.17			
	Ρυπασμένη έκταση στην πόλη Εσπανιόλα, Νέο Μεξικό, Η.Π.Α. (Διαπιστωμένη ύπαρξη DNAPL)	R-09-I1	25	41.26	57.76	$+\infty$	$+\infty$		USEPA (2015; 2020)	
		R-09-I2	31	36.1	48.14	$+\infty$	$+\infty$			
		R-13-I2	27	30.4	38.51	$+\infty$	$+\infty$			
		R-12-S1	31	3.44	4.25	6.35	7.04			
	Ενδογενής αποχλωρίωση-Εύρος υπολογισθεισών τιμών χρόνων ημιζωής (έτη)				1.92-41.26	2.06-57.76	2.23-($+\infty$)		3.17-($+\infty$)	
	Ενισχυμένη αποχλωρίωση-Εύρος υπολογισθεισών τιμών χρόνων ημιζωής για τα πέντε περιστατικά αποχλωρίωσης αγνοώντας υπολογισμούς από πηγάδια παρακολούθησης με συμπεριφορά στασιμότητα (έτη)				0.17-1.35	0.17-1.61	0.25-2.06		0.66-2.46	
	Ενισχυμένη αποχλωρίωση-Εύρος υπολογισθεισών τιμών χρόνων ημιζωής για τα πέντε περιστατικά αποχλωρίωσης συμπεριλαμβανοντας υπολογισμούς από πηγάδια παρακολούθησης με συμπεριφορά στασιμότητα (έτη)				0.17-4.07	0.17-4.81	0.25-25.11		0.66-30.4	

Πίνακας 5.4. Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής κατά την εφαρμογή της ενισχυμένης αποχλωρίωσης στο πεδίο από ερευνητικές μελέτες

Τύπος αποχλωρίωσης	Ρυπασμένος χώρος	Διάρκεια Παρακολούθησης	Σύσταση δότη και κοινότητα μικρ/μών	Πλήθος χορηγήσεων	Πηγάδι παρακολούθησης	Πλήθος μετρήσεων στο πεδίο ¹	Χρόνοι ημιζωής – T _{1/2} (έτη)			Αναφορά
							TCE	cis 1,2 DCE	VC	
Βιοδιέγερση	Ενεργή εγκατάσταση, Η.Π.Α. ²	- ²	Ενώσεις απελευθέρωσης υδρογόνου (HRC Primer&HRC)	1	- ²	7	0.27 (3.21 μήνες)	0.43 (5.1 μήνες)	0.66 (7.9 μήνες)	Regenesis (https://regenesis.com/en/project/bioremediation-of-chlorinated-solvents-at-an-operational-facility/)
	Περιοχή SA17, Πρώην κέντρο εκπαίδευσης Πολεμικού Ναυτικού Ορλάντο, Η.Π.Α.	2006-2016	EVO	3	OLD-17-56B	TCE:24 cDCE:24 VC: 16	0.45 (5.37 μήνες)	1.67	2.27	ESTCP (2017)
	Ζώνη 4, Πρώην Αεροπορική Βάση Τσάρλεστον Νότια Καρολίνα, Η.Π.Α. (Ενδεχόμενη ύπαρξη DNAPL)	2009-2015	EVO	1-2	MW89-7 MW29-6	5 15	4.04 MA ³	2.12 2	2.09 6.96	ESTCP (2020)
Βιοεπαύξηση	Περιοχή SS032, Αεροπορική Βάση Κολόμπους Μισισσιππή, Η.Π.Α.	2014-2020	Μείγμα EVO, γαλακτώματος σογιέλαιου και ορού τυρογάλακτος& KB-1 Plus	1 χορήγηση δότη & 1 προσθήκη μικ/μών	MW-06	15	1.22	2.24	3.07	Parsons (2021)
					TW-21	14	MA ³	0.24 (2.88 μήνες)	0.33 (3.95 μήνες)	
					TW-2	9	0.2 (2.4 μήνες)	0.2 (2.4 μήνες)	0.13 (1.52 μήνες)	
Περιοχή 70, Σιλ Μπιτς, Πολεμικό Ναυτικό Καλιφόρνια, Η.Π.Α. (Ενδεχόμενη ύπαρξη DNAPL)	2008-2015	EVO& KB-1 Plus	2 χορηγήσεις δότη & 1 προσθήκη μικ/μών	MW-70-PMW01B	7	0.18 (2.17 μήνες)	8.62	ΔΔ ⁴	ESTCP (2020)	
				MW-70-PMW01A	7	0.27 (3.26 μήνες)	0.76 (9.12 μήνες)	0.95 (11.44 μήνες)		
Εύρος υπολογισθεισών τιμών χρόνων ημιζωής από ερευνητικές μελέτες (έτη)							0.18-4.04	0.2-8.62	0.13-6.96	
Εύρος υπολογισθεισών τιμών χρόνων ημιζωής για τα πέντε περιστατικά αποχλωρίωσης συμπεριλαμβανοντας υπολογισμούς από πηγάδια παρακολούθησης με συμπεριφορά στασιμότητα (έτη)							0.17-4.81	0.25-25.11	0.66-30.4	

Σημειώσεις:

¹ για περιπτώσεις ρυπασμένων χώρων όπου το πλήθος των μετρήσεων στο πεδίο δεν είναι κοινό για όλα τα χλωροαιθέρια, το πλήθος των μετρήσεων αναφέρεται ξεχωριστά για κάθε χλωροαιθέριο

² η εφαρμογή πλήρους κλίμακας του περιστατικού διήρκεσε δύο έτη, οι χρόνοι ημιζωής που παρουσιάζονται υπολογίστηκαν από χρονοσειρά μέσων τιμών των συγκεντρώσεων των χλωριομένων αιθυλένιων κατά την εξέλιξη της εφαρμογής

³ μη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση

⁴ δεν δίνονται μετρήσεις στο πεδίο για τον συγκεκριμένο ρύπο

5.4. Αβεβαιότητα αποτελεσμάτων

Η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων για τα περιστατικά αποχλωρίωσης οφείλεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι η αποκατάσταση των περισσότερων ρυπασμένων χώρων (4/5) βρίσκεται σε εξέλιξη μέχρι σήμερα. Το γεγονός αυτό προσδίδει αβεβαιότητα τόσο στις καταγεγραμμένες συμπεριφορές των πηγαδιών παρακολούθησης στον εκάστοτε ρυπασμένο χώρο, όσο και στους υπολογισμούς που αφορούν στους χρόνους ημιζωής των χλωριωμένων αιθυλενίων.

Είναι προφανές ότι καθώς μία εφαρμογή πλήρους κλίμακας εξελίσσεται, αν σε ένα πηγάδι δειγματοληψίας το οποίο μέχρι και την πιο πρόσφατη μέτρηση έχει συμπεριφορά πρόοδο καταγραφεί μία απότομη ή σταδιακή αύξηση συγκεντρώσεων, θα εμφανίσει συμπεριφορά υποτροπή (δυσμενής εξέλιξη). Κάτι αντίστοιχο ενδεχομένως μπορεί να συμβεί και για ένα πηγάδι με συμπεριφορά στασιμότητα, στο οποίο ενώ μέχρι την πλέον πρόσφατη δειγματοληψία έχει σημειωθεί μικρή ή και αμελητέα πρόοδος, σε μία επαναληπτική επιτυχημένη προσθήκη δότη μπορεί να εμφανίσει συμπεριφορά υστέρηση (ευμενής εξέλιξη). Επίσης σε αρκετά πηγάδια παρακολούθησης με συμπεριφορά υποτροπή επαναλήφθηκε η προσθήκη δότη μετά από την αύξηση των συγκεντρώσεων και τα ποσοστά επιτυχίας ήταν αρκετά μεγάλα. Η αβεβαιότητα ως προς τις καταγεγραμμένες συμπεριφορές των πηγαδιών παρακολούθησης προφανώς επηρεάζει και τις υπολογισθείσες τιμές των χρόνων ημιζωής, αφού για παράδειγμα ένα πηγάδι με συμπεριφορά υστέρηση δίνει χρόνους ημιζωής σημαντικά μικρότερους από ένα πηγάδι με συμπεριφορά στασιμότητα.

Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα

Σε σύγκριση με την προ δεκαετίας διπλωματική εργασία της Ζηκίδη από την οποία ξεκίνησε η παρούσα διπλωματική, ο αριθμός των περιστατικών πλήρους κλίμακας που παρουσιάστηκαν είναι περιορισμένος και η αναζήτησή τους δεν έγινε με τον συστηματικό τρόπο της προηγούμενης εργασίας. Παρ' όλα αυτά, ενδέχεται η δυσκολία εντοπισμού περιστατικών πλήρους κλίμακας με διαθέσιμα δεδομένα για την πρόοδο της αποκατάστασης, σε σύγκριση με τον ικανό αριθμό πιλοτικών δοκιμών που εντοπίστηκαν προ δεκαετίας, εν μέρει να οφείλεται στην μεικτή επίδοση της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης σε πλήρη κλίμακα.

Ξεκινώντας από τις πιλοτικές δοκιμές, οι οποίες προηγούνται των εφαρμογών πλήρους κλίμακας σε έναν ρυπασμένο χώρο ώστε να εξεταστεί εάν οι συνθήκες στο πεδίο ευνοϊκές για πλήρη αποχλωρίωση, φαίνεται ότι δεν μπορούν να εξασφαλίσουν αξιόπιστες προβλέψεις, ιδίως όταν η διάρκειά τους είναι σύντομη. Για παράδειγμα, η πιλοτική δοκιμή στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ ολοκληρώθηκε με επιτυχία μόνο αφού πραγματοποιήθηκε προσθήκη μικροοργανισμών στη βαθιά στρώση του υδροφορέα. Όμως, η εφαρμογή βιοδιέγερσης σε πλήρη κλίμακα για το ίδιο περιστατικό έχει επιτύχει σημαντική μείωση της ρυπασμένης έκτασης (κυρίως στην ρηχή στρώση του υδροφορέα) και συγκεντρώσεων (ιδιαίτερα στη βαθιά στρώση), χωρίς να απαιτηθεί προσθήκη μικροοργανισμών. Βέβαια πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι αυτή η πρόοδος επετεύχθη μέσα σε περίπου μια δεκαπενταετία και με επανειλημμένες προσθήκες δότη. Αντίθετα, η μεγάλη επιτυχία της πιλοτικής δοκιμής βιοδιέγερσης στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις κατά την οποία αποκαταστάθηκε η εστία της ρύπανσης δεν επαναλήφθηκε στην εφαρμογή πλήρους κλίμακας.

Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η μεικτή επίδοση της μεθόδου στο πεδίο εν μέρει αντικατοπτρίζεται στους εκτιμώμενους χρόνους ολοκλήρωσης της αποκατάστασης των περιστατικών αποχλωρίωσης. Δεδομένων των αρχικών συνθηκών στις Περιοχές 6 και 5 της Βάσης Ντόβερ και εφόσον και στις δύο περιοχές η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης και ο ενδιάμεσος στόχος αυτής είναι κοινά, αναμέναμε ο εκτιμώμενος χρόνος ολοκλήρωσης της αποκατάστασης στην Περιοχή 5 να είναι μικρότερος από εκείνον της Περιοχής 6. Ο εκτιμώμενος χρόνος ολοκλήρωσης για την Περιοχή 5 είναι 6-20 έτη, ενώ για την Περιοχή 6 είναι 6-22 έτη (δηλαδή οι μέγιστες εκτιμώμενες τιμές έχουν απόκλιση μόλις δύο έτη). Ανεξαρτήτως της σύγκρισης αυτής, είναι γεγονός ότι το εύρος που δίνεται για την κάθε μία περιοχή ξεχωριστά είναι μεγάλο και υποδηλώνει αβεβαιότητα για το πότε εκτιμάται ότι θα ολοκληρωθεί η αποκατάσταση. Στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις ο εκτιμώμενος χρόνος ολοκλήρωσης της αποκατάστασης ήταν 5-10 χρόνια με τις μέγιστες συγκεντρώσεις κατά τις αρχικές συνθήκες να είναι της τάξεως των 810 $\mu\text{g/L}$ (cDCE) και έπειτα από σχεδόν

πέντε συναπτά έτη παρακολούθησης της εφαρμογής πλήρους κλίμακας, η πρόοδος δεν είναι εκείνη που αρχικώς αναμενόταν. Η εφαρμογή πλήρους κλίμακας στην πόλη Εσπανιόλα, περιοχή στην οποία η ύπαρξη DNAPL είναι επιβεβαιωμένη, είχε ως εκτιμώμενο χρόνο ολοκλήρωσης της αποκατάστασης 30 έτη.

Πριν ξεκινήσει η εκπόνηση της παρούσας εργασίας αναμέναμε, όπως ενδεχομένως και ο αναγνώστης, ότι το πλήθος χορηγήσεων δότη ή και μικροοργανισμών θα είναι σχετικά περιορισμένο κατά την εξέλιξη των εφαρμογών πλήρους κλίμακας. Ωστόσο σχεδόν σε όλους τους ρυπασμένους χώρους πραγματοποιήθηκε παραπάνω από μία χορήγηση δότη, φθάνοντας τις τρεις χορηγήσεις στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις, τις εννέα και οκτώ χορηγήσεις για την Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ και τη ρυπασμένη έκταση στην πόλη Εσπανιόλα, αντίστοιχα, και τη μέγιστη τιμή των 13 χορηγήσεων στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ. Ακόμη και στην πρώην Εγκατάσταση 87 της Βάσης Νιούαρκ, όπου η έκταση της ρύπανσης κατά τις αρχικές συνθήκες ήταν τουλάχιστον κατά μία τάξη μεγέθους μικρότερη από εκείνη των υπόλοιπων τεσσάρων περιστατικών, πραγματοποιήθηκαν δύο χορηγήσεις δότη. Η Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ είναι ο μόνος χώρος στον οποίο δοκιμάστηκε τοπικά η αποκατάσταση του ρυπασμένου υπόγειου νερού στη βαθειά στρώση του υδροφορέα με μία μόνο προσθήκη δότη, με σχετική όμως αποτυχία τελικά.

Τα δεδομένα των ρυπασμένων χώρων και η παρατήρηση και εν συνεχεία η εξοικείωση με τις μετρήσεις στο πεδίο οδήγησαν στην καταγραφή ορισμένων κατηγοριών τάσεων συμπεριφοράς των πηγαδιών παρακολούθησης. Οι τάσεις συμπεριφοράς πρόοδος, υποτροπή, υστέρηση και στασιμότητα αντικατοπτρίζουν έμμεσα το γεγονός ότι η διαδικασία της αποχλωρίωσης είναι πολυπαραμετρική και ότι η εφαρμογή της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης στο πεδίο δεν μπορεί να κριθεί μονοσήμαντα ως επιτυχημένη ή αποτυχημένη. Όλοι οι ρυπασμένοι χώροι που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία είχαν τουλάχιστον ένα πηγάδι με συμπεριφορά στασιμότητα, ακόμη και εάν έχει σημειωθεί μέχρι σήμερα αξιόλογη πρόοδος όσον αφορά την αποκατάστασή τους. Στους περισσότερους ρυπασμένους χώρους που μελετήθηκαν υπήρχαν πηγάδια παρακολούθησης με όλες τις κατηγορίες συμπεριφορών, αν και τα πηγάδια με συμπεριφορά υστέρηση ποσοστιαία ήταν λιγότερα και καταγράφηκαν μόνο στις Περιοχές 6 και 5 της Βάσης Ντόβερ. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι για ρυπασμένους χώρους στους οποίους κατά την εξέλιξη των εφαρμογών πλήρους κλίμακας το ποσοστό των πηγαδιών παρακολούθησης με συμπεριφορά πρόοδο και υστέρηση είναι μεγαλύτερο από 50%, τότε η πρόοδος της αποκατάστασής τους είναι ικανοποιητική. Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί ότι για πηγάδια παρακολούθησης με συμπεριφορά υποτροπή, τα ποσοστά επαναφοράς σε χαμηλές τιμές συγκεντρώσεων έπειτα από επαναληπτική χορήγηση δότη ήταν αρκετά μεγάλα, γεγονός που κρίνεται ως αισιόδοξο.

Κανένα περιστατικό από τα πέντε που μελετήθηκαν δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως αμιγώς επιτυχημένο, δηλαδή σε κανένα περιστατικό κατά την εξέλιξη της εφαρμογής

πλήρους κλίμακας δεν μειώνονται συστηματικά και σε όλους τους επιμέρους υδροφορείς τόσο οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθενίων, όσο και οι ρυπασμένες εκτάσεις. Στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ καταγράφεται ταυτόχρονη μείωση των συγκεντρώσεων και της ρυπασμένης έκτασης και στις δύο στρώσεις στην πλέον πρόσφατη μέτρηση, ωστόσο η μείωση αυτή δεν είναι συστηματική, αφού στο συγκεκριμένο περιστατικό το ποσοστό των πηγαδιών παρακολούθησης με συμπεριφορά υποτροπή ήταν το μεγαλύτερο συγκριτικά με τα άλλα περιστατικά. Δεδομένων των αρχικών συνθηκών του εκάστοτε περιστατικού, στην απόπειρα κατάταξης τους βάσει μεγαλύτερης επιτυχίας και καλύτερης επίδοσης της μεθόδου, θα μπορούσαμε να πούμε ότι στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ η πρόοδος είναι μεγαλύτερη, ιδίως όσον αφορά στη βαθιά στρώση του υδροφορέα, όπου τοπικά καταγράφεται μείωση των συγκεντρώσεων έως και τρεις με τέσσερις τάξεις μεγέθους. Ακολουθεί η Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ, περιστατικό το οποίο σύμφωνα με τις πλέον πρόσφατες συνθήκες φαίνεται να είναι εκείνο που οδεύει με γρηγορότερο ρυθμό προς την ολοκλήρωση από τα υπόλοιπα. Στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις, επίσης καταγράφηκε μείωση των συγκεντρώσεων κατά τέσσερις τάξεις μεγέθους κατά τη διενέργεια της πιλοτικής δοκιμής στην εστία της ρύπανσης, ωστόσο η επίδοση της ενισχυμένης αποχλωρίωσης δεν ήταν η ίδια κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας, παρότι πραγματοποιήθηκε και μία προσθήκη μικροοργανισμών. Ακολουθεί το περιστατικό ρύπανσης στην πόλη Εσπανιόλα όπου, αν και έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος όσον αφορά στη μείωση της ρυπασμένης έκτασης στη ρηχή στρώση του υδροφορέα, οι μέγιστες συγκεντρώσεις στην εστία παραμένουν ίδιας τάξης μεγέθους και στις βαθιές στρώσεις δεν έχει σημειωθεί ιδιαίτερη πρόοδος. Η εφαρμογή πλήρους κλίμακας του περιστατικού αυτού κατά πάσα πιθανότητα είναι εκείνη η οποία θα έχει τη μεγαλύτερη διάρκεια, με τις δράσεις απορρύπανσης ήδη από το 2020 να περιλαμβάνουν μία δοκιμή χορήγησης δότη χαμηλότερου ιξώδους στις βαθιές στρώσεις και επαναληπτικές προσθήκες δότη στην εστία της ρύπανσης. Τελευταίο στη σειρά κατάταξης βρίσκεται το περιστατικό ρύπανσης στην πρώην Εγκατάσταση 87 της Πρώην Βάσης Νιούαρκ, το οποίο είναι το μοναδικό από τα πέντε περιστατικά που ήταν εκτός της Λίστας Χώρων Προτεραιότητας και για το οποίο δεν έχει βρεθεί ο εκτιμώμενος χρόνος ολοκλήρωσης της αποκατάστασης· ωστόσο υπήρχε ανάγκη για επίσπευση αυτής. Η εκσκαφή και αφαίρεση εδάφους στο συγκεκριμένο περιστατικό δεν ήταν μία μέθοδος αποκατάστασης που εφαρμόστηκε συνδυαστικά με την βιοδιέγερση, αλλά η μέθοδος που τελικά εφαρμόστηκε εφόσον η βιοδιέγερση δεν είχε την επιθυμητή ή την αναμενόμενη επίδοση.

Οι υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής των χλωριωμένων αιθυλενίων κατά τις εφαρμογές πλήρους κλίμακας της ενισχυμένης αποχλωρίωσης, αγνοώντας πηγάδια παρακολούθησης με συμπεριφορά στασιμότητα κυμαίνονται εντός εύρους από 2.04 μήνες έως 1.35 έτη για το PCE, 2.04 μήνες έως 1.61 έτη για το TCE, 3 μήνες έως 2.06 έτη για το cis 1,2 DCE και 7.92 μήνες έως 2.46 έτη για το VC. Συμπεριλαμβάνοντας υπολογισμούς που

προκύπτουν από χρονοσειρές πηγαδιών παρακολούθησης με συμπεριφορά στασιμότητα, οι μέγιστες υπολογισθείσες τιμές των χρόνων ημιζωής αυξάνονται σημαντικά και φθάνουν σχεδόν τα τέσσερα έτη για τους πρωτογενείς ρύπους και σχεδόν 30 έτη για το cis 1,2 DCE και το VC αντίστοιχα. Όσον αφορά στην ενδογενή αποχλωρίωση, σύμφωνα με τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν για την Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ και τη ρυπασμένη έκταση στην πόλη Εσπανιόλα, οι χρόνοι ημιζωής έχουν μεγάλο εύρος ξεκινώντας από σχεδόν δύο έτη για τους πρωτογενείς ρύπους και φθάνουν σε τιμές που τείνουν στο άπειρο για τα θυγατρικά προϊόντα. Και στις δύο περιπτώσεις (Ντόβερ-Περιοχή 6, Εσπανιόλα) υπήρχαν πηγάδια παρακολούθησης στα οποία η καταγραφόμενη πρόοδος της ενδογενούς αποχλωρίωσης ήταν αξιόλογη, με αποτέλεσμα οι χρονοσειρές τους να οδηγήσουν σε τιμές χρόνων ημιζωής που είναι κατά λίγους μήνες έως 4.5 έτη μεγαλύτερες από τις μέγιστες που προέκυψαν για τα πέντε περιστατικά ενισχυμένης αποχλωρίωσης και αφορούν σε χρονοσειρές πηγαδιών παρακολούθησης με συμπεριφορές πρόοδο, υποτροπή και υστέρηση. Στο δείγμα σύγκρισης των πέντε ρυπασμένων χώρων με μέθοδο αποκατάστασης την ενισχυμένη αποχλωρίωση (που αξιοποιήθηκε επίσης με σκοπό τον υπολογισμό των χρόνων ημιζωής και εν συνεχεία τη σύγκριση των υπολογισθείσων τιμών με τις αντίστοιχες των πέντε περιστατικών αποχλωρίωσης που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία), η πρόοδος χαρακτηρίζεται ως μεικτή για τις δύο περιπτώσεις χώρων όπου συνάγεται η ύπαρξη DNAPL. Αν και σε κάποια πηγάδια παρακολούθησης της περιοχής καταγράφεται αξιόλογη πρόοδος, σε άλλα καταγράφεται συσσώρευση των θυγατρικών προϊόντων. Στα άλλα τρία περιστατικά του δείγματος αυτού, η πρόοδος ήταν μεγαλύτερη και οι χρόνοι ημιζωής που υπολογίστηκαν βρίσκονται στην πλειονότητα των περιπτώσεων εντός του εύρους τιμών που υπολογίστηκαν για τα πέντε περιστατικά ενισχυμένης αποχλωρίωσης και αφορούν σε χρονοσειρές πηγαδιών παρακολούθησης με συμπεριφορές πρόοδο, υποτροπή και υστέρηση.

Αν και στην παρούσα εργασία δεν έγιναν αναλύσεις κόστους για την εφαρμογή της μεθόδου σε πλήρη κλίμακα, τίθεται το εύλογο ερώτημα που αφορά στο πόσο πιο οικονομική είναι η Αναερόβια Αναγωγική Αποχλωρίωση κατά την εφαρμογή της στο πεδίο συγκριτικά με άλλες επιτόπιες μεθόδους αποκατάστασης. Αν και η επιτόπια βιοαποκατάσταση επιλέγεται συχνά ως τεχνολογία εφόσον προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα (συμπεριλαμβανομένου του χαμηλού της κόστους) έναντι άλλων πιο συμβατικών τεχνολογιών, το κόστος εφαρμογής της μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω αν θεωρηθεί αναγκαία η ενίσχυση της διεργασίας με την προσθήκη χημικών ή μικροοργανισμών (USEPA, 2000). Στο δείγμα των περιστατικών που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, το πλήθος χορηγήσεων δότη που πραγματοποιήθηκαν φθάνει τις 13. Τέσσερις από τις πέντε εφαρμογές πλήρους κλίμακας είναι εν εξελίξει και στο μέλλον θα πραγματοποιηθούν ακόμη περισσότερες βάσει των αναφορών προόδου των περιστατικών. Επιπλέον, σε περιπτώσεις χώρων όπου η επίδοση της μεθόδου δεν είναι η αναμενόμενη (λόγου χάριν ρηχή στρώση στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ ή Περιοχή

SS015 της Βάσης Τράβις ή βαθιές στρώσεις στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα) διεξήχθησαν ή διεξάγονται επιπλέον μελέτες οι οποίες, συνδυαστικά με την συστηματική παρακολούθηση του εκάστοτε ρυπασμένου χώρου, αυξάνουν το κόστος της εφαρμογής της μεθόδου στο πεδίο.

Συνδυαστικά, τα ευρήματα της παρούσας διπλωματικής, με βάση ένα δείγμα αναφοράς πέντε εφαρμογών της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης με διαθέσιμες μετρήσεις συγκεντρώσεων σε πλήθος πηγαδιών παρακολούθησης (2 έως 50) και σε βάθος χρόνου (5 έως 14 έτη), οδηγούν στα εξής κύρια συμπεράσματα:

- Οι πιλοτικές δοκιμές φαίνεται ότι δεν μπορούν να εξασφαλίσουν αξιόπιστες προβλέψεις για την εφαρμογή πλήρους κλίμακας, ιδίως όταν η διάρκειά τους είναι σύντομη.
- Η εντονότερη διακύμανση της μεταβολής των συγκεντρώσεων (σύνηθες φαινόμενο κατά την παρακολούθηση ρυπασμένων χώρων, αλλά ακόμα πιο έντονο κατά την εφαρμογή τεχνολογιών αποκατάστασης) και οι σημαντικότερες διαφορές της παρατηρούμενης συμπεριφοράς από πηγάδι σε πηγάδι, ακόμα και στην ίδια στρώση του ίδιου υδροφορέα, δυσχεραίνει την αποτίμηση της επίδοσης της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης.
- Η ως άνω δυσκολία καθιστά αναγκαία την κατηγοριοποίηση των βασικών μοτίβων της απόκρισης που καταγράφεται στα πηγάδια παρακολούθησης: στην παρούσα εργασία προτείνονται τέσσερις κατηγορίες με τις κωδικές-επεξηγηματικές ονομασίες Πρόοδος, Υστέρηση, Υποτροπή και Στασιμότητα. Με βάση αυτές τις κατηγορίες, προτείνεται να αποτιμάται ως ικανοποιητική η επίδοση της Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης εάν τουλάχιστον το 50% των πηγαδιών παρακολούθησης ανήκουν σε μία από τις δύο πρώτες κατηγορίες.
- Αν και οι παρατηρούμενες διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις και οι διαφορές μεταξύ πηγαδιών περιορίζουν την χρησιμότητα του χρόνου ημιζωής ως εργαλείου παρακολούθησης των κύριων και των θυγατρικών ρύπων, συνιστάται ο υπολογισμός του και οι συναξιολόγηση μοτίβων συμπεριφοράς-χρόνων ημιζωής.
- Η καλή σύγκριση του εύρους των υπολογισθέντων χρόνων ημιζωής στο δείγμα αναφοράς των πέντε περιστατικών με το εύρος υπολογισθέντων χρόνων ημιζωής σε ένα δείγμα σύγκρισης άλλων πέντε περιστατικών υποδεικνύει ότι τα συμπεράσματα από το δείγμα αναφοράς αντιπροσωπεύουν ικανό αριθμό εφαρμογών πλήρους κλίμακας στο πεδίο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- AECOM. (2016a). Area 5 Monitoring Report (Through April 2016), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of the Air Force, submitted by AECOM Technical Services, Inc., July 2016. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- AECOM. (2016b). Area 5 Monitoring Report, November 2015 Sampling Event, Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of the Air Force, submitted by AECOM Technical Services, Inc., January 2016. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- AECOM. (2016c). Area 6 Monitoring Report (September 2016 Event), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by AECOM Technical Services, Inc., November 2016. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- AECOM. (2017a). Area 5 Monitoring Report (Through May 2017) Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of the Air Force, submitted by AECOM Technical Services, Inc., August 2017. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- AECOM. (2017b). Area 5 Monitoring Report, October 2016 Sampling Event, Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of the Air Force, submitted by AECOM Technical Services, Inc., January 2017. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- AECOM. (2018a). Area 6 Monitoring Report (September 2017 Sampling Event), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by AECOM Technical Services, Inc., January 2018. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- AECOM. (2018b). Area 5 Monitoring Report, November 2017 Sampling Event, Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of the Air Force, submitted by AECOM Technical Services, Inc., February 2018. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- AECOM. (2019a). Area 5 Monitoring Report (Through April 2019) Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of the Air Force, submitted by AECOM Technical Services, Inc., August 2019. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- AECOM. (2019b). Area 5 Monitoring Report, November 2018 Sampling Event, Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of the Air Force, submitted by AECOM Technical Services, Inc., January 2019. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>

- AECOM. (2020a). Area 5 Monitoring Report (Through April 2020) Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of the Air Force, submitted by AECOM Technical Services, Inc., November 2020. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- AECOM. (2020b). Area 5 Monitoring Report, November 2019 Sampling Event, Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of the Air Force, submitted by AECOM Technical Services, Inc., February 2020. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- AECOM. (2020c). Area 6 Monitoring Report (February 2019 Sampling Event), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by AECOM Technical Services, Inc., June 2019. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- AECOM. (2020d). Area 6 Monitoring Report (February 2020 Sampling Event), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of the Air Force, Dover Air Force Base, submitted by AECOM Technical Services, Inc., November 2020. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- AFCEC (Air Force Civil Engineer Center). (2014). Groundwater Record of Decision, Travis Air Force Base California, prepared by United States Air Force, Fairfield, California, June 2014. Ανάκτηση Ιούλιος 3, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) . (2019). Toxicological Profile for Trichloroethylene, June 2019. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp19.pdf>
- Bradley, P. M. (2003). History and Ecology of Chloroethane Biodegradation: A Review. Bioremediation Journal, 7(2), pp. 81-109.
- CH2MHILL. (2011a). Final Site SS015 Remedial Process Optimization (RPO) Field Implementation Plan, Travis Air Force Base, California, prepared for United States Army Corps of Engineers, prepared by CH2MHILL, March 2011. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- CH2MHILL. (2011b). Final: Groundwater Sampling and Analysis Program 2009-2010 Annual Report, Travis Air Force Base, California, prepared for United States Army Corps of Engineers, prepared by CH2MHILL, April 2011. Ανάκτηση Ιούλιος 3, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- CH2MHILL. (2012a). Final 2012 Groundwater Sampling and Analysis Program Technical Memorandum, Travis Air Force Base, California, prepared for United States Army Corps of Engineers, prepared by CH2MHILL, December 2012. Ανάκτηση Ιούλιος 3, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- CH2MHILL. (2012b). Final: Groundwater Sampling and Analysis Program 2010-2011 Annual Report, Travis Air Force Base, California, prepared for United States Army Corps of Engineers, prepared by CH2MHILL, April 2012. Ανάκτηση Ιούλιος 3, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>

- CH2MHILL. (2013). Final 2012 Annual Groundwater Remediation Implementation Status Report, Travis Air Force Base, California, prepared for United States Army Corps of Engineers, prepared by CH2MHILL, October 2013. Ανάκτηση Ιούλιος 3, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- CH2MHILL. (2014). Final 2013 Annual Groundwater Remediation Implementation Status Report, Travis Air Force Base, California, prepared for United States Army Corps of Engineers, Omaha District, prepared by CH2MHILL, July 2014. Ανάκτηση Ιούλιος 3, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- CH2MHILL. (2016a). Final 2014 Annual Groundwater Remediation Implementation Status Report, Travis Air Force Base, California, prepared for United States Army Corps of Engineers, prepared by CH2MHILL, March 2016. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- CH2MHILL. (2016b). Final 2015 Annual Groundwater Remediation Implementation Status Report, Travis Air Force Base, California, prepared for United States Army Corps of Engineers, prepared by CH2MHILL, November 2016. Ανάκτηση Ιούλιος 3, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- CH2MHILL. (2017). Final 2016 Annual Groundwater Remediation Implementation Status Report, Travis Air Force Base, California, prepared for United States Army Corps of Engineers, prepared by CH2MHILL, December 2017. Ανάκτηση Ιούλιος 3, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- CH2MHILL. (2019a). Final 2017 Annual Groundwater Remediation Implementation Status Report, Travis Air Force Base, California, prepared for United States Army Corps of Engineers, prepared by CH2MHILL, May 2019. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- CH2MHILL. (2019b). Final 2018 Annual Groundwater Remediation Implementation Status Report, Travis Air Force Base, California, prepared for United States Army Corps of Engineers, prepared by CH2MHILL, September 2019. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- CH2MHILL. (2020). Final 2019 Annual Groundwater Remediation Implementation Status Report, Travis Air Force Base, California, prepared for United States Army Corps of Engineers, prepared by CH2MHILL, October 2020. Ανάκτηση Ιούλιος 3, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- CH2MHILL. (2021). Final 2020 Annual Groundwater Remediation Implementation Status Report, Travis Air Force Base, California, prepared for United States Army Corps of Engineers, prepared by CH2MHILL, September 2021. Ανάκτηση Ιούλιος 3, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- CHEJ (Center for Health, Environment & Justice). (2015). Polluters Pay So Children Can Play, 35th Anniversary Report, December 2015. Retrieved Ιούλιος 1, 2022, from <https://chej.org/wp-content/uploads/Executive-Summary-35th-Ann-Report.pdf>
- DOD (Department of Defence). (2017). FY 2017 Secretary of Defense Environmental Awards, Environmental Restoration-Installation, Travis Air Force Base. Ανάκτηση

Ιούλιος 1, 2022, από <https://denix.osd.mil/awards/previous-years/fy16secdef/environmental-restoration-installation/travis-air-force-base-california/>

- Ellis, Davis E., E. J. Lutz, J. M. Odom, R. J. Buchanan Jr. and C. I. Bartlett, M. D. Lee, M. R. Harkness and K. A. DeWeerd. (2000). Bioaugmentation for Accelerated In Situ Anaerobic Bioremediation. *Environmental Science and Technology*, 34(11), 2254-226.
- ESTCP (Environmental Security Technology Certification Program). (2017). Final Report: Post-Remediation Evaluation of EVO Treatment - How Can We Improve Performance?, Project ER-201581, November 2017. Retrieved Ιούλιος 1, 2022, from <https://clu-in.org/download/contaminantfocus/tce/tce-bio-ER-201581-FR.pdf>
- ESTCP (Environmental Security Technology Certification Program). (2020). Final Report: Performance Assessment of Past Bioremediation Approaches for Chlorinated Solvent Source Zones, Project ER-201427, December 2020. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://clu-in.org/download/techfocus/bio/ER-201427-Final-Report.pdf>
- FPM (FPM Remediations). (2012). Amended Post-Closure Plan (Revision 7) for Former Facility 87, Newark Air Force Base, Ohio, prepared for Air Force Civil Engineer Center, prepared by FPM Remediations, Inc., August 2012. Ανάκτηση Ιούλιος 4, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- FPM (FPM Remediations). (2015). Annual Groundwater Monitoring and Corrective Action Effectiveness Report for 2014, Former Facility 87, Newark Air Force Base, Ohio, prepared for Air Force Civil Engineer Center, prepared by FPM Remediations, Inc., February 2015. Ανάκτηση Ιούλιος 5, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- Guerra P., Bauer A., Reiss R. A. and McCord J. (2021). In Situ Bioremediation of a Chlorinated Hydrocarbon Plume: A Superfund Site Field Pilot Test. *Applied Sciences*, 11(21).
- IT (International Technology Corporation). (2001). 2000 Annual Grounwater Monitoring Report, Former Facility 87, Newark Air Force Base, Ohio, prepared for United States Air Force Center for Environmental Excellence, prepared by IT Corporation, February 2001. Ανάκτηση Ιούλιος 4, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2007a). Area 5 Monitoring Report (Through August 2007), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., December 2007. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2007b). Area 6 Monitoring Report (Through February 2007), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., May 2007. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2007c). Area 6 Monitoring Report (Through March 2007), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., June 2007. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>

- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2008a). Area 5 Monitoring Report (Through January 2008), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., June 2008. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2008b). Area 5 Monitoring Report (Through September 2008), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., December 2008. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2008c). Area 6 Monitoring Report (Through February 2008), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., May 2008. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2008d). Area 6 Monitoring Report (Through February 2008), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., October 2008. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2008e). Basewide Five-Year Reviews, Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of the Air Force, Dover Air Force Base, submitted by URS Group, Inc., September 2008. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://semspub.epa.gov/work/03/2095828.pdf>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2009a). Area 5 Monitoring Report (Through August 2009), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., December 2009. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2009b). Area 6 Monitoring Report (Through December 2008), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., May 2009. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2009c). Area 5 Monitoring Report (Through February 2009), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., June 2009. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2009d). Area 6 Monitoring Report (Through June 2009), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS, Inc., December 2009. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2010a). Area 6 Monitoring Report (Through June 2010), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., December 2010. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>

- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2010b). Area 6 Monitoring Report (Through December 2009), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., April 2010. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2011a). Area 5 Monitoring Report (Through March 2011), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of The Air Force, submitted by URS Group, Inc., July 2011. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2011b). Area 5 Monitoring Report (Through September 2010), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., January 2011. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2011c). Area 6 Monitoring Report (January 2011 Event), Dover Air Force Base, Delaware, June 2011, prepared for United States Department of Energy. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, from <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2011d). Area 6 Monitoring Report (June 2011 Event), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., December 2011. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2012a). Area 5 Monitoring Report (Through March 2012), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of The Air Force, submitted by URS Group, Inc., May 2012. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2012b). Area 5 Monitoring Report (Through September 2011), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of The Air Force, submitted by URS Group, Inc., January 2012. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2012c). Area 5 Monitoring Report (Through September 2012), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of The Air Force, submitted by URS Group, Inc., November 2012. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2012d). Area 6 Monitoring Report (January 2012 Event), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., June 2012. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2013a). Area 5 Monitoring Report (Through March 2013), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., July 2013. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2013b). Area 6 Monitoring Report (August 2012 Event), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of

- Energy, submitted by URS Group, Inc., January 2013. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2013c). Area 6 Monitoring Report (January 2013 Event), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., August 2013. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2013d). Area 6 Monitoring Report (June 2013 Event), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., November 2013. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2013e). Basewide Five-Year Reviews for Dover Air Force Base, Delaware, Volume III-West Manegment Unit, prepared for United States Department Of the Air Force, Dover Air Force Base, submitted by URS Group, Inc., September 2013. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://semspub.epa.gov/src/document/03/2181862>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2014a). Area 5 Monitoring Report (October 2014 Sampling Event), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of the Air Force, submitted by URS Group, Inc., December 2014. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2014b). Area 5 Monitoring Report (Through March 2014), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of the Air Force, submitted by URS Group, Inc., September 2014. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2014c). Area 6 Monitoring Report (January 2014 Event), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., July 2014. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2014d). Area 6 Monitoring Report (July 2014 Sampling Event), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., November 2014. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2015a). Area 5 Monitoring Report (Through April 2015), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of the Air Force, submitted by URS Group, Inc., August 2015. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2015b). Area 6 Monitoring Report (January 2015 Event), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by URS Group, Inc., June 2015. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2015c). Area 6 Monitoring Report (October 2015 Sampling Event), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States

- Department of Energy, submitted by AECOM Technical Services, Inc., December 2015. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afceec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2017). Area 6 Monitoring Report (March 2017 Sampling Event), Dover Air Force Base, Delaware, June 2017, prepared for United States Department of Energy. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afceec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2018a). Area 6 Monitoring Report (February 2018 Sampling Event), Dover Air Force Base, Delaware, July 2018, prepared for United States Department of Energy. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, from <https://ar.afceec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2018b). Basewide Five-Year Reviews, Volume III-West Management Unit, Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of the Air Force, Dover Air Force Base, submitted by AECOM Technical Services, Inc., October 2018. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://semspub.epa.gov/work/03/2275663.pdf>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2019). Area 6 Monitoring Report (February 2019 Sampling Event), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by AECOM Technical Services, Inc., June 2019. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afceec-cloud.af.mil/>
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2020). Area 6 Monitoring Report (October 2019 Sampling Event), Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of Energy, submitted by AECOM Technical Services, Inc., February 2020. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afceec-cloud.af.mil/>
- Parsons (Parsons Corporations). (2004). Principles and Practices of Enhanced Anaerobic Bioremediation of Chlorinated Solvents, August 2004, prepared for AFCEE. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://frtr.gov/matrix/documents/Enhanced-In-Situ-Reductive-Dechlorinated-for-Groundwater/2004-Principles-and-Practices-of-Enhanced-Anaerobic-Bioremediation-of-Chlorinated-Solvents.pdf>
- Parsons. (2007). Cost and Performance Report: Enhanced In-Situ Anaerobic Bioremediation of Chlorinated Solvents at FF-87, Former Newark Air Force Base, Ohio, prepared for Air Force Center for Engineering and the Environment, June 2007. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από https://frtr.gov/costperformance/pdf/Newark_FF87_CPR_2007_r2.pdf
- Parsons. (2009). Annual Ground Water Report for January through December 2008, Former Facility 87, Former Newark Air Force Base, Ohio, prepared for Air Force Center for Engineering and the Environment, prepared by Parsons, February 2009. Ανάκτηση Ιούλιος 4, 2022. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afceec-cloud.af.mil/>
- Parsons. (2010). Annual Ground Water Report for January through December 2009, Former Facility 87, Former Newark Air Force Base, Ohio, prepared for Air Force Center for Engineering and the Environment, prepared by Parsons, February 2010. Ανάκτηση Ιούλιος 4, 2022. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afceec-cloud.af.mil/>

- Parsons. (2021). Draft Final 2020 Remedial Action Report 2020 Data, SS032-Former Weapons Maintenance Area SS032, Columbus Air Force Base, Mississippi, prepared for United States Army Corps of Engineers, Tulsa District, prepared by Parsons Government Services, September 2021. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- USACE (United States Army Corps of Engineers). (2006a). Record of Decision for Sites OT51, OT50, SS20, OT44, OT41/Motor Pool and Area 5, West Management Unit, Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of the Air Force, submitted by URS Group Inc., March 2006. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://semspub.epa.gov/work/03/2122445.pdf>
- USACE (United States Army Corps of Engineers). (2006b). Record of Decision for Sites WP21, WP31, ST34, OT41/Bldg. 719, OT48, SS59, OT28 and Area 6, West Management Unit, Dover Air Force Base, Delaware, prepared for United States Department of the Air Force, submitted by URS Group Inc., January 2006. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://semspub.epa.gov/work/03/2122448.pdf>
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (1996). Unique Field Laboratory to Research, Developments in Innovative Ground Water Treatment, Ground Water Currents, EPA-542-N-96-003. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2002, από <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/2000L2M5.PDF?Dockey=2000L2M5.PDF>
- USACE (United States Army Corps of Engineers), 1995. Final Area 6 Focused Feasibility Study, Dover Air Force Base, September 1995, prepared for United States of the Air Force, Dover Air Force Base, Delaware, submitted by Dames & Moore, Inc.. Ανάκτηση Μάρτιος 1, 2022, από <https://ar.afcec-cloud.af.mil/>
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (1998). Technical Protocol for Evaluating Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Ground Water. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://clu-in.org/download/remed/protocol.pdf>
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2000). Engineered approaches to in situ bioremediation of chlorinated solvents: Fundamentals and field applications, EPA 542-R-00-008. Ανάκτηση Ιούλιος 6, 2022, από <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/engappinsitbio.pdf>
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2009). National Primary Drinking Water Regulations, EPA 816-F-09-004. Ανάκτηση Ιούλιος 2, 2022, από https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-06/documents/npwdr_complete_table.pdf
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2011). This is Superfund: A Community Guide to EPA's Superfund Program. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://semspub.epa.gov/work/HQ/175197.pdf>
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2013). Superfund Remedy Report. Solid Waste and Emergency Response, 14th Edition, EPA 542-R-13-016. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από https://clu-in.org/download/remed/ast/14/SRR_14th_2013Nov.pdf

- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2015). Second Five-Year Review Report for North Railroad Avenue Plume Superfund Site Española, Rio Arriba County, New Mexico, prepared by United States Environmental Protection Agency, Region 6, Dallas, Texas, July 2015. Ανάκτηση Ιούλιος 4, 2022, από <https://semspub.epa.gov/work/06/500013621.pdf>
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2017). Superfund Remedy Report, Office of Land and Emergency Management, 15th Edition, EPA-52-R-17-001. Ανάκτηση Ιούλιος 1, 2022, από <https://semspub.epa.gov/work/HQ/100000349.pdf>
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2020). Third Five-Year Review Report for North Railroad Avenue Plume Superfund Site Española, Rio Arriba County, New Mexico, prepared by United States Environmental Protection Agency, Region 6, Dallas, Texas, August 2020. Ανάκτηση Ιούλιος 4, 2022, από <https://semspub.epa.gov/work/06/100021780.pdf>
- Vogel, T.M., C.S. Criddle and P.L. McCarty. (1987). Transformations of halogenated aliphatic compounds. *Environmental Science and Technology*, 21(8), 722-736.
- Voudrias E.A. (2001). Pump and Treat Remediation of Groundwater Contaminated by Hazardous Waste: Can It Really Be Achieved? *Global Nest*, 3(1), 1-10.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

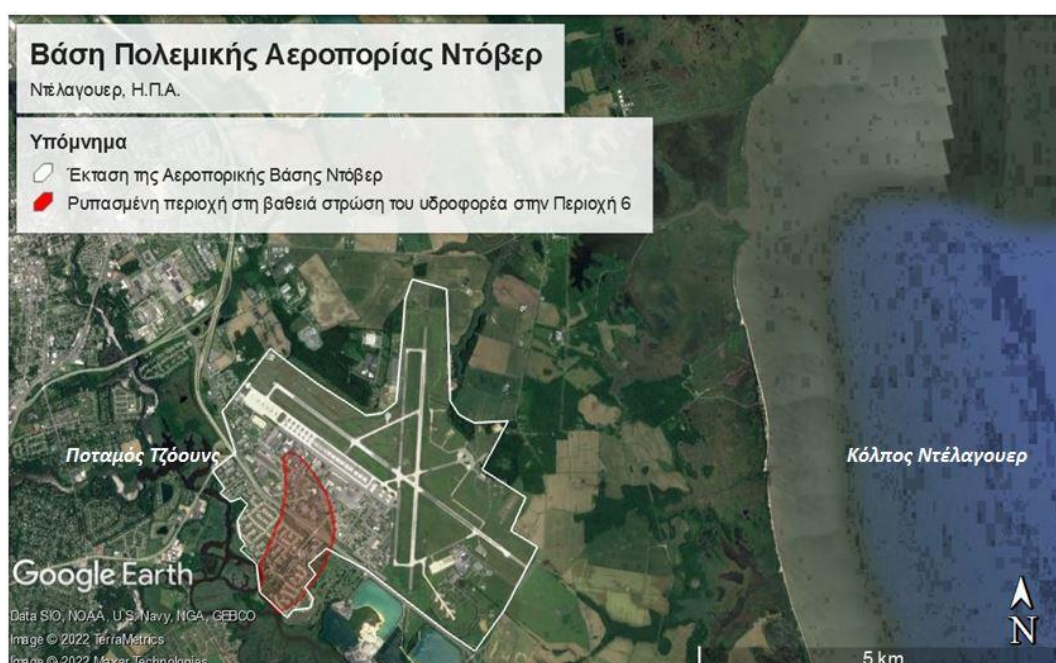
- Ζηκίδη, Β. Μ. (2010). *Συγκριτική Παρουσίαση και Ανάλυση Περιστατικών Βιοαποκατάστασης μέσω Αναερόβιας Αναγωγικής Αποχλωρίωσης*. Αθήνα, Ε.Μ.Π.
- Καββαδάς, Μ. (2013). *Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής*. Αθήνα: Τσότρας.
- Χατζημπίρος, Κ. (2014). *Οικοσυστήματα και Προστασία του Περιβάλλοντος* (Γ' εκδ.). Αθήνα: Συμμετρία.

Παράρτημα Α: Αναλυτική παρουσίαση των πέντε περιστατικών ενισχυμένης αποχλωρίωσης

Στο Παράρτημα αυτό γίνεται εκτενέστερη περιγραφή των πέντε περιστατικών ρύπανσης με χλωριωμένα αιθυλένια που παρουσιάζονται στο Κεφαλαίο 4. Η περιγραφή των χώρων γίνεται με το μορφότυπο: Κατηγορία χώρου, Ρυπογόνος δραστηριότητα, Κύριοι ρύποι, Υδρογεωλογικές συνθήκες, Έργα Αποκατάστασης-Πιλοτική δοκιμή, Αποτελέσματα πιλοτικής δοκιμής, Έργα αποκατάστασης-Εφαρμογή πλήρους κλίμακας, Εκτιμηθείς χρόνος αποκατάστασης, Χρονικό διάστημα παρακολούθησης, Μεταβολή συγκεντρώσεων-Μεταβολή ρυπασμένης έκτασης και Μελλοντικές ενέργειες.

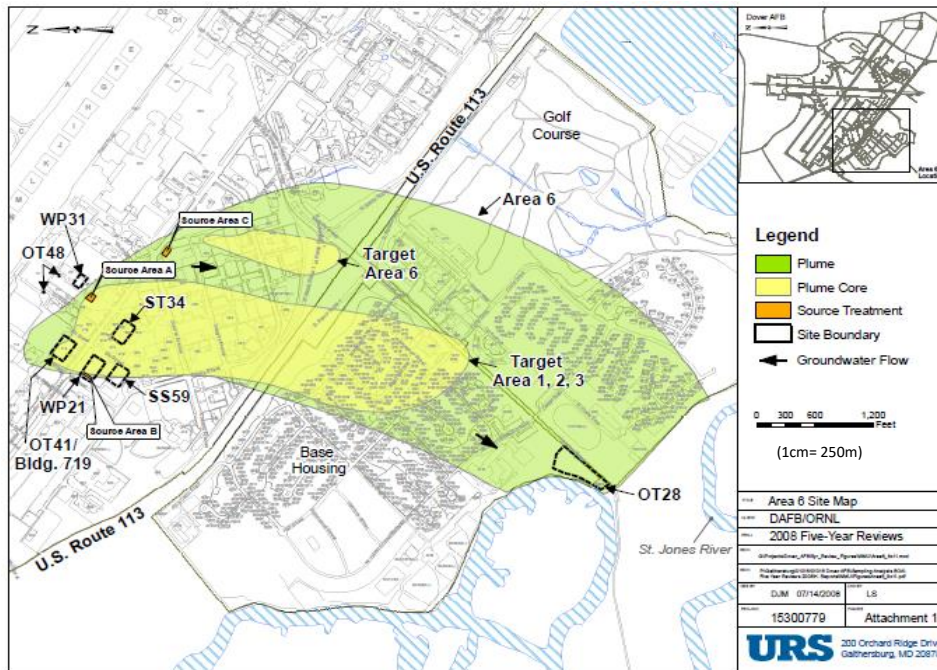
Α.1 Περιστατικό ρύπανσης με χλωριωμένα αιθυλένια: Αεροπορική Βάση Ντόβερ, Περιοχή 6, Ντέλαγουερ, Η.Π.Α.

Κατηγορία χώρου. Η Βάση Πολεμικής Αεροπορίας Ντόβερ βρίσκεται στην πολιτεία Ντέλαγουερ της Αμερικής. Ξεκίνησε να λειτουργεί τον Δεκέμβριο του 1941 και παραμένει ενεργή μέχρι σήμερα. Το 1989 η Αμερικάνικη Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος καταχώρησε τη Βάση Πολεμικής Αεροπορίας Ντόβερ στη Λίστα Χώρων Προτεραιότητας. Η Περιοχή 6 (Area 6) περιλαμβάνει τις υποενοότητες διαχείρισης της ρύπανσης 10, 11 και 12 (Operable Units 10,11,12).



Σχήμα Α.1.1 Φωτογραφία της ευρύτερης περιοχής της Αεροπορικής Βάσης Ντόβερ μαζί με τη ρυπασμένη έκταση της Περιοχής 6 στη βαθειά στρώση πριν από την έναρξη της εφαρμογής πλήρους κλίμακας το 2006 (από δορυφόρο, Google Earth Pro, 2020-τροποποιημένη)

Ρυπογόνος δραστηριότητα. Στην Περιοχή 6 έχει σημειωθεί η μεγαλύτερη ρύπανση του υπόγειου νερού στο δυτικό τμήμα της Βάσης Ντόβερ. Επτά διαφορετικές πηγές (Σχήμα Α.1.2) έχουν προκαλέσει την ρύπανση του υπόγειου νερού κυρίως με χλωροαιθένια και χλωροαιθάνια και δευτερευόντως με ρύπους που σχετίζονται με αεροπορικά καύσιμα και ένα φυτοφάρμακο (USACE, 2006b). Το Κτίριο 719 θεωρείται πως έχει συνεισφέρει περισσότερο από όλες τις πηγές της Περιοχής 6 στη ρύπανση του υπόγειου νερού. Χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες (κυρίως TCE) χρησιμοποιούνταν κατά τη διενέργεια εργασιών συντήρησης εξοπλισμού αεροσκαφών (διαδικασία αφαίρεσης επιφανειακών ελαίων/λιπαντικών). Εργασίες τέτοιας φύσης λάμβαναν χώρα στο κτίριο κατά τη δεκαετία 1960. Δειγματοληψία το 1993 εντόπισε τη διαρροή ρύπων στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους της τοποθεσίας. Στην τοποθεσία WP21 από το 1963 βρισκόντουσαν δύο τέλματα συγκράτησης βιομηχανικών αποβλήτων που παράγονταν στο Κτίριο 719. Το 1968 στην τοποθεσία εγκαταστάθηκαν ακόμη δύο τέλματα συγκράτησης αποβλήτων από σκυρόδεμα, ώστε να συλλέγονται απόβλητα και από άλλες εγκαταστάσεις της Αεροπορικής Βάσης. Κατά τη δειγματοληψία του εδάφους το 1997 ανιχνεύτηκαν ρύποι στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους της τοποθεσίας. Η τοποθεσία SS59 αποτελεί ανοιχτό χώρο που χρησιμοποιείτο με σκοπό την προσωρινή αποθήκευση υλικών. Αναφέρεται πως ορισμένα από τα υλικά που αποθηκευόντουσαν στην τοποθεσία ενδέχεται να ήταν επικίνδυνα, ωστόσο δεν έχει προσδιοριστεί ο τύπος των υλικών, ούτε οι χρονολογίες για τις οποίες η περιοχή χρησιμοποιείτο με αυτό το σκοπό. Αποτελεί την πηγή της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων με ένα φυτοφάρμακο, το λιντάνιο (lindane). Η SS59 βρίσκεται κατάντη των δύο προαναφερθεισών τοποθεσιών (Κτίριο 719 και WP21) και δεδομένης της κατεύθυνσης ροής, το ρυπασμένο υπόγειο νερό από τις περιοχές αυτές κινείται προς την τοποθεσία SS59. Στην περιοχή αυτή ανιχνεύτηκαν οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις βενζολίου και διχλωροαιθενίου στο υπόγειο νερό κατά τη δειγματοληψία του 1993. Το έτος 1998-1999 περίπου 147 τόνοι επιφανειακού εδάφους αφαιρέθηκαν μέσω σκαπτικού μηχανήματος και αποτεφρώθηκαν εκτός της Βάσης. Η τοποθεσία ασφαλοστρώθηκε με σκοπό την πρόληψη της ανθρώπινης έκθεσης στη ρύπανση, αλλά και τη μείωση της κατέσδυσης της ρύπανσης της ακόρεστης ζώνης στον υδροφόρο ορίζοντα μέσω των όμβριων υδάτων. Στις τοποθεσίες WP31 και ST34 βρισκόντουσαν υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων οι οποίες συνάγεται ότι είχαν διαρροές για άγνωστο χρονικό διάστημα. Η ημερομηνία της εγκατάστασής τους είναι άγνωστη και αφαιρέθηκαν στα τέλη του 1990.



Σχήμα Α.1.2 Τοποθεσίες πηγών ρύπανσης στη ρυπασμένη περιοχή της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Αεροπορικής Βάσης Ντόβερ το 2006 (ORNL, 2008e)

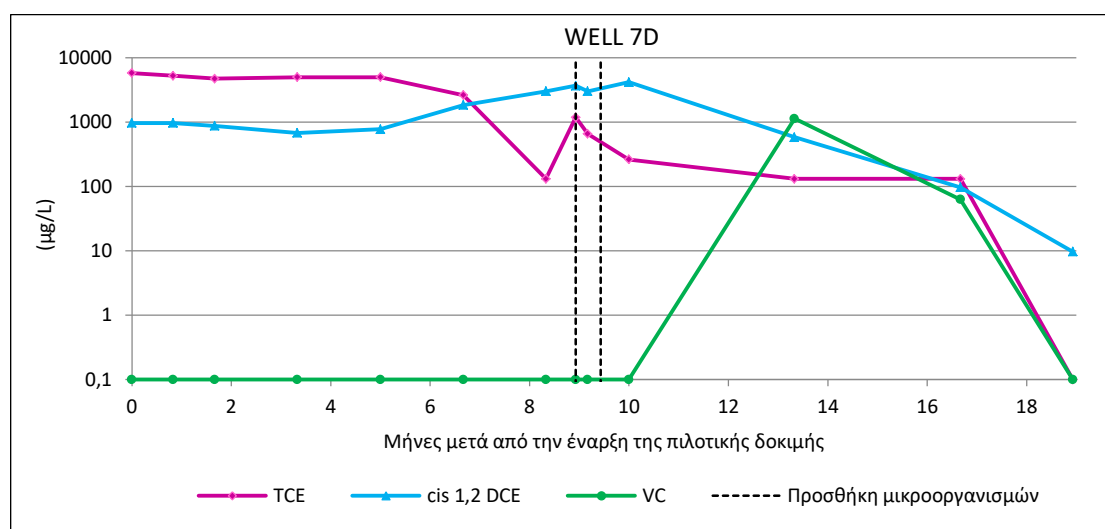
Κύριοι ρύποι. Οι κύριοι ρύποι στην Περιοχή 6 είναι τα χλωροαιθένια, τα χλωροαιθάνια και το βενζόλιο.

Υδρογεωλογικές συνθήκες. Ο εδαφικός σχηματισμός στην περιοχή αποτελείται από άμμο με ιλύ και φακούς αργίλου πάχους περίπου 15 μέτρων. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται στα πρώτα 3-3,5 μέτρα από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Ο υδροφορέας έχει κατεύθυνση ροής προς τα νότια/νοτιοανατολικά και η υδραυλική αγωγιμότητα παίρνει τιμές στο εύρος 10^{-4} - 10^{-6} m/s (USACE, 1995).

Έργα αποκατάστασης-Πιλοτική δοκιμή. Η πιλοτική δοκιμή διήρκεσε περίπου 1.5 χρόνο (9-1996 έως 3-1998) και έλαβε χώρα περίπου 300 μέτρα κατάντη του Κτιρίου 719. Η μέθοδος αποκατάστασης που εφαρμόστηκε ήταν η βιοεπαύξηση. Οι μικροοργανισμοί που χορηγήθηκαν ήταν της κοινότητας Pinellas από περιστατικό αποχλωρίωσης στο Λάργκο της Φλόριδα. Στόχος της πιλοτικής δοκιμής ήταν να εξακριβωθεί εάν η αποχλωριωτική διαδικασία μπορεί να συνεχιστεί μέχρι και το τελικό στάδιο του αιθενίου στη βαθιά στρώση του υδροφορέα. Ο δότης που χρησιμοποιήθηκε αποτελούσε μείγμα γαλακτικού ανιόντιος και γαλακτοποιημένου φυτικού λαδιού με πόσιμο νερό και θρεπτικά συστατικά (φωσφορικό άλας και αμμωνία). Η χορήγησή του έγινε μέσω συστήματος επανακυκλοφορίας νερού αποτελούμενο από τρία πηγάδια ένεσης και τρία πηγάδια άντλησης συνολικού βάθους 12-15 μέτρων. Έπειτα από πέντε μήνες συνεχούς χορήγησης δότη, η αποχλωριωτική διαδικασία έδειχνε να σταματά στο στάδιο του cis 1,2 DCE. Τότε η ποσότητα του δότη διπλασιάστηκε, αλλά και πάλι η αποχλωριωτική διαδικασία δεν προχώρησε. Εννέα μήνες μετά από την

έναρξη της πιλοτικής δοκιμής έλαβε χώρα η πρώτη προσθήκη μικροοργανισμών. Η δεύτερη προσθήκη μικροοργανισμών πραγματοποιήθηκε μισό μήνα έπειτα από την πρώτη προσθήκη. Ο κύκλος χορήγησης δότη και θρεπτικών συστατικών ήταν ο εξής: για περίπου τέσσερις ημέρες ο δότης χορηγείτο στο υπόγειο νερό που είχε αντληθεί και το τροποποιημένο πλέον υπόγειο νερό εισπνιζόταν στον υδροφορέα μέσω ένεσης σε παρακείμενο πηγάδι του συστήματος. Το σύστημα επανακυκλοφορίας συνέχιζε να λειτουργεί παθητικά για 8 ώρες. Για τις επόμενες περίπου δύο ημέρες χορηγούνταν με τον ίδιο τρόπο τα θρεπτικά συστατικά και ακολουθούσαν ακόμη οκτώ ώρες παθητικής λειτουργίας του συστήματος (Ellis et al., 2000).

Αποτελέσματα πιλοτικής δοκιμής. Κατά τη λήξη της πιλοτικής δοκιμής, οι συγκεντρώσεις TCE, cis 1,2 DCE και VC στο υπόγειο νερό ήταν σε μη ανιχνεύσιμα επίπεδα. Στο Σχήμα A.1.3 παρουσιάζεται η μεταβολή των συγκεντρώσεων των χλωροαιθενίων σύμφωνα με τις μετρήσεις δειγματοληπτικού πηγαδιού στην περιοχή υλοποίησης της πιλοτικής δοκιμής. Ο οριζόντιος άξονας συμβολίζει τους μήνες που έχουν περάσει από την έναρξη της πιλοτικής δοκιμής. Η χορήγηση του μείγματος δοτών ήταν συνεχόμενη καθόλη τη διάρκεια της πιλοτικής δοκιμής.



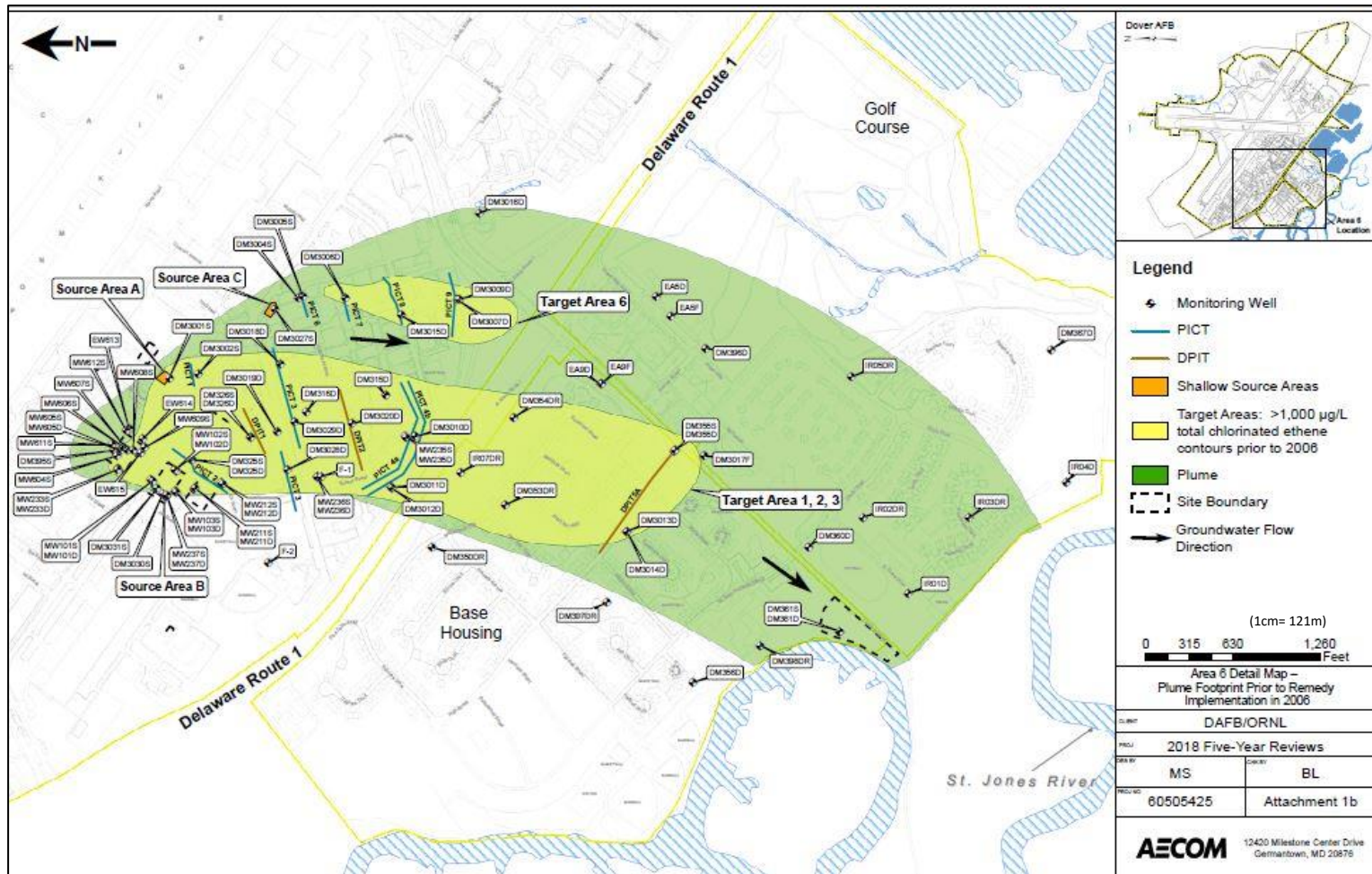
Σχήμα A.1.3 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης WELL 7D κατά τη διενέργεια πιλοτικής δοκιμής στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (Ellis et al., 2000)

Έργα αποκατάστασης-Πλήρης κλίμακα. Η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης στην Περιοχή 6 είναι η βιοδιέγερση συνδυαστικά με ενδογενή αποχλωρίωση. Οι χορηγήσεις δότη πραγματοποιούνται εντός των περιοχών-στόχων (Target Areas 1, 2, 3 και 6, Σχήμα A.1.4). Ο δότης αποτελεί μείγμα γαλακτικού ανιόντιος και γαλακτοποιημένου φυτικού λαδιού με θρεπτικά συστατικά (φωσφορικό άλας και αμμωνία) και πόσιμο νερό, όπως και στην πιλοτική δοκιμή του 1996. Η χορήγηση του μείγματος δοτών γίνεται με τις εξής μεθόδους:

- Απευθείας χορήγηση μέσω σημείων εισπίεσης στις Πηγές Α, Β και Γ (Source Areas Α, Β και C)

- Χορήγηση μέσω πηγαδιών ένεσης στην τοποθεσία του Κτιρίου 719
- Χορήγηση μέσω συστημάτων επανακυκλοφορίας νερού σε εννέα διατομές (Plume Injection Circulation Transects-PICTs) εγκατεστημένες κάθετα στην κατεύθυνση κίνησης υπόγειου νερού
- Απευθείας εισπίεση σε τρεις διατομές εγκατεστημένες κάθετα στην κατεύθυνση κίνησης υπόγειου νερού (Direct Push Injection Transects- DPITs)

Στόχοι αποκατάστασης. Το όριο αποκατάστασης για το PCE είναι τα 5 µg/L, για τα TCE και VC το 1 µg/L και για το cis 1,2 DCE τα 70 µg/L. Ο ενδιάμεσος στόχος αποκατάστασης αφορά στη μείωση του αθροίσματος των συγκεντρώσεων όλων των χλωροαιθενίων, τόσο στη ρηχή όσο και στη βαθιά στρώση, σε τιμή μικρότερη των 500 µg/L. Όταν επιτευχθεί ο ενδιάμεσος στόχος της αποκατάστασης, η μέθοδος αποκατάστασης που θα εφαρμοστεί στην Περιοχή 6 θα είναι αποκλειστικά η ενδογενής αποχλωρίωση έως ότου επιτευχθούν οι συγκεντρώσεις-στόχοι των ρύπων (USACE, 2006b).



Σχήμα Α.1.4 Τοποθεσίες συστημάτων αποκατάστασης και πηγαδιών παρακολούθησης πριν την εφαρμογή πλήρους κλίμακας το 2006 στη ρυπασμένη περιοχή της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Αεροπορικής Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2018b)

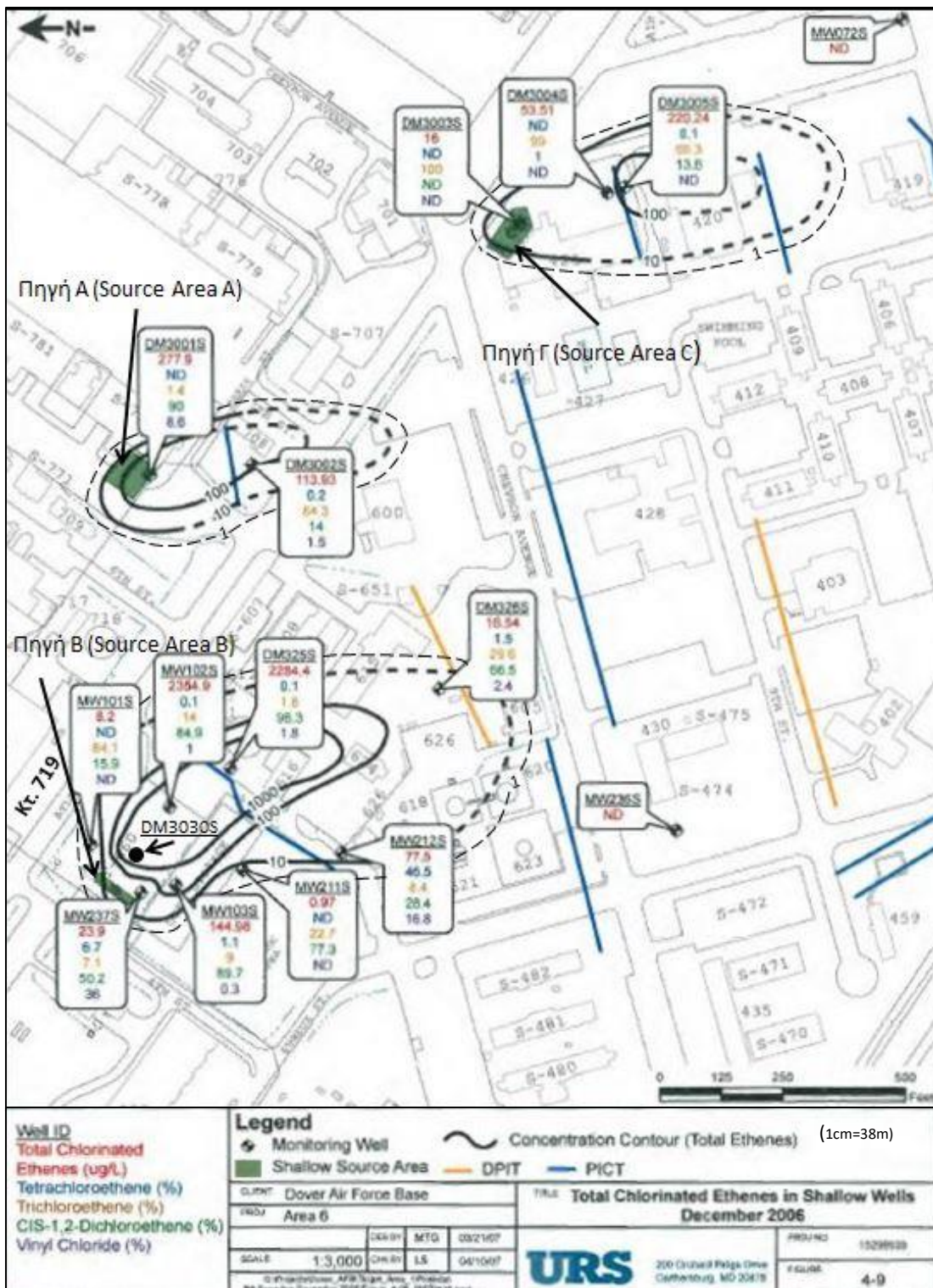
Εκτιμηθείς χρόνος αποκατάστασης. Ο εκτιμηθείς χρόνος ολοκλήρωσης της αποκατάστασης ήταν (i) 6 έως 22 χρόνια για τις υποπεριοχές όπου η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η βιοδιέγερση και (ii) παραπάνω από 50 έτη για τις υποπεριοχές όπου η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η ενδογενής αποχλωρίωση (USACE, 2006b).

Χρονικό διάστημα παρακολούθησης. Η παρακολούθηση συνεχίζεται μέχρι σήμερα και η εφαρμογή πλήρους κλίμακας βρίσκεται σε εξέλιξη. Οι τελευταίες διαθέσιμες μετρήσεις στην Περιοχή 6 πραγματοποιήθηκαν το Φεβρουάριο του 2020.

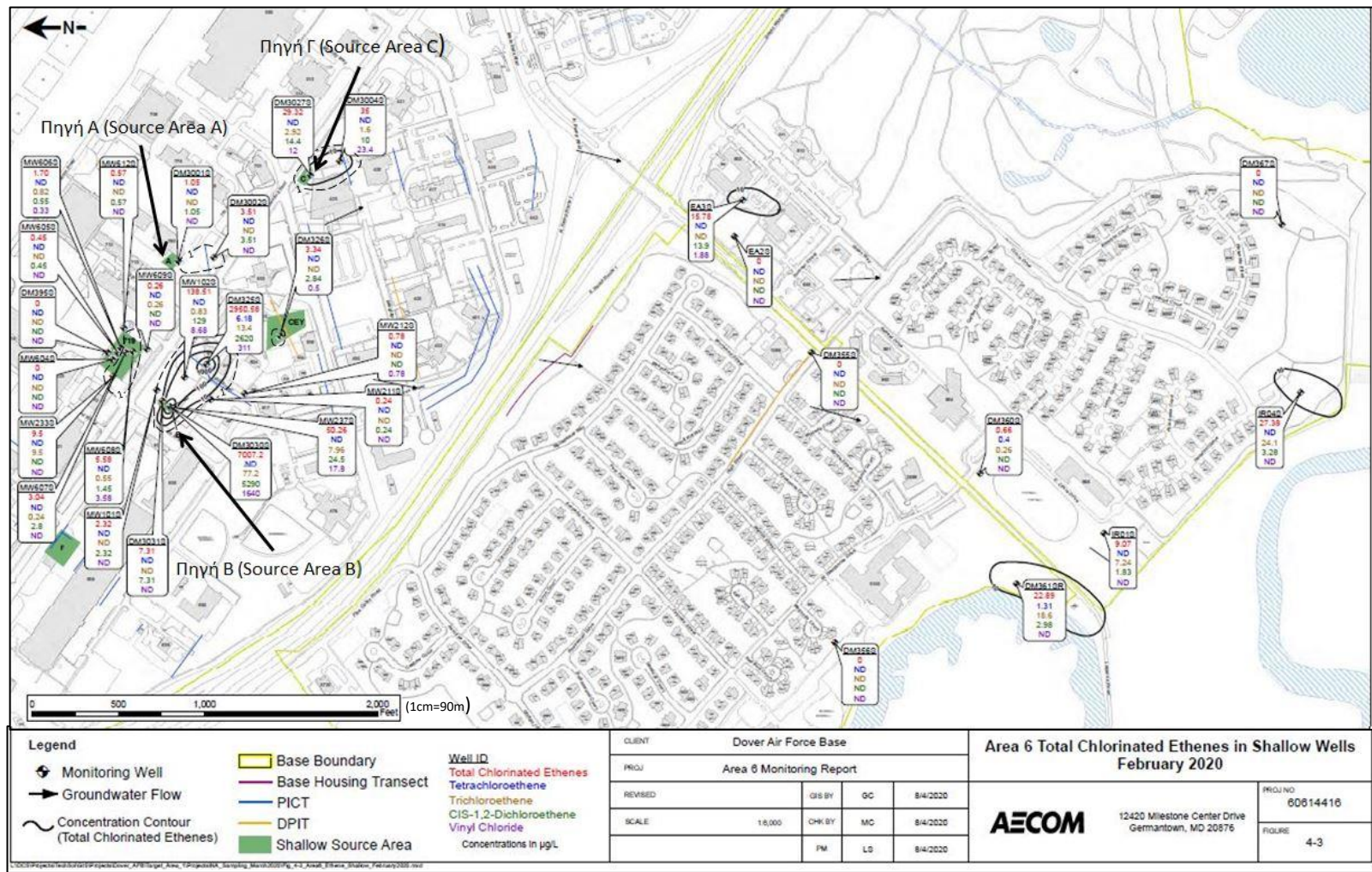
Μεταβολή συγκεντρώσεων-Μεταβολή ρυπασμένης έκτασης. Κατά τις αρχικές συνθήκες, η ρύπανση στην ρηχή στρώση εκτεινόταν σε τρεις διακριτές περιοχές (Πηγές Α, Β και Γ).

Στην Πηγή Β η μέγιστη συγκέντρωση ήταν ίση με 16,600 µg/L, αφορούσε στο cis 1,2 DCE και η ρύπανση εκτεινόταν για περίπου 400 μέτρα. Στις Πηγές Γ και Α οι μέγιστες συγκεντρώσεις ήταν ίσες με 710 µg/L και 280 µg/L αντίστοιχα και αμφότερες αφορούσαν στο TCE. Στην Πηγή Γ η ρύπανση εκτεινόταν για περίπου 170 μέτρα και στην Πηγή Α για περίπου 215 μέτρα. Το 2020 στην Πηγή Β έχει σημειωθεί μείωση της έκτασης περίπου κατά 55% και μείωση των μέγιστων συγκεντρώσεων κατά μία τάξη μεγέθους (από τα 16,600 µg/L στα 5,290 µg/L για το cis 1,2 DCE). Η ρυπασμένη έκταση της Πηγής Α το 2020 έχει αποκατασταθεί πλήρως (μείωση συγκεντρώσεων κατά δύο τάξεις μεγέθους), ενώ η ρυπασμένη έκταση της Πηγής Γ έχει μειωθεί κατά 45% και οι μέγιστες συγκεντρώσεις έχουν σημειώσει μείωση κατά μία τάξη μεγέθους (από τα 710 µg/L για το TCE στα 23 µg/L για το VC το 2020).

Στα Σχήματα A.1.5 και A.1.6 δίνονται οι ρυπασμένες περιοχές στη ρηχή στρώση του υδροφορέα τα έτη 2006 και 2020 αντίστοιχα. Λόγω μεγαλύτερης πληρότητας μετρήσεων και λόγω σήμανσης όλων των πηγαδιών παρακολούθησης της περιοχής, στο Σχήμα A.1.5 παρουσιάζονται οι ρυπασμένες περιοχές της ρηχής στρώσης και οι μετρήσεις που έλαβαν χώρα το Δεκέμβριο 2006. Οι ρυπασμένες εκτάσεις του Μαρτίου 2006 παρουσιάζονται στην πρώτη Αναφορά Προόδου Πενταετίας του περιστατικού το 2008. Επίσης σημειώνεται ότι η μέγιστη συγκέντρωση στη ρηχή στρώση (16,600 µg/L) καταγράφηκε στην πρώτη δειγματοληψία νέου πηγαδιού παρακολούθησης της Πηγής Β (πηγάδι παρακολούθησης DM3030S, Σχήμα A.1.7) στις αρχές του 2008 και για το λόγο αυτό δεν είχε σημειωθεί η περιβάλλουσα των 10,000 µg/L στη ρυπασμένη περιοχή της ρηχής στρώσης το 2006. Βάσει των μετρήσεων της κάθε χρονολογίας, στα Σχήματα A.1.5 και A.1.6 έχει σχεδιαστεί η περιβάλλουσα του 1 µg/L, που αποτελεί το όριο αποκατάστασης για τα TCE και VC.

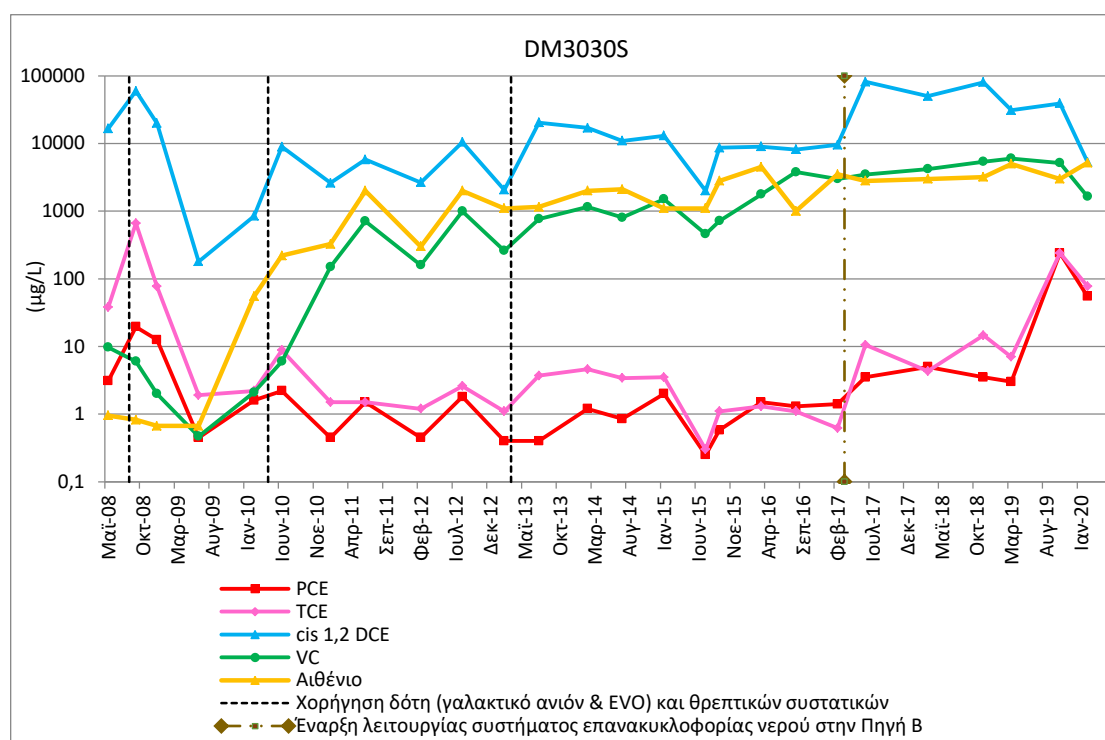


Σχήμα Α.1.5 Ρυπασμένες περιοχές με χλωροαιθένη στη ρηχή στρώση το 2006 στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (AECOM, 2007b-τροποποιημένο)



Σχήμα Α.1.6 Ρυπασμένες περιοχές με χλωροαιθέρια στη ρηχή στρώση το 2020 στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (AECOM, 2020d-τροποποιημένο)

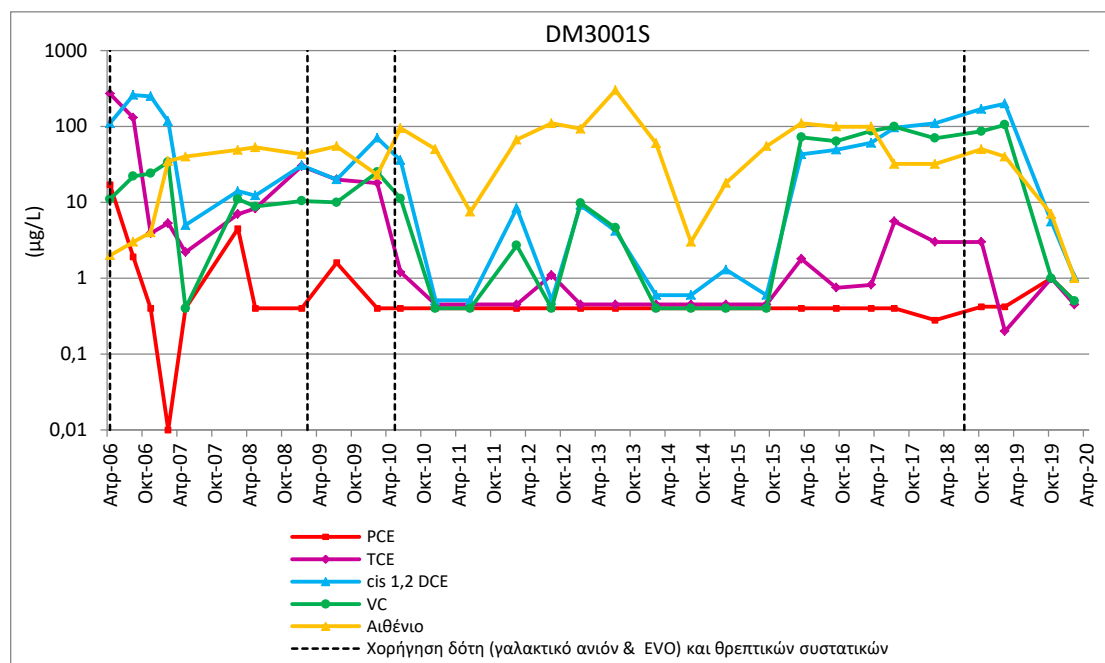
Στη ρηχή στρώση και συγκεκριμένα στην Πηγή Β είχαν πραγματοποιηθεί τρεις προσθήκες δότη μέσω εισπίεσης μέχρι το 2013. Κατά το χρονικό διάστημα 2013-2016 η συγκέντρωση cis 1,2 DCE στο πηγάδι παρακολούθησης DM3030S παρέμενε σταθερά σε τιμές της τάξεως των 10,000 µg/L (βλέπε Σχήμα Α.1.7). Εφόσον η πρόοδος δεν ήταν η αναμενόμενη, το 2016 διεξήχθη περαιτέρω έρευνα στην περιοχή, το πόρισμα της οποίας ήταν ότι η διαρροή δεν έχει σταματήσει (ORNL, 2018b). Έτσι, στις αρχές του 2017 εγκατάστηθηκαν δύο νέα πηγάδια άντλησης και οκτώ νέα πηγάδια ένεσης με σκοπό τη χορήγηση δότη μέσω συστήματος επανακυκλοφορίας νερού στην Πηγή Β. Ο χορηγούμενος δότης μέσω του συστήματος είναι το γαλακτικό ανιόν. Έκτοτε η συγκέντρωση cis 1,2 DCE έχει μειωθεί στα 5,290 µg/L, ωστόσο οι συγκεντρώσεις των πρωτογενών χλωροαιθινίων έχουν αυξηθεί κατά μία με δύο τάξεις μεγέθους και η συγκέντρωση του αιθέριου παραμένει σταθερά σε αυξημένες τιμές. Τα γεγονότα αυτά υποδηλώνουν ότι η αποχλωριωτική διαδικασία δεν έχει προχωρήσει μέχρι την πλέον πρόσφατη μέτρηση. Το πηγάδι παρακολούθησης DM3030S κατατάσσεται στα πηγάδια με συμπεριφορά στασιμότητα.



Σχήμα Α.1.7 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3030S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόμπερ (ORNL, 2007b; 2007c; 2008c; 2008d; 2008e; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2017; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM, 2016c; 2018a; 2020c; 2020d)

Στο Σχήμα Α.1.8 παρουσιάζεται η μεταβολή των συγκεντρώσεων των χλωροαιθινίων κατά το διάστημα 2006-2020 στο πηγάδι παρακολούθησης DM3001S της ρηχής στρώσης του υδροφορέα (Πηγή Α). Αν και κατά το χρονικό διάστημα 2013-2015 οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθινίων στο συγκεκριμένο πηγάδι ήταν μικρότερες από τις αντίστοιχες

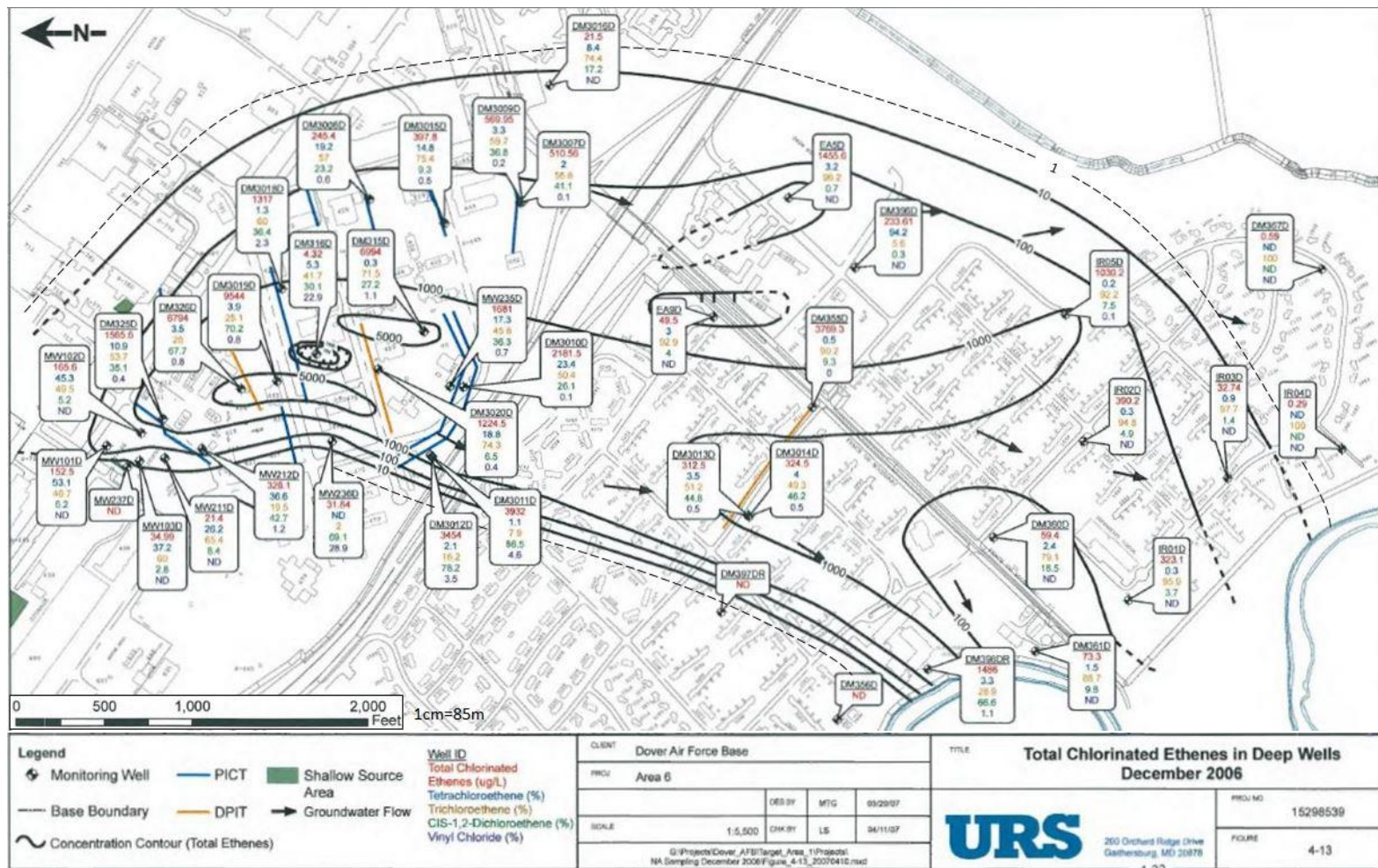
συγκεντρώσεις-στόχους, οι συγκεντρώσεις των cis 1,2 DCE και VC αυξήθηκαν απότομα κατά δύο τάξεις μεγέθους το φθινόπωρο του 2016. Έτσι, το 2018 πραγματοποιήθηκε μία ακόμη προσθήκη δότη στην Πηγή Α και το 2020 οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθινίων μειώθηκαν ξανά. Το πηγάδι παρακολούθησης DM3001S συγκαταλέγεται στα πηγάδια με συμπεριφορά υποτροπή.



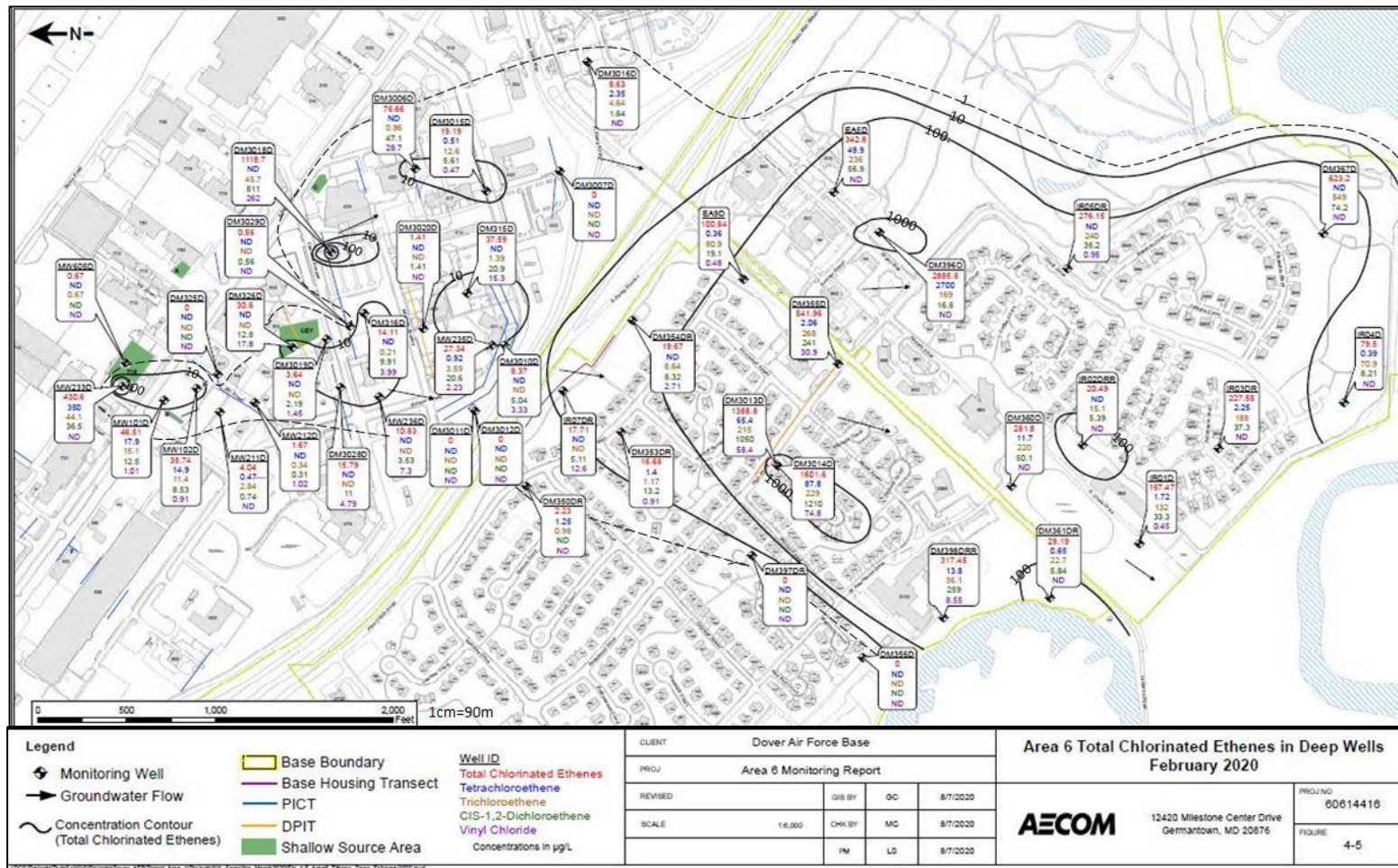
Σχήμα Α.1.8 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3001S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007b; 2007c; 2008c; 2008d; 2008e; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2017; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM, 2016c; 2018a; 2020c; 2020d)

Στη βαθειά στρώση, κατά τις αρχικές συνθήκες η μέγιστη συγκέντρωση ήταν ίση με 9,300 µg/L και αφορούσε στο cis 1,2 DCE. Το 2020 στη βαθειά στρώση η ρυπασμένη έκταση με συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του 1 µg/L παραμένει περίπου η ίδια, με τη μέγιστη συγκέντρωση να είναι της τάξεως των 1,000 µg/L και να καταγράφεται αποκλειστικά σε δύο πηγάδια παρακολούθησης (DM3013D και DM3014D, Σχήμα Α.1.10) για το cis 1,2 DCE (1,210 µg/L και 1,050 µg/L αντίστοιχα). Εκτός από αυτά τα δύο πηγάδια, στην περιοχή των οποίων η προσπάθεια αποκατάστασης δεν ήταν εντατική αφού το μείγμα δοτών εισπιάστηκε μόνο μία φορά στη βαθειά στρώση κατά την έναρξη της εφαρμογής, κατά σειρά οι αμέσως επόμενες μέγιστες συγκεντρώσεις σε δύο πηγάδια παρακολούθησης είναι ίσες με 811 µg/L (για το cDCE στο πηγάδι DM3018D, Σχήμα Α.1.10) και 268 µg/L (για το TCE στο πηγάδι DM355D, Σχήμα Α.1.10). Όλα τα υπόλοιπα πηγάδια παρακολούθησης της βαθειάς στρώσης το 2020 έχουν μέγιστες συγκεντρώσεις της τάξεως των 10 µg/L και αφορούν στο VC. Στα Σχήματα Α.1.9 και Α.1.10 δίνονται οι ρυπασμένες περιοχές στη βαθειά στρώση του

υδροφορέα τα έτη 2006 και 2020 αντίστοιχα. Στα Σχήματα Α.1.9 και Α.1.10 έχει σχεδιαστεί και η περιβάλλουσα του 1 μg/L, που αποτελεί το όριο αποκατάστασης για τα TCE και VC.

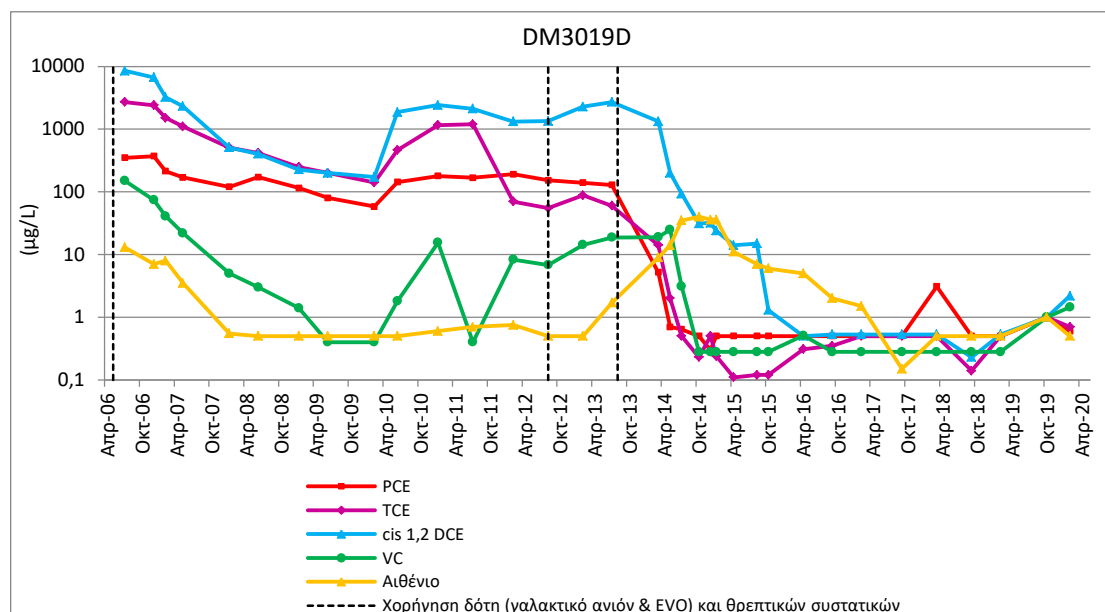


Σχήμα Α.1.9 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένια στη βαθιά στρώση το 2006 στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007b-τροποποιημένο)



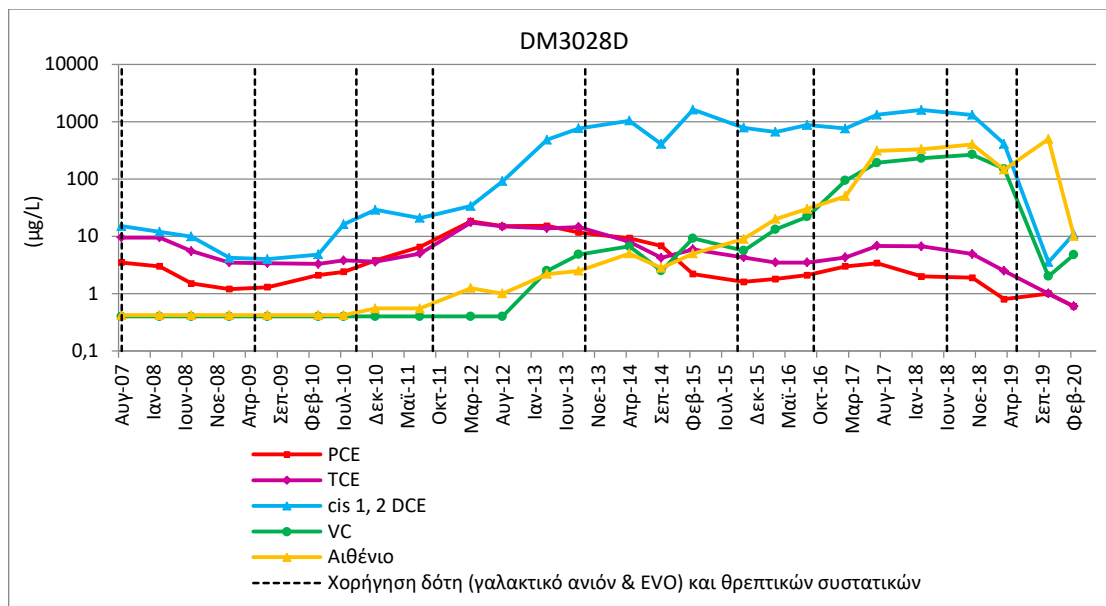
Σχήμα Α.1.10 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένα στη βαθιά στρώση το 2020 στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (AECOM, 2020d-τροποποιημένο)

Αντίστοιχα, στα Σχήματα Α.1.11 και Α.1.12 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές μετρήσεων των πηγαδιών παρακολούθησης DM3019D και DM3028D στη βαθιά στρώση του υδροφορέα. Στο DM3019D, οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθινίων μειώθηκαν μετά από τον τρίτο γύρο χορήγησης δότη το 2013 και από τα τέλη του 2014 μέχρι τα τέλη του 2019 παρέμειναν σε συγκεντρώσεις μικρότερες των ορίων αποκατάστασης. Το πηγάδι παρακολούθησης DM3019D κατατάσσεται στα πηγάδια παρακούθησης με συμπεριφορά υστέρησης.



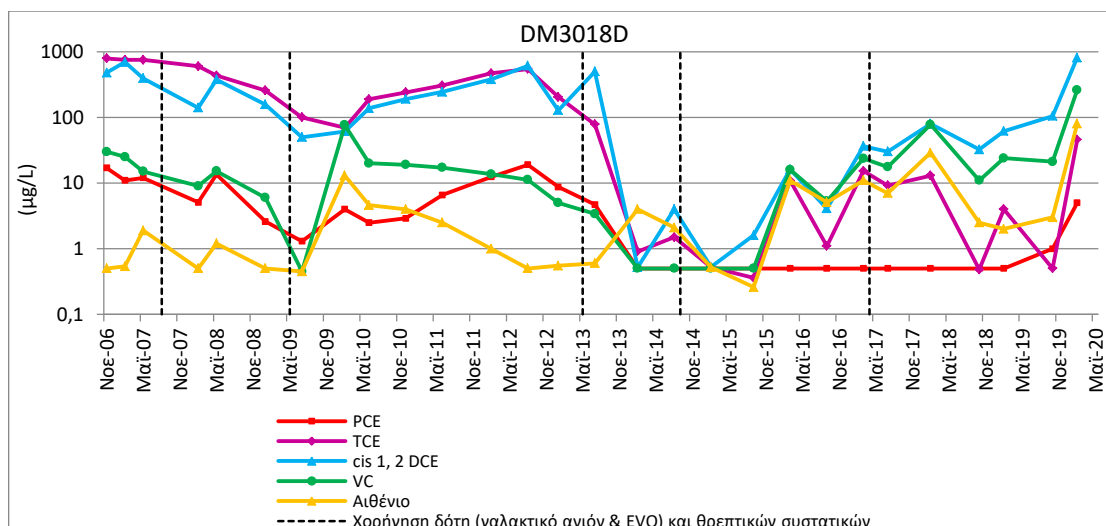
Σχήμα Α.1.11 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3019D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007b; 2007c; 2008c; 2008d; 2008e; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2017; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM, 2016c; 2018a; 2020c; 2020d)

Το δειγματοληπτικό πηγάδι DM3028D (Σχήμα Α.1.12) βρίσκεται κατάντη του συστήματος επανακυκλοφορίας #3 (PICT 3) στη βαθιά στρώση του υδροφορέα. Αν και κατά την έναρξη της αποκατάστασης το 2006 οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθινίων ήταν σε χαμηλά επίπεδα (της τάξεως των 10 µg/L), από τις αρχές του 2010 ξεκίνησαν να καταγράφονται αυξητικές τάσεις των συγκεντρώσεων των χλωροαιθινίων. Το 2018 διεξήχθη περαιτέρω έρευνα στην τοποθεσία του πηγαδιού, κατά την οποία δεν προσδιορίστηκε κάποια πηγή ρύπανσης. Παρά το γεγονός ότι το πηγάδι αυτό βρίσκεται αμέσως κατάντη του PICT 3, θεωρείται πως η κατανομή του δότη μέσω του συστήματος δεν ήταν επαρκής. Με σκοπό την αποκατάσταση του ρυπασμένου υπόγειου νερού στη βαθιά στρώση και επικουρικά της λειτουργίας του συστήματος επανακυκλοφορίας νερού στη συγκεκριμένη τοποθεσία, τον Μάιο του 2019 δότης (μείγμα γαλακτικού ανιόντος και γαλακτοποιημένου φυτικού λαδιού με θρεπτικά συστατικά) χορηγήθηκε ανάντη του πηγαδιού DM3028D μέσω 32 σημείων εισπίεσης. Οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθινίων το 2020 μειώθηκαν σε τιμές τις τάξεως των 10 µg/L. Το πηγάδι παρακολούθησης DM3028D κατατάσσεται στα πηγάδια παρακούθησης με συμπεριφορά υστέρησης.



Σχήμα Α.1.12 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3028D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007b; 2007c; 2008c; 2008d; 2008e; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2017; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM, 2016c; 2018a; 2020c; 2020d)

Μέχρι τα τέλη του 2014 στην τοποθεσία του πηγαδιού DM3018D είχαν πραγματοποιηθεί τέσσερις προσθήκες δότη μέσω συστήματος επανακυκλοφορίας νερού και είχαν επιτευχθεί οι συγκεντρώσεις-στόχοι για όλα τα χλωροαιθένια. Κατά τα τέλη του 2015 οι συγκεντρώσεις των TCE, cis 1,2 DCE και VC ξεκίνησαν να έχουν αυξητικές τάσεις και το 2020 οι συγκεντρώσεις cis 1,2 DCE έχουν αυξηθεί κατά τρεις τάξεις μεγέθους, φθάνοντας τα 811 µg/L (Σχήμα Α.1.13). Το πηγάδι παρακολούθησης DM3018D κατατάσσεται στα πηγάδια παρακολούθησης με συμπεριφορά υποτροπή.



Σχήμα Α.1.13 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3018D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007b; 2007c; 2008c; 2008d; 2008e; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2017; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM, 2016c; 2018a; 2020c; 2020d)

Μελλοντικές ενέργειες. Το σύστημα επανακυκλοφορίας νερού στην Πηγή Β θα συνεχίσει να λειτουργεί ώστε να χορηγείται δότης στη ρηχή στρώση του υδροφορέα στην τοποθεσία. Ομοίως, αναμένεται να πραγματοποιηθούν επαναληπτικές χορηγήσεις δότη μέσω των συστημάτων επανακυκλοφορίας νερού στη βαθιά στρώση του υδροφορέα. Η συστηματική παρακολούθηση θα συνεχιστεί, μέχρι να επιτευχθεί ο ενδιάμεσος στόχος της αποκατάστασης στις περιοχές-στόχους όπου η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η βιοδιέγερση (AECOM, 2020d).

A.2 Περιστατικό ρύπανσης υπεδάφους με χλωροαιθένια: Βάση Πολεμικής Αεροπορίας Ντόβερ, Περιοχή 5, Ντέλαγουερ, Η.Π.Α.

Κατηγορία χώρου. Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε με την Περιοχή 5 (Area 5) της Βάσης Ντόβερ, η οποία περιλαμβάνει την υποενότητα #17 διαχείρισης της ρύπανσης (Operable Unit 17). Μια μικρή ρυπασμένη έκταση με χλωροαιθένια συγκεντρώσεων της τάξης των 8μg/L στα δυτικά της Περιοχής 5 (Grounds Maintenance Area-GMA) επάγεται επίσης στην υποενότητα διαχείρισης της ρύπανσης #17. Στην έκταση αυτή η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η ενδογενής αποχλωρίωση.

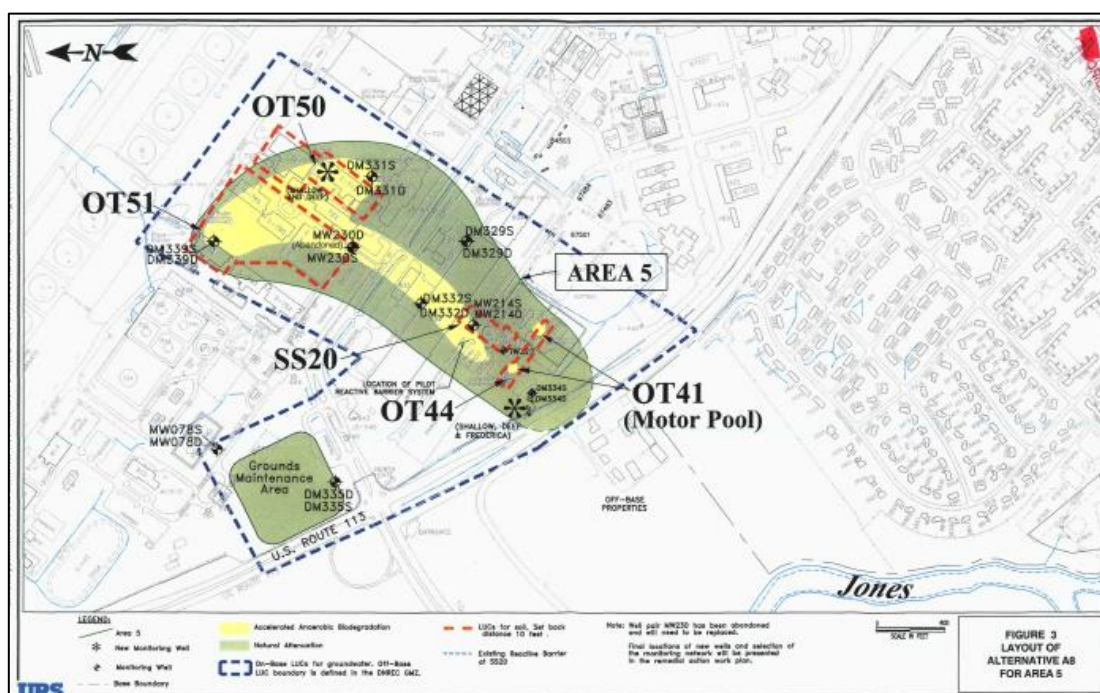


Σχήμα Α.2.1 Φωτογραφία της ευρύτερης περιοχής της Αεροπορικής Βάσης Ντόβερ μαζί με τις ρυπασμένες εκτάσεις της βαθιάς στρώσης των Περιοχών 5 και 6 πριν από την έναρξη των εφαρμογών πλήρους κλίμακας το 2006 (από δορυφόρο, Google Earth Pro, 2020-τροποποιημένη)

Ρυπογόνος δραστηριότητα. Πέντε τοποθεσίες έχουν συνεισφέρει στη ρύπανση του υπόγειου νερού της Περιοχής 5 με χλωροαιθένια και σε μικρότερο βαθμό με ρύπους που σχετίζονται με αεροπορικά καύσιμα. Οι ρύποι έχουν ανιχνευτεί στο υπέδαφος και στο υπόγειο νερό κοντά σε εγκαταστάσεις συντήρησης και ανεφοδιασμού των αεροσκαφών με καύσιμα (τοποθεσία

SS20/Κτίριο 635), διαχωριστές ελαίων/νερού (τοποθεσίες OT51, OT50 και OT44) και μία τοποθεσία (OT41) στην οποία συλλέγονταν τα βιομηχανικά απόβλητα ώστε τελικά να αποθεθούν σε εργοστάσιο επεξεργασίας αποβλήτων (βλ. Σχήμα Α.2.2) (USACE, 2006a). Στην τοποθεσία SS20 συνάγεται η διαρροή τετραχλωροαιθενίου (PCE) κατά άγνωστη ημερομηνία και τρόπο. Παρά το γεγονός πως εργαζόμενοι στην Βάση ισχυρίζονται πως στην περιοχή της διαρροής το ρυπασμένο με PCE ακόρεστο έδαφος έχει αφαιρεθεί, δεν έχει καταγραφεί επίσημα καμία τέτοια δραστηριότητα.

Κύριοι ρύποι. Οι ρύποι ενδιαφέροντος στην Περιοχής 5 είναι τα χλωροαιθένια, το βενζόλιο και το τολουόλιο.



Σχήμα Α.2.2 Τοποθεσίες πηγών ρύπανσης στην Περιοχή 5 της Αεροπορικής Βάσης Ντόβερ στη ρυπασμένη έκταση της βαθιάς στρώσης το Φεβρουάριο του 2006 (USACE, 2006a)

Υδρογεωλογικές συνθήκες. Οι υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην Περιοχή 5 είναι κοινές με εκείνες της Περιοχής 6 και έχουν περιγραφεί στην προηγούμενη ενότητα.

Έργα αποκατάστασης-Πιλοτική δοκιμή. Η πιλοτική δοκιμή έλαβε χώρα το 1997 στην τοποθεσία SS20 στην οποία συνάγεται η διαρροή τετραχλωροαιθενίου (PCE) κατά άγνωστη ημερομηνία και τρόπο. Η μέθοδος αποκατάστασης που εφαρμόστηκε ήταν η επί τόπου επεξεργασία του ρυπασμένου υπόγειου νερού μέσω περατού διαφράγματος. Το υλικό πλήρωσης που θα συντελούσε στην αποδόμηση των χλωροαιθινίων ήταν ο σίδηρος (USACE, 2006a).

Αποτελέσματα πιλοτικής δοκιμής. Δεν έχουν διεξαχθεί χρήσιμα συμπεράσματα κατά τη διενέργεια της πιλοτικής δοκιμής, αφού το ρυπασμένο νερό κινείτο τελικώς περισσότερο γύρω από τον χημικό αντιδραστήρα, παρά μέσα απ' αυτόν (USACE, 2006a).

Στόχοι αποκατάστασης. Τα όρια αποκατάστασης για τα χλωριωμένα αιθυλένια, όσο και ο ενδιάμεσος στόχος αποκατάστασης, είναι κοινά με εκείνα της Περιοχής 6 και περιγράφονται στην προηγούμενη ενότητα.

Έργα αποκατάστασης-Πλήρης κλίμακα. Κατά την αναβάθμιση σε εφαρμογή πλήρους κλίμακας (2006-σε εξέλιξη) η μέθοδος αποκατάστασης που επιλέχθηκε είναι η βιοδιέγερση συνδυαστικά με την ενδογενή αποχλωρίωση. Ο δότης αποτελεί μείγμα γαλακτικού ανιόντιος και γαλακτοποιημένου φυτικού λαδιού με θρεπτικά συστατικά (φωσφορικό άλας και αμμωνία) και πόσιμο νερό, όπως και στην Περιοχή 6. Η χορήγησή του γίνεται με δύο εναλλακτικούς τρόπους:

- Απευθείας χορήγηση μέσω σημείων εισπίεσης στη ρηχή στρώση του υδροφορέα σε τέσσερις διαφορετικές πηγές (Source Areas E, F, G, H)
- Χορήγηση μέσω συστημάτων επανακυκλοφορίας νερού στη ρηχή και βαθειά στρώση του υδροφορέα σε 10 μόνιμες διατομές πηγαδιών (Plume Injection/Circulation Transects- PICTs) εγκατεστημένες κάθετα στην κατεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού

Όταν ο ενδιάμεσος στόχος αποκατάστασης επιτευχθεί και οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθινίων στο υπόγειο νερό πάρουν τιμές μικρότερες των 500 μg/L, οι χορηγήσεις δότη θα σταματήσουν και η μέθοδος αποκατάστασης που θα εφαρμοστεί στην Περιοχή 5 θα είναι αποκλειστικά η φυσική εξασθένηση, έως ότου επιτευχθούν οι συγκεντρώσεις-στόχοι των χλωροαιθινίων (USACE, 2006a).

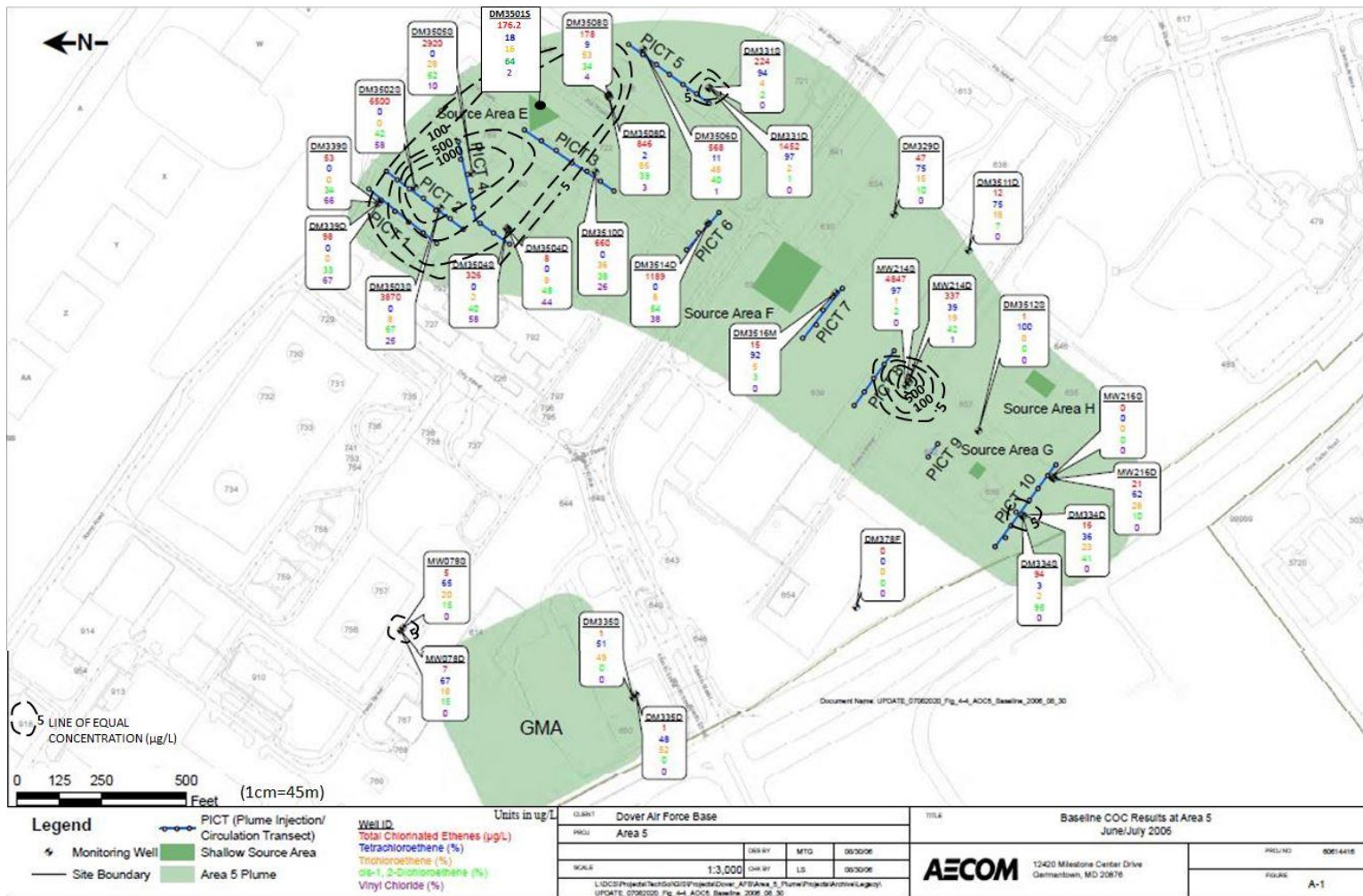
Εκτιμηθείς χρόνος αποκατάστασης. Ο εκτιμηθείς χρόνος ολοκλήρωσης της αποκατάστασης ήταν (i) 6 έως 20 χρόνια για τις υποπεριοχές όπου η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η βιοδιέγερση και (ii) παραπάνω από 50 έτη για τις υποπεριοχές όπου η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η ενδογενής αποχλωρίωση (USACE, 2006a).

Χρονικό διάστημα παρακολούθησης. Η παρακολούθηση συνεχίζεται μέχρι και σήμερα και η τελευταία διαθέσιμη δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε τον Απρίλιο του 2020.

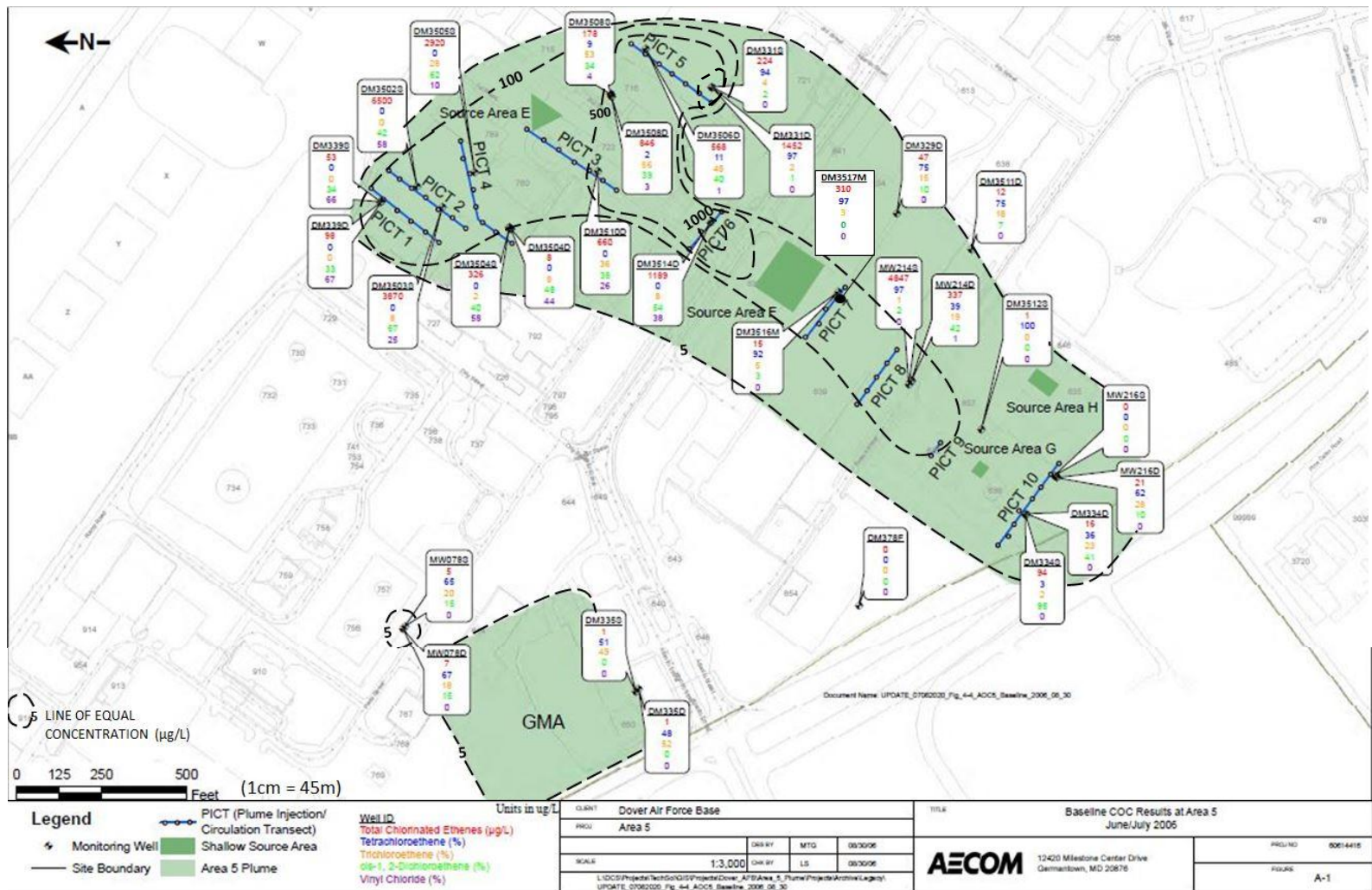
Μεταβολή συγκεντρώσεων και ρυπασμένης έκτασης. Σύμφωνα με τις Αναφορές Προόδου του περιστατικού, η ρύπανση στην Περιοχή 5 φαίνεται να αντιμετωπίζεται ενιαία, χωρίς να γίνεται διαχωρισμός μεταξύ των δύο στρώσεων του υδροφορέα. Με σκοπό την καταγραφή και περιγραφή της προόδου σε κάθε στρώση ξεχωριστά και βάσει των διαθέσιμων πληροφοριών και μετρήσεων, έχουν οριοθετηθεί οι ρυπασμένες περιοχές της κάθε στρώσης τα έτη 2006 (αρχικές συνθήκες) και 2020 (Απρίλιος) μαζί με τις καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων των 5, 100, 500 και 1,000 μg/L. Προς διευκόλυνση του αναγνώστη, σημειώνεται ότι πηγάδια παρακολούθησης με τελικό γράμμα ονομασίας «S» αφορούν στις μετρήσεις της ρηχής στρώσης και τα πηγάδια παρακολούθησης με τελικό γράμμα ονομασίας «D» αφορούν στην βαθειά στρώση.

Το 2006 στη ρηχή στρώση του υδροφορέα, η ρύπανση εκτεινόταν σε τέσσερις διακριτές περιοχές (βλέπε Σχήμα A.2.3). Στη μεγαλύτερη από αυτές, η οποία εκτεινόταν για περίπου

270 μέτρα στην κατεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού, η μέγιστη συγκέντρωση που είχε καταγραφεί ήταν ίση με 3,800 $\mu\text{g/L}$ και αφορούσε στο VC. Στην αμέσως μεγαλύτερη διακριτή περιοχή της ρηχής στρώσης η ρύπανση εκτεινόταν για περίπου 70 μέτρα και η μέγιστη συγκέντρωση αφορούσε στο PCE και ήταν της τάξεως των 4,700 $\mu\text{g/L}$ το 2006. Η περιοχή αυτή, όπως και οι υπόλοιπες δύο διακριτές ρυπασμένες περιοχές της ρηχής στρώσης το 2006, οριοθετούνται αποκλειστικά από ένα δειγματοληπτικό πηγάδι η κάθε μία, στο καθένα από τα οποία οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθενίων ήταν μεγαλύτερες των 5 $\mu\text{g/L}$ το 2006. Πιο συγκεκριμένα, οι υπόλοιπες δύο διακριτές ρυπασμένες περιοχές της ρηχής στρώσης εκτεινόταν για περίπου 30 μέτρα και η μέγιστη συγκέντρωση ήταν ίση με 210 $\mu\text{g/L}$ (για το PCE) και 90 $\mu\text{g/L}$ (για το cDCE) αντίστοιχα το 2006. Στη βαθιά στρώση, η ρύπανση εκτεινόταν για περίπου 900 μέτρα στην κατεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού, η μέγιστη συγκέντρωση ήταν ίση με 1,400 $\mu\text{g/L}$ και αφορούσε στο PCE. Στα Σχήματα A.2.3 και A.2.4 δίνονται οι ρυπασμένες εκτάσεις της ρηχής και της βαθιάς στρώσης αντίστοιχα κατά τις αρχικές συνθήκες (2006).



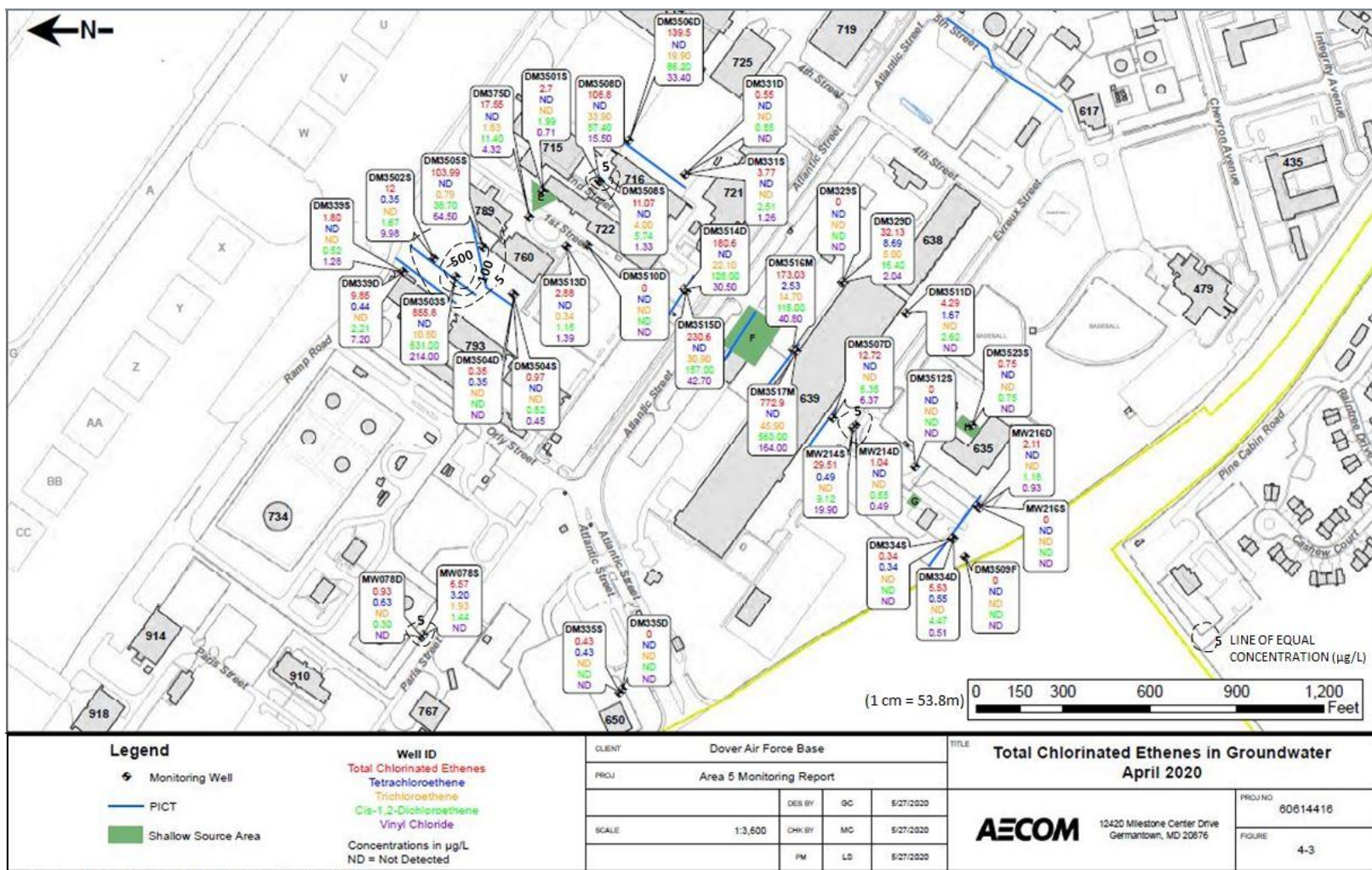
Σχήμα Α.2.3 Ρυπασμένες περιοχές με χλωροαιθένια στη ρηγή στρώση το 2006 στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ (AECOM, 2020b-τροποποιημένο)



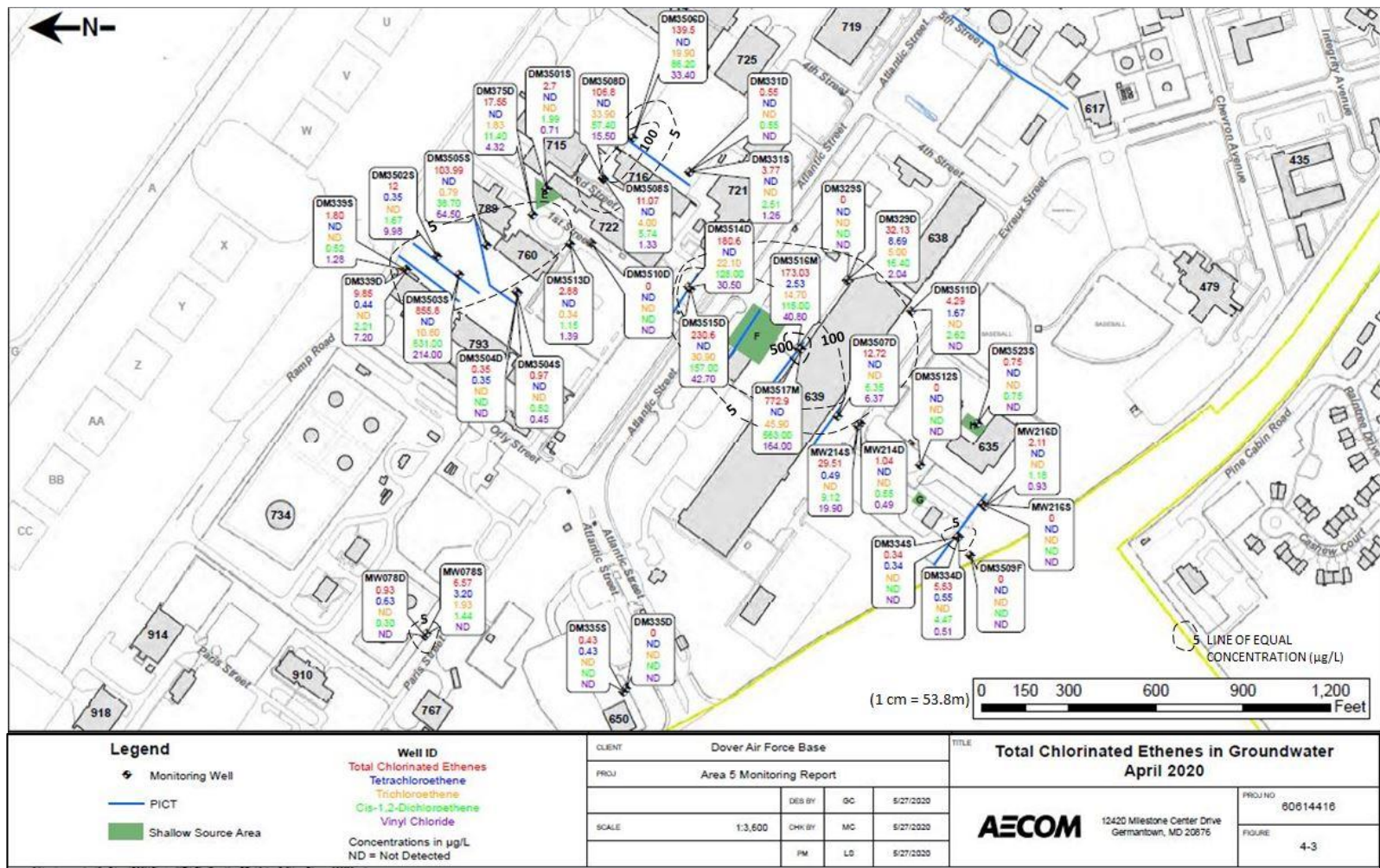
Σχήμα Α.2.4 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένια στη βαθιά στρώση το 2006 στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ (AECOM, 2020b-τροποποιημένο)

Η δειγματοληψία του Μαρτίου 2017 ήταν η δεύτερη συνεχόμενη δειγματοληψία, μετά από εκείνη του Απριλίου του 2016, κατά την οποία είχε επιτευχθεί ο ενδιάμεσος στόχος της αποκατάστασης στην Περιοχή 5, τόσο στη ρηχή όσο και στη βαθειά στρώση. Έκτοτε η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης επρόκειτο να είναι αποκλειστικά η ενδογενής αποχλωρίωση. Πολύ σύντομα όμως, κατά τα τέλη του 2017, οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθινίων επανήλθαν σε τιμές μεγαλύτερες των 500 $\mu\text{g/L}$. Έτσι, από το 2018 και έπειτα, πραγματοποιήθηκαν επιπρόσθετες χορηγήσεις δότη στην περιοχή. Σύμφωνα με τις μετρήσεις του Απριλίου 2020, οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθινίων είναι μεγαλύτερες των 500 $\mu\text{g/L}$ σε δύο δειγματοληπτικά πηγάδια της Περιοχής 5, ένα στη ρηχή (DM3003S, Σχήμα Α.2.5) και ένα στη βαθειά στρώση (DM3517M, Σχήμα Α.2.6). Η μέγιστη συγκέντρωση στη ρηχή στρώση είναι ίση με 630 $\mu\text{g/L}$ και στη βαθειά είναι ίση με 563 $\mu\text{g/L}$.

Πιο συγκεκριμένα, στη ρηχή στρώση η μεγαλύτερη ρυπασμένη περιοχή του 2006 έχει μειωθεί περίπου κατά 60% το 2020 και έχει διαχωριστεί σε δύο μικρότερες περιοχές με μέγιστες συγκεντρώσεις της τάξεως των 630 $\mu\text{g/L}$ (μείωση κατά μία τάξη μεγέθους). Και η δεύτερη μεγαλύτερη ρυπασμένη περιοχή της ρηχής στρώσης το 2006 έχει μειωθεί περίπου κατά 60% το 2020 και η μέγιστη συγκέντρωση έχει σημειώσει μείωση κατά δύο τάξεις μεγέθους (από τα 4,700 $\mu\text{g/L}$ το 2006 για το PCE στα 19.9 $\mu\text{g/L}$ το 2020 για το VC). Οι άλλες δύο μικρότερες διακριτές ρυπασμένες περιοχές της ρηχής στρώσης του 2006 έχουν αποδομηθεί πλήρως το 2020. Στη βαθειά στρώση η ρυπασμένη περιοχή έχει μειωθεί περίπου κατά 45% το 2020 και έχει διαχωριστεί σε τέσσερις μικρότερες περιοχές, με τις μέγιστες συγκεντρώσεις να έχουν σημειώσει μείωση κατά μία τάξη μεγέθους (από τα 1,400 $\mu\text{g/L}$ για το PCE το 2006 στα 563 $\mu\text{g/L}$ για το cDCE το 2020). Στα Σχήματα Α.2.5 και Α.2.6 δίνονται οι ρυπασμένες εκτάσεις της ρηχής και της βαθειάς στρώσης το 2020 αντίστοιχα.

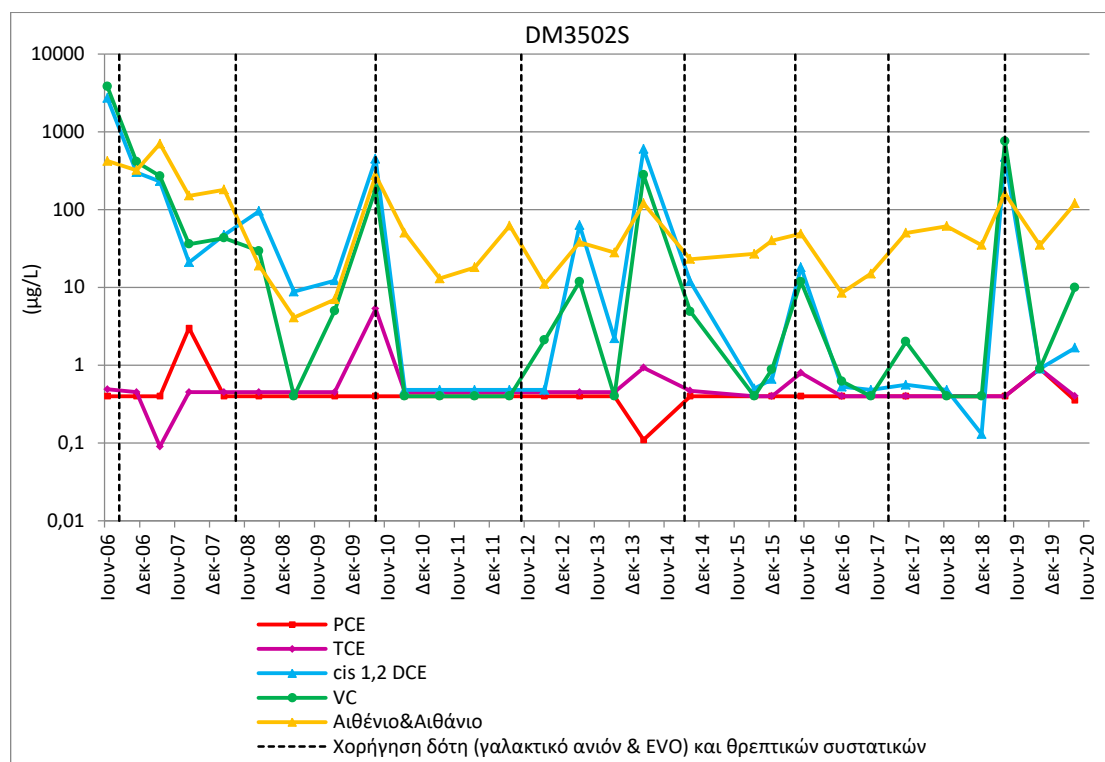


Σχήμα Α.2.5 Ρυπασμένες περιοχές με χλωροαιθένια στη ρηγή στρώση το 2020 στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ (ΑΕCOM, 2020b - τροποποιημένο)



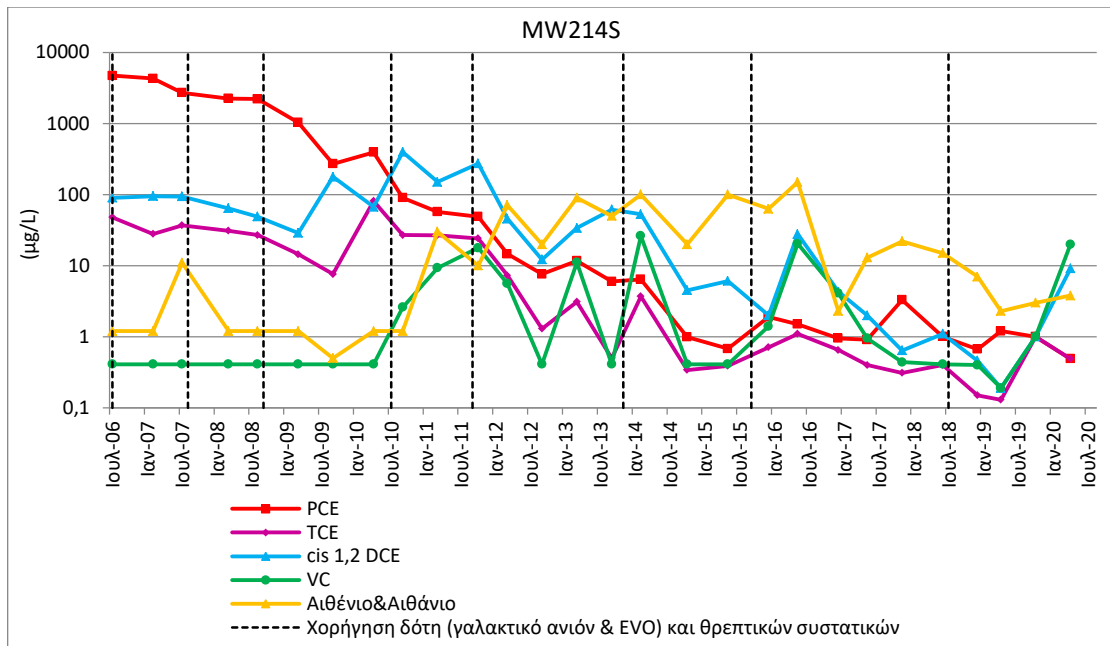
Σχήμα Α.2.6 Ρυπασμένες περιοχές με χλωροαιθένια στη βαθιά στρώση το 2020 στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ (AECOM, 2020b - τροποποιημένο)

Στο πηγάδι παρακολούθησης DM3502S της ρηχής στρώσης (Σχήμα A.2.7), το 2006 οι συγκεντρώσεις των cis 1,2 DCE και VC ήταν ίσες με 2,730 και 3,770 µg/L αντίστοιχα. Μέχρι το 2020 στο πηγάδι αυτό έχουν καταγράψει τρία διακριτά επεισόδια κατά τα οποία οι συγκεντρώσεις των θυγατρικών προϊόντων παρουσίασαν αυξήσεις κατά δύο τάξεις μεγέθους και άνω (επεισόδια κατά τα μέσα του 2010, 2014 και 2019). Μετά από την επαναληπτική προσθήκη δότη το 2019, οι συγκεντρώσεις μειώθηκαν ξανά. Το πηγάδι DM3502S κατατάσσεται στα πηγάδια παρακολούθησης με συμπεριφορά υποτροπή.



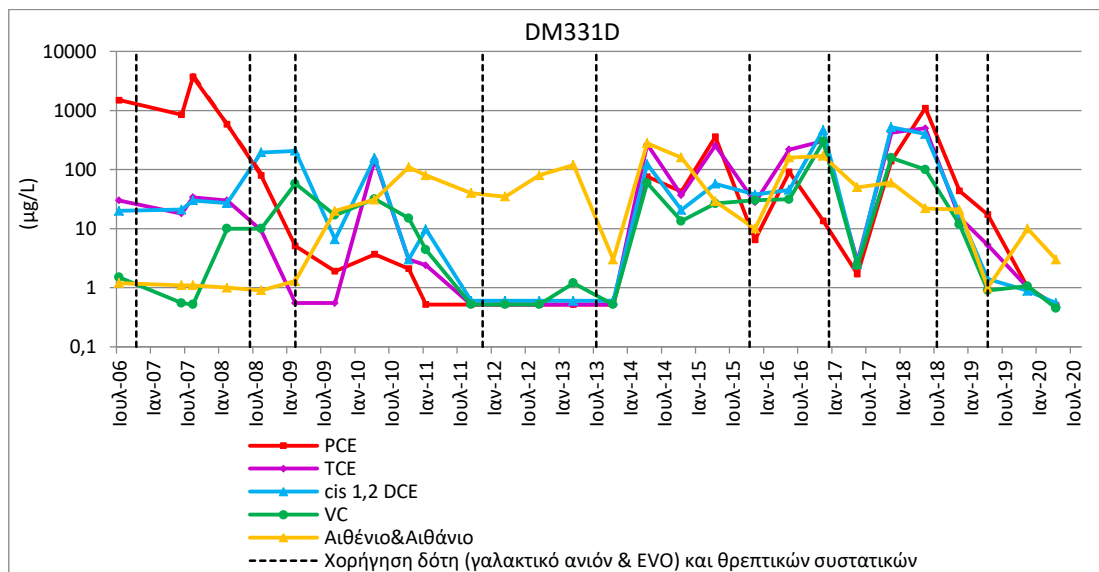
Σχήμα A.2.7 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3502S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007a; 2008a; 2008b; 2008e; 2009a; 2009c; 2011a; 2011b; 2012b; 2012c; 2013a; 2013e; 2014a; 2014b; 2015a; 2018b; AECOM, 2016a; 2016b; 2017a; 2017b; 2018b; 2019a; 2019b; 2020a; 2020b)

Κατά τις αρχικές συνθήκες, στο πηγάδι παρακολούθησης MW214S (Σχήμα A.2.8) καταγράφηκε η μέγιστη συγκέντρωση PCE στη ρηχή στρώση (4,700 µg/L). Αν και από τα μέσα του 2017 είχαν επιτευχθεί τα όρια αποκατάστασης για όλα τα χλωροαιθάνια, στις δύο πιο πρόσφατες μετρήσεις φαίνεται ότι οι συγκεντρώσεις των θυγατρικών προϊόντων έχουν αυξητικές τάσεις. Ελαφρώς αυξητική τάση έχουν και οι συγκεντρώσεις του αιθενίου. Το πηγάδι MW214S κατατάσσεται στα πηγάδια παρακολούθησης με συμπεριφορά πρόοδο.



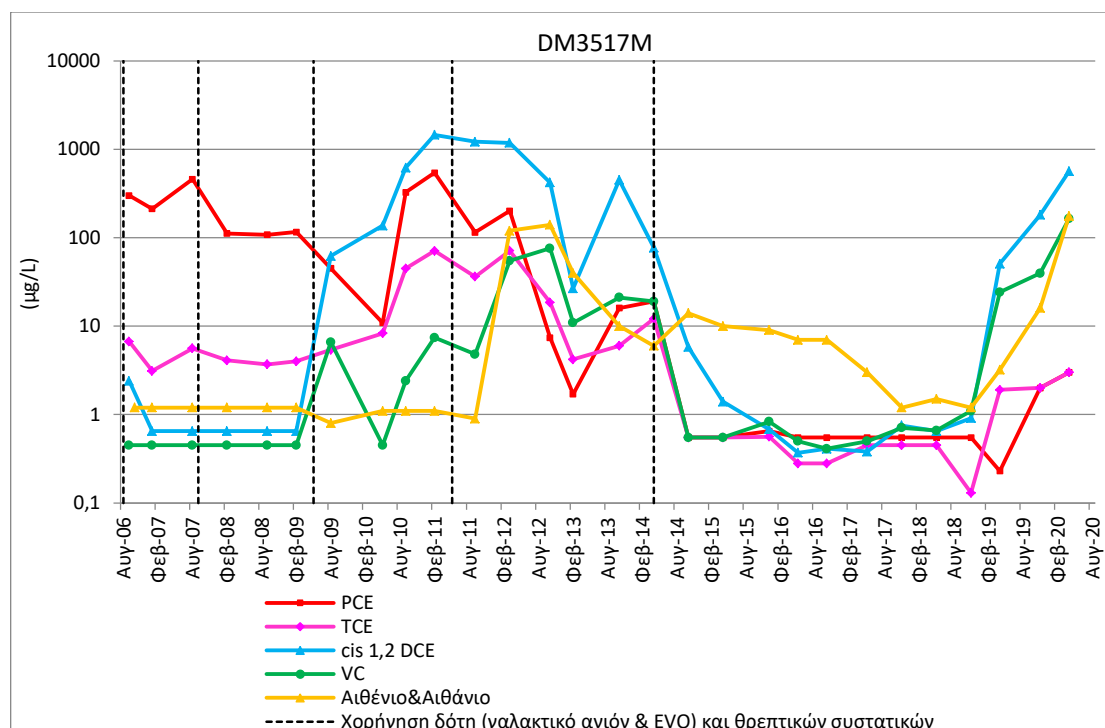
Σχήμα Α.2.8 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW214S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007a; 2008a; 2008b; 2008e; 2009a; 2009c; 2011a; 2011b; 2012b; 2012c; 2013a; 2013e; 2014a; 2014b; 2015a; 2018b; AECOM, 2016a; 2016b; 2017a; 2017b; 2018b; 2019a; 2019b; 2020a; 2020b)

Στο πηγάδι παρακολούθησης DM331D (Σχήμα Α.2.9) της βαθιάς στρώσης, οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθινίων αυξήθηκαν απότομα κατά δύο τάξεις μεγέθους μετά από σχεδόν δύο έτη κατά τα οποία παρέμεναν σε μη ανιχνεύσιμες τιμές. Στην πλέον πρόσφατη μέτρηση έχουν μειωθεί ξανά σε μη ανιχνεύσιμα επίπεδα μετά από τέσσερις επαναληπτικές προσθήκες δότη. Το πηγάδι DM331D συγκαταλέγεται στα πηγάδια παρακολούθησης με συμπεριφορά υποτροπή.



Σχήμα Α.2.9 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM331D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007a; 2008a; 2008b; 2008e; 2009a; 2009c; 2011a; 2011b; 2012b; 2012c; 2013a; 2013e; 2014a; 2014b; 2015a; 2018b; AECOM, 2016a; 2016b; 2017a; 2017b; 2018b; 2019a; 2019b; 2020a; 2020b)

Το πηγάδι παρακολούθησης της βαθειάς στρώσης στο οποίο τον Απρίλιο του 2020 δεν έχει επιτευχθεί ο ενδιάμεσος στόχος της αποκατάστασης είναι το DM3517M (Σχήμα Α.2.10). Μετά από πέντε προσθήκες δότη, είχαν επιτευχθεί οι συγκεντρώσεις-στόχοι για όλα τα χλωροαιθένια. Όμως από τα μέσα του 2019 οι συγκεντρώσεις των cDCE και VC ξεκίνησαν να έχουν αυξητικές τάσεις και το 2020 έχουν κορυφωθεί στα 563 µg/L και 164 µg/L αντίστοιχα. Το πηγάδι DM3517M κατατάσσεται στα πηγάδια παρακολούθησης με συμπεριφορά υποτροπή.



Σχήμα Α.2.10 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3517M της βαθειάς στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007a; 2008a; 2008b; 2008e; 2009a; 2009c; 2011a; 2011b; 2012b; 2012c; 2013a; 2013e; 2014a; 2014b; 2015a; 2018b; AECOM, 2016a; 2016b; 2017a; 2017b; 2018b; 2019a; 2019b; 2020a; 2020b)

Μελλοντικές ενέργειες. Επαναληπτικές προσθήκες δότη θα συνεχίσουν να πραγματοποιούνται στην Περιοχή, μέχρι να επιτευχθεί ο ενδιάμεσος στόχος αποκατάστασης.

A.3 Περιστατικό ρύπανσης υπεδάφους με χλωροαιθένια: Βάση Πολεμικής Αεροπορίας Τράβις, Περιοχή SS015, Καλιφόρνια, Η.Π.Α.

Κατηγορία χώρου. Η Βάση Πολεμικής Αεροπορίας Τράβις βρίσκεται στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α. και ξεκίνησε να λειτουργεί το 1943. Το Νοέμβριο του 1989 η Αμερικάνικη Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος καταχώρησε τη Βάση Πολεμικής Αεροπορίας Τράβις στη Λίστα Χώρων Προτεραιότητας. Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε με την Περιοχή SS015 (Solvent Spill Area 15), η οποία βρίσκεται κεντρικά της Βάσης και περιλαμβάνει την υποενότητα διαχείρισης ρύπανσης #6 (ΟΥ 6).



Σχήμα Α.3.1 Φωτογραφία της Αεροπορικής Βάσης Τράβις, Καλιφόρνια, Η.Π.Α. (από δορυφόρο, Google Earth Pro, 2020-τροποποιημένη)

Ρυπογόνος δραστηριότητα. Μέχρι το 2004 στην Περιοχή SS015 βρισκόταν η εγκατάσταση 550 (Former Facility 550), η οποία παρείχε υπηρεσίες επισκευής και συντήρησης αεροσκαφών από το 1952. Μπογιά αφαιρείτο από τα αεροσκάφη για άγνωστη χρονική περίοδο πριν το 1970. Συνάγεται ότι η ακούσια ρίψη διαλυτών και μπογιάς οδήγησε στη διαρροή ρύπων στο υπέδαφος και στη ρύπανση του υπόγειου νερού. Τα απόβλητα που παρογόntonτουσαν κατά την εκπόνηση των εργασιών αυτών συλλέγονταν στην γειτονική εγκατάσταση 552 (Former Facility 552), η οποία ήταν περιφραγμένη και αποτελείτο από πλάκα συροδέματος. Το 2004 αμφότερες οι εγκαταστάσεις 550 και 552 κατεδαφίστηκαν με σκοπό την κατασκευή νέου συγκροτήματος στην Περιοχή SS015 (βλέπε Σχήμα Α.3.2).



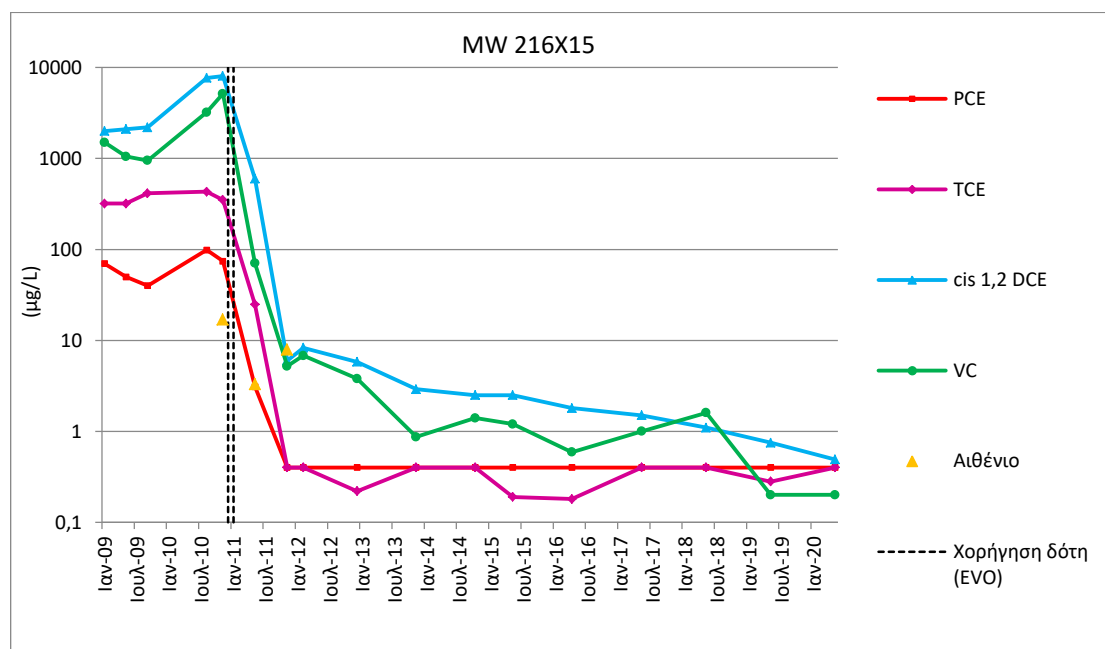
Σχήμα Α.3.2 Φωτογραφίες της Περιοχής SS015 της Βάσης Τράβις τα έτη 1993 και 2020 (από δορυφόρο, Google Earth Pro-τροποποιημένες)

Υδρογεωλογικές συνθήκες. Κεντρικά της Περιοχής SS015 στην εστία της ρύπανσης, το βραχώδες υπόβαθρο αποτελείται από χαλαρό ψαμίτιη και καρστικοποιημένο αργιλικό σχιστόλιθο, βρίσκεται σχεδόν στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται στα πρώτα 2.5 μέτρα από την ελεύθερη επιφάνεια. Ο ρυπασμένος υδροφορέας έχει συνολικό πάχος 3.5 μέτρα, κατεύθυνση ροής κυρίως προς τα βορειοανατολικά με μικρότερη συνηστώσα ροής προς τα ανατολικά/νοτιοανατολικά και η υδραυλική αγωγιμότητα κυμαίνεται στο εύρος $3,5 \cdot 10^{-6}$ - $1,6 \cdot 10^{-4}$ m/s (CH2MHILL, 2011a).

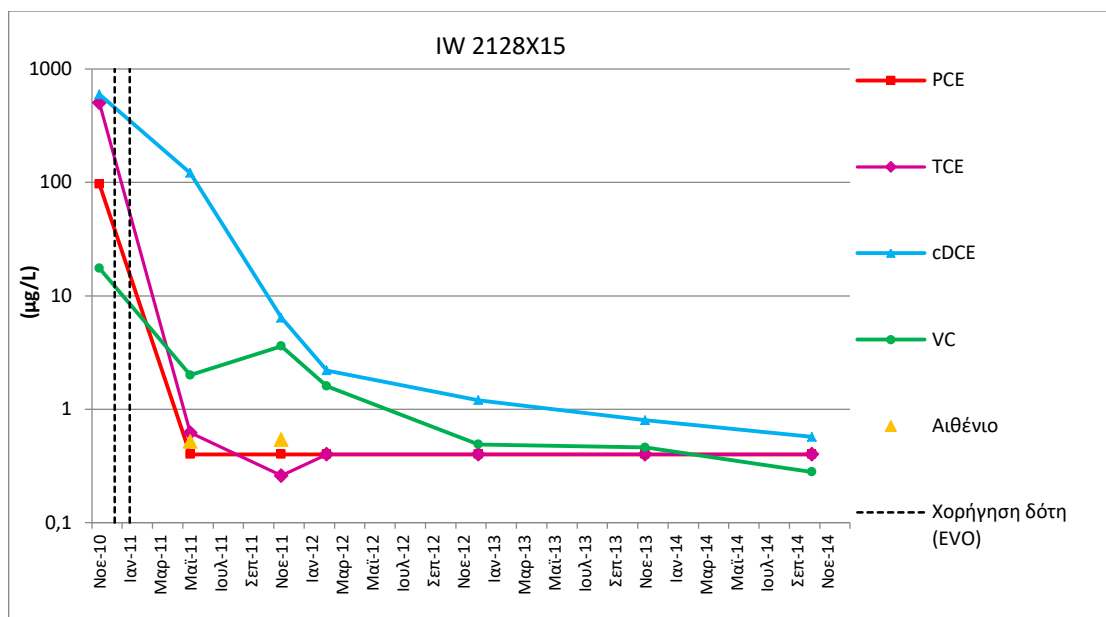
Έργα αποκατάστασης-Πιλοτική δοκιμή. Η πρώτη πιλοτική δοκιμή στην περιοχή ξεκίνησε στα μέσα του 2000 και διήρκεσε οκτώ μήνες. Η περιοχή υλοποίησης ήταν η εστία της ρύπανσης. Ο δότης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το γαλακτοποιημένο φυτικό λάδι (EVO) και η χορήγησή του έγινε απευθείας μέσω εισπίεσης σε τρία πηγάδια. Κατά τα τέλη του 2000 προέκυψε η αναβάθμιση της εφαρμογής σε πλήρη κλίμακα. Παρότι τα αποτελέσματα ήταν θετικά, τόσο για την πιλοτική δοκιμή, όσο και για τη σύντομη εφαρμογή πλήρους κλιμακας και η απογλωρωτική διαδικασία προχώρησε, η εφαρμογή τερματίστηκε το 2001 λόγω της ανοικοδόμησης στην περιοχή υλοποίησης. Η χορήγηση δότη χαρακτηρίστηκε ως ανεπαρκής (CH2MHILL, 2011a). Μέχρι το 2010, η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης στην Περιοχή SS015 ήταν η φυσική εξασθένηση. Η συστηματική παρακολούθηση έδειξε πως οι συγκεντρώσεις των θυγατρικών προϊόντων στο υπόγειο νερό είχαν αυξητικές τάσεις και η ρύπανση είχε επεκταθεί προς την κατεύθυνση κίνησης του υπόγειου νερού, γεγονότα που αποδίδονται στην πρόωρη λήξη της εφαρμογής πλήρους κλιμακας που έλαβε χώρα το έτος 2000-2001. Το 2010 διενεργήθηκε εκ νέου πιλοτική δοκιμή στην εστία της ρύπανσης με εφαρμοζόμενη μέθοδο αποκατάστασης τη βιοδιέγερση και χορηγούμενο δότη ηλεκτρονίων το γαλακτοποιημένο φυτικό λάδι (EVO). Η ρύπανση εκτεινόταν για περίπου 120 μέτρα στην κατεύθυνση κίνησης του υπόγειου νερού και οι μέγιστες συγκεντρώσεις στην εστία αφορούσαν στα cis 1,2 DCE και VC και ήταν ίσες με 8,080 μg/L και 5,140 μg/L αντίστοιχα.

Κατά τα τέλη του 2010 πραγματοποιήθηκαν δύο διαδοχικές χορηγήσεις δότη (EVO) μέσω πηγαδιών ένεσης στην περιοχή υλοποίησης.

Αποτελέσματα πιλοτικής δοκιμής. Η πιλοτική δοκιμή ολοκληρώθηκε με επιτυχία και οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθενίων σε όλα τα πηγάδια παρακολούθησης εντός της περιοχής υλοποίησης έφτασαν μέχρι και σε μη ανιχνεύσιμες τιμές σε λιγότερο από μία πενταετία και παραμένουν σε αυτά τα επίπεδα μέχρι την τελευταία διαθέσιμη μέτρηση του 2020. Στα Σχήματα A.3.3 και A.3.4 δίνονται οι δύο χρονοσειρές μετρήσεων πηγαδιών παρακαλούθησης που βρισκόντουσαν στην εστία της ρύπανσης κατά τη διενέργεια της πιλοτικής δοκιμής και στις οποίες κατά την έναρξή της καταγράφηκαν οι μέγιστες τιμές συγκεντρώσεων. Στο πηγάδι παρακολούθησης MW216X15 (Σχήμα A.2.3) καταγράφονταν οι μέγιστες συγκεντρώσεις, οι οποίες αμέσως μετά από τις δύο προσθήκες δότη κατά τη διενέργεια πιλοτικής δοκιμής μειώθηκαν απότομα. Παρόμοια ήταν η μείωση των συγκεντρώσεων στο πηγάδι παρακολούθησης IW2128X15 (Σχήμα A.2.4).



Σχήμα A.3.3 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW216X15 στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις κατά τη διενέργεια της πιλοτικής δοκιμής (οι μετρήσεις συνεχίστηκαν και κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας) (CH2MHILL, 2011a; 2012a, 2012b; 2013; 2014; 2016a; 2016b; 2017b; 2019a; 2019b; 2020; 2021)



Σχήμα Α.3.4 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης IW2128X15 στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις κατά τη διενέργεια της πιλοτικής δοκιμής (CH2MHILL, 2011a; 2012a, 2012b; 2013; 2014; 2016a; 2016b; 2017b; 2019a; 2019b; 2020; 2021)

Στόχοι αποκατάστασης. Τα όρια αποκατάστασης είναι τα 5 μg/L για τα PCE και TCE, τα 6 μg/L για το cis 1,2 DCE και τα 0.5 μg/L για το VC.

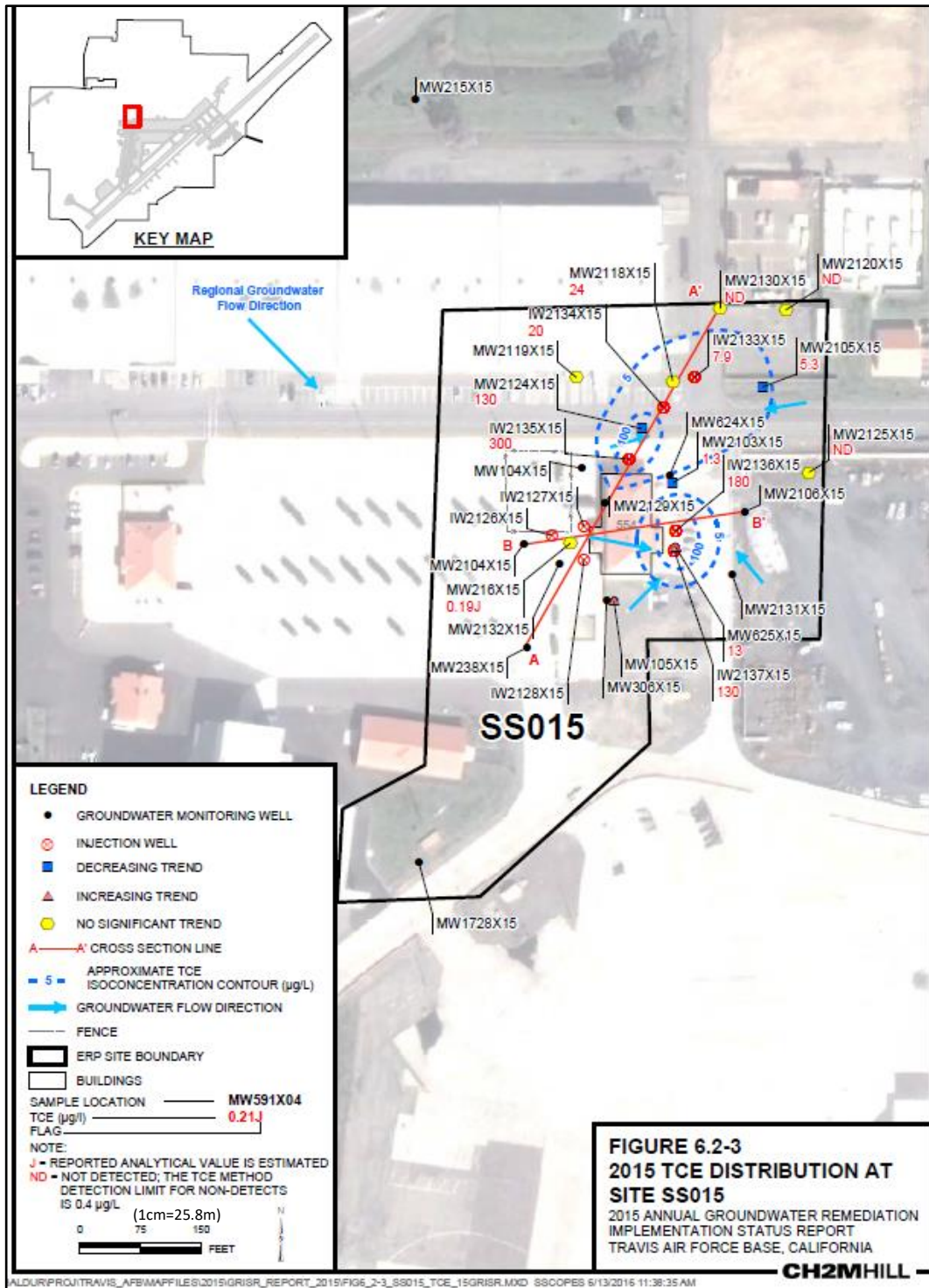
Έργα αποκατάστασης-Εφαρμογή πλήρους κλίμακας. Το 2015 ξεκίνησε η εφαρμογή πλήρους κλίμακας στην Περιοχή SS015. Πέντε νέα πηγάδια ένεσης εγκαταστάθηκαν στην περιοχή (IW2133x15 έως IW2137x15) και ο δότης χορηγήθηκε στη διευρυμένη έκταση όπου οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθινίων ήταν μεγαλύτερες των 20 μg/L (CH2MHILL, 2016b). Στη ρυπασμένη έκταση όπου οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθινίων ήταν μικρότερες των 20 μg/L, η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η φυσική εξασθένηση (CH2MHILL, 2016b). Κατά τα τέλη του 2017 πραγματοποιήθηκε μία ακόμη προσθήκη γαλακτοποιημένου φυτικού λαδιού, αλλά με μικρότερο μέγεθος μορίων (nano Emulsified Vegetable Oil – nano EVO) και μία προσθήκη μικροοργανισμών της κοινότητας KB1-Plus. Ο δότης και οι μικροοργανισμοί χορηγήθηκαν σε συνολικά 11 πηγάδια στην περιοχή. Τα πέντε από αυτά προϋπήρχαν από το 2014 (IW2133X15 έως IW2137X15) και τα υπόλοιπα εγκαταστάθηκαν στην περιοχή το 2017 (IW2768X15 έως IW2773X15) (CH2MHILL, 2019b). Οι τοποθεσίες των προαναφερθέντων πηγαδιών ένεσης δότη και μικροοργανισμών φαίνονται στο Σχήμα Α.3.6. Η πιο πρόσφατη ενέργεια αποκατάστασης είναι αυτή που έλαβε χώρα το 2020 και αφορά στη χορήγηση γαλακτοποιημένου φυτικού λαδιού (EVO) μέσω συστήματος επανακυκλοφορίας νερού. Το σύστημα αποτελείται από ένα πηγάδι άντλησης (MW625x15) και τρία πηγάδια ένεσης των τροποποιημένων υπόγειων υδάτων (IW2137x15, IW2272x15 και IW2136x15) συνδεδεμένα με σύστημα τροφοδοτικών δεξαμενών. Οι τοποθεσίες των πηγαδιών φαίνονται στο Σχήμα Α.3.6. Παρότι το σύστημα λειτούργησε μόλις δύο μήνες

(Φεβρουάριος-Μάρτιος 2020) λόγω αδυναμίας επίτευξης των επιθυμητών ρυθμών εισπίεσης των τροποποιημένων υπόγειων υδάτων (τα πηγάδια ένεσης είχαν φραγεί από προηγούμενες χορηγήσεις δότη), παρατηρήθηκε αύξηση των γηγενών αποχλωρωτικών μικροοργανισμών (Dehalococcoides και Desulfonivibrio) στην περιοχή (CH2M HILL, 2021).

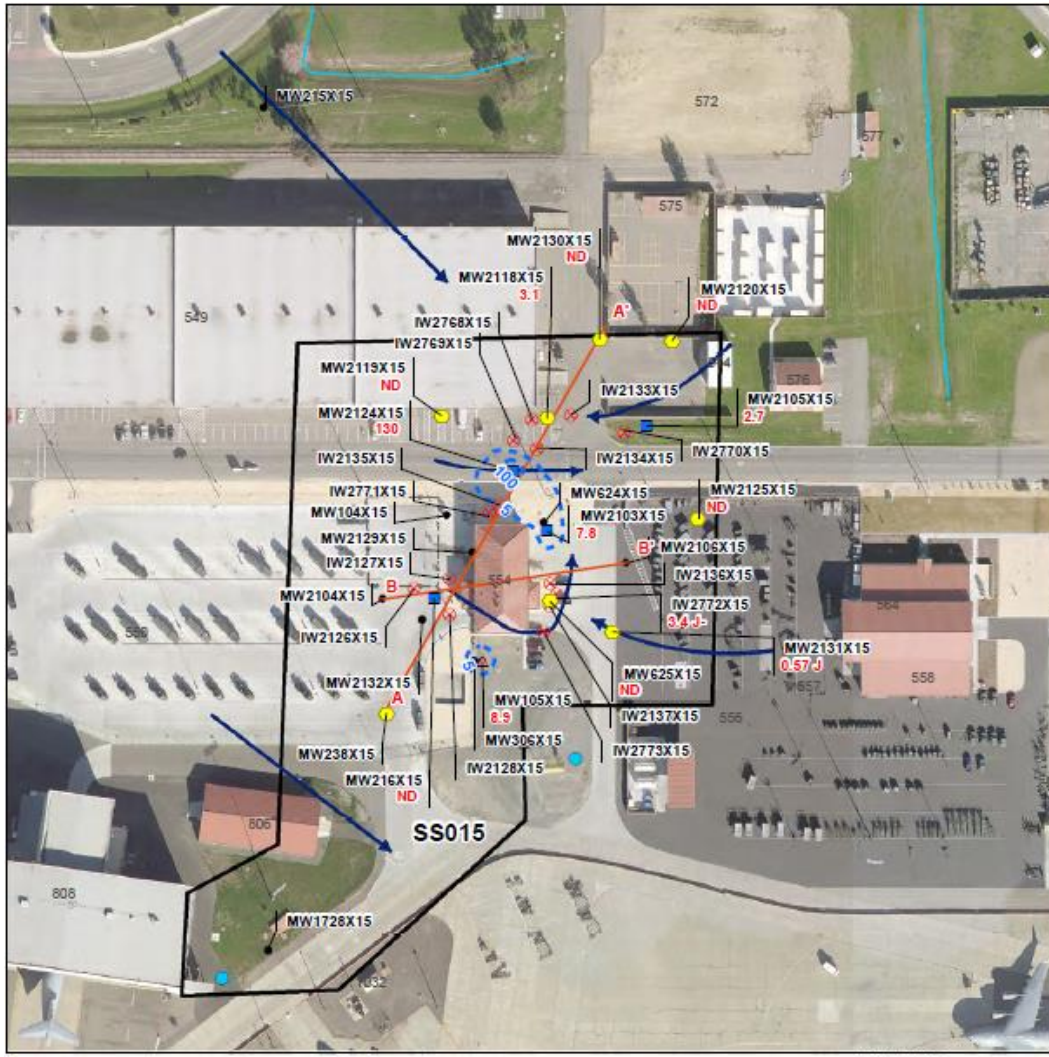
Εκτιμηθείς χρόνος αποκατάστασης. Ο εκτιμηθείς χρόνος ολοκλήρωσης της αποκατάστασης ήταν 5 έως 10 χρόνια για τις υποπεριοχές όπου η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η βιοδιέγερση και 70 χρόνια για τις υποπεριοχές όπου η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η ενδογενής αποχλωρίωση (AFCEC, 2014).

Χρονικό διάστημα παρακολούθησης. Η πλέον πρόσφατη μέτρηση πραγματοποιήθηκε τον Απρίλιο του 2020.

Μεταβολή συγκεντρώσεων και ρυπασμένης έκτασης. Κατά τις αρχικές συνθήκες (2015) η ρύπανση εκτεινόταν σε δύο διακριτές περιοχές για περίπου 70 και 35 μέτρα αντίστοιχα. Η αποκατάσταση δεν είχε την αναμενόμενη πρόοδο και δεν καταγράφεται σημαντική μείωση των συγκεντρώσεων των χλωροαιθενίων στην πλέον πρόσφατη μέτρηση. Αν και αρχικά η μειωμένη επιτυχία αποδιδόταν στην ετερογένεια του εδαφικού-βραχώδους σχηματισμού και στη σχετικά χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα, το 2019 δείγματα υπόγειου νερού επεξεργάστηκαν με σκοπό την ανίχνευση και ταυτοποίηση του μικροβιακού DNA στην περιοχή. Σύμφωνα με την πιο πρόσφατη Αναφορά Προόδου, η μειωμένη επιτυχία της αποκατάστασης αποδίδεται στην ύπαρξη μικρότερου πληθυσμού με αποχλωρωτική ικανότητα στην περιοχή, συγκριτικά με άλλες περιοχές της Βάσης Τράβις (CH2M HILL, 2021). Πιο συγκεκριμένα, η ρυπασμένη έκταση με TCE του 2015 έχει μειωθεί κατά περίπου κατά 70% αλλά η μέγιστη συγκέντρωση παραμένει ίδιας τάξης μεγέθους (από τα 300 µg/L το 2015 στα 130 µg/L το 2020). Στα Σχήματα A.3.5 και A.3.6 δίνονται οι ρυπασμένες εκτάσεις με TCE τα έτη 2015 και 2020 αντίστοιχα. Η ρυπασμένη έκταση με cis 1,2 DCE έχει σημειώσει τη μικρότερη μείωση (περίπου κατά 20%) από το 2015 στο 2020 και η μέγιστη συγκέντρωση επίσης παραμένει ίδιας τάξης μεγέθους (από τα 810 µg/L το 2015 στα 130 µg/L το 2020). Στα Σχήματα A.3.7 και A.3.8 δίνονται οι ρυπασμένες εκτάσεις με cis 1,2 DCE τα έτη 2015 και 2020 αντίστοιχα. Η ρυπασμένη έκταση με VC του 2015 έχει μειωθεί περίπου κατά 70% και η μέγιστη συγκέντρωση έχει μειωθεί κατά μία τάξη μεγέθους το 2020 (από τα 100 µg/L το 2015 στα 16 µg/L). Στα Σχήματα A.3.9 και A.3.10 δίνονται οι ρυπασμένες εκτάσεις με VC τα έτη 2015 και 2020 αντίστοιχα. Σχετικά με το PCE, κατά τις αρχές του 2010 οι μέγιστες συγκεντρώσεις ήταν της τάξεως των 100 µg/L στην εστία της ρύπανσης. Μετά από τη χορήγηση δότη το ίδιο έτος κατά τη διενέργεια πιλοτικής δοκιμής, οι συγκεντρώσεις PCE στο υπόγειο νερό της περιοχής μειώθηκαν απότομα και παραμένουν σταθερά σε τιμές μικρότερες των 10 µg/L σε όλα τα πηγάδια παρακολούθησης της περιοχής μέχρι και το 2020.



Σχήμα Α.3.5 Ρυπασμένες περιοχές με TCE το 2015 στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις (CH2MHILL, 2016b)



- LEGEND**
- GROUNDWATER MONITORING WELL
 - ⊕ INJECTION WELL
 - ⬇️ DECREASING TREND
 - ⬆️ INCREASING TREND
 - NO SIGNIFICANT TREND
 - MANHOLE
 - APPROXIMATE ISOCONCENTRATION CONTOURS (µg/L)
 - SURFACE WATER
 - FENCE
 - ▭ ERP SITE BOUNDARY

SAMPLE LOCATION — MW691X04
 TCE (µg/L) — 0.21 J
 FLAG — J

NOTES:
 J = REPORTED ANALYTICAL DATA IS ESTIMATED
 ND = NOT DETECTED; THE TCE LIMIT OF DETECTION FOR NONDETECTS IS 0.4 µg/L.
 DATA POSTED ARE THE MOST RECENT DATA AVAILABLE.

(1cm=24.2m)
 0 70 140
 FEET

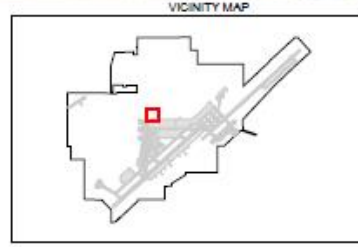
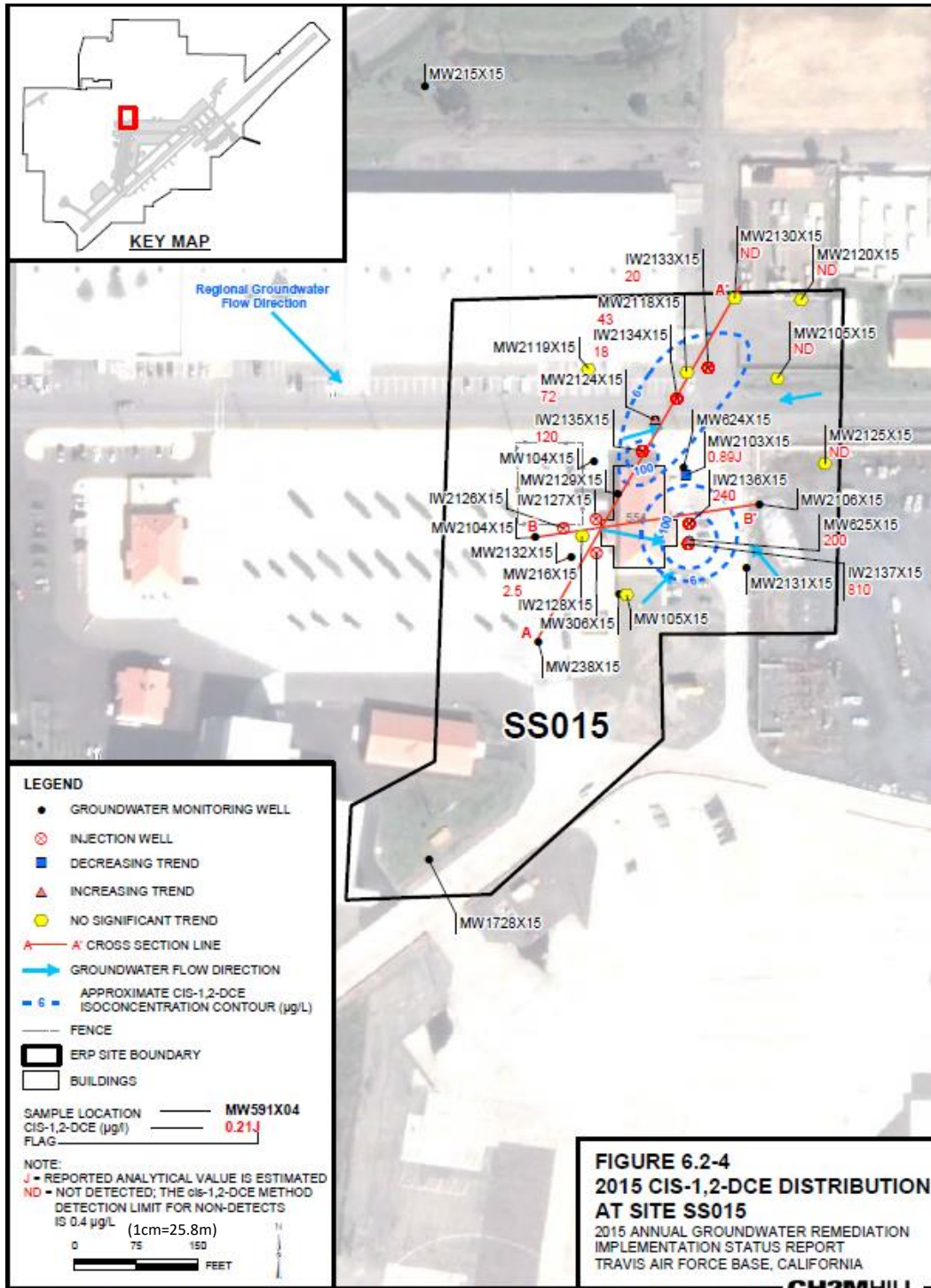
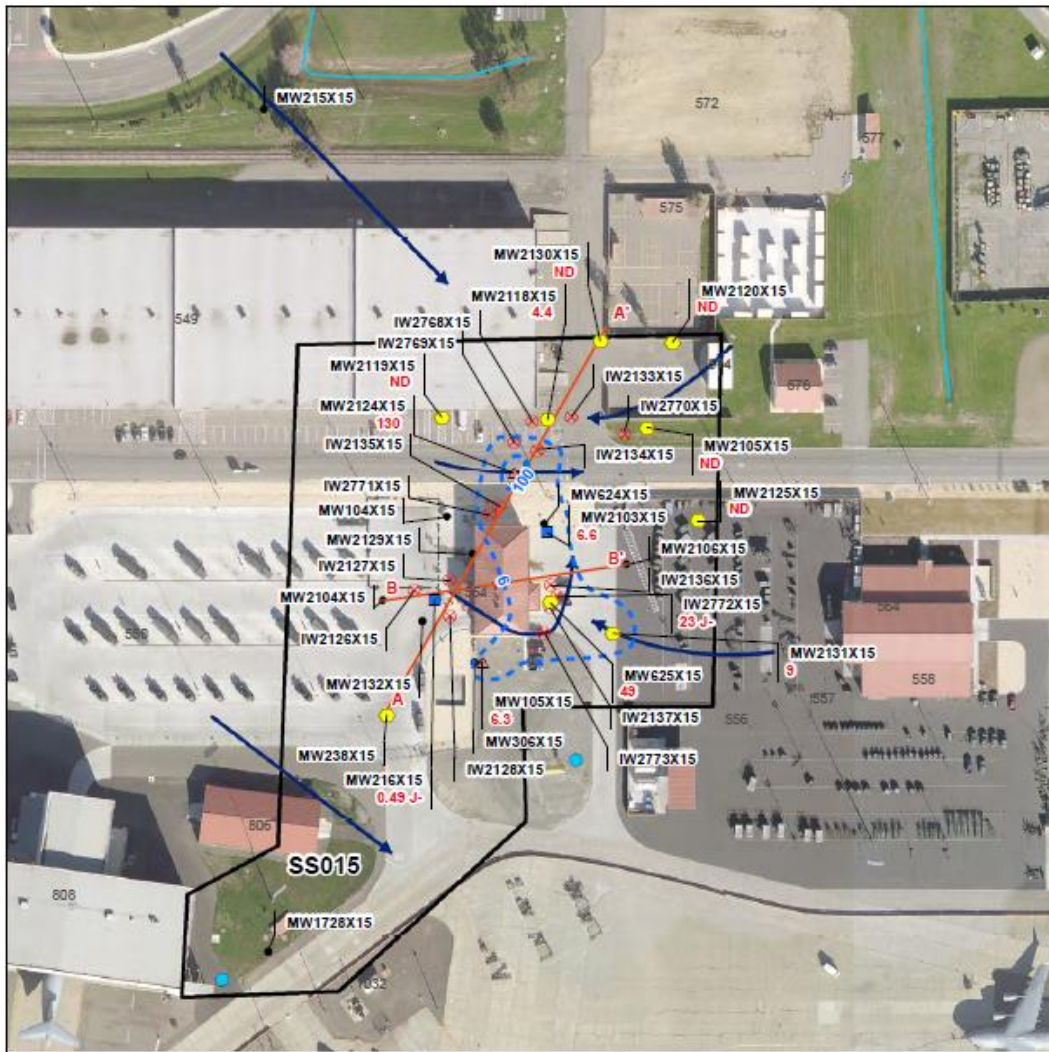


FIGURE 6.2-3
2020 TCE DISTRIBUTION AT
SITE SS015
 2020 ANNUAL GROUNDWATER REMEDIATION
 IMPLEMENTATION STATUS REPORT
 TRAVIS AIR FORCE BASE, CALIFORNIA

Σχήμα Α.3.6 Ρυπασμένες περιοχές με TCE το 2020 στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις (CH2MHILL, 2021)



Σχήμα A.3.7 Ρυπασμένες περιοχές με cis 1,2 DCE το 2015 στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις (CH2MHILL, 2016b)



- LEGEND**
- GROUNDWATER MONITORING WELL
 - ⊕ INJECTION WELL
 - ⬇️ DECREASING TREND
 - ⬆️ INCREASING TREND
 - NO SIGNIFICANT TREND
 - MANHOLE
 - 15 ≈ APPROXIMATE ISOCONCENTRATION CONTOURS (µg/L)
 - ➔ GROUNDWATER FLOW DIRECTION
 - SURFACE WATER
 - CROSS SECTION LINE
 - FENCE
 - ▭ ERP SITE BOUNDARY

SAMPLE LOCATION — MW681X04
 cis-1,2-DCE (µg/L) — 0.21 J
 FLAG

NOTE:
 J = REPORTED ANALYTICAL VALUE IS ESTIMATED
 ND = NOT DETECTED; THE cis-1,2-DCE LIMIT OF DETECTION FOR NONDETECTS IS 0.4 µg/L

DATA POSTED ARE THE MOST RECENT DATA AVAILABLE.

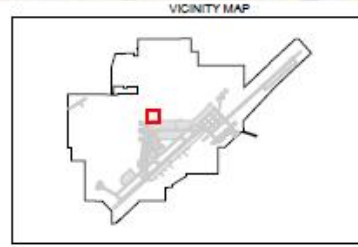
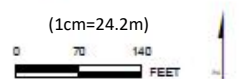
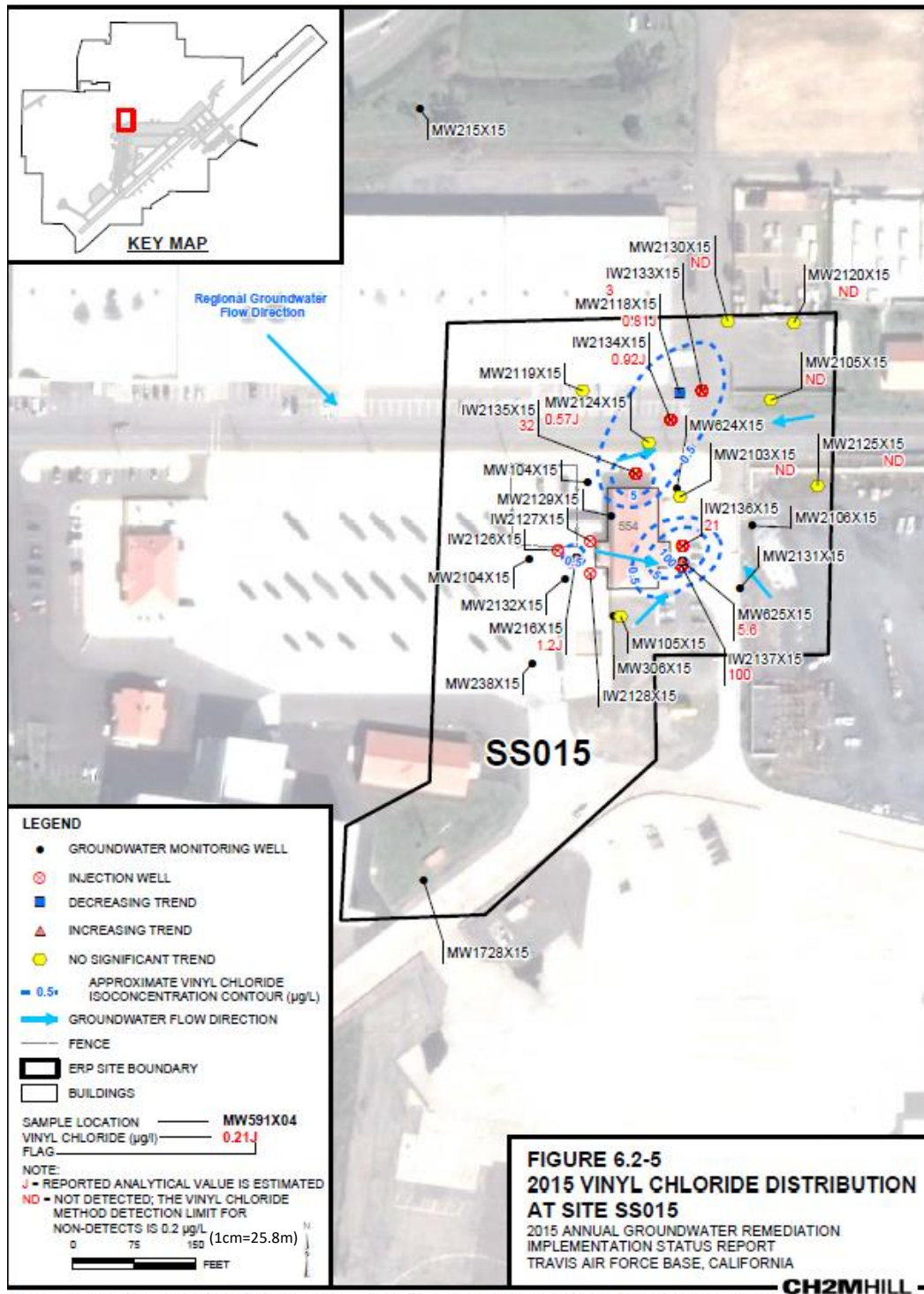
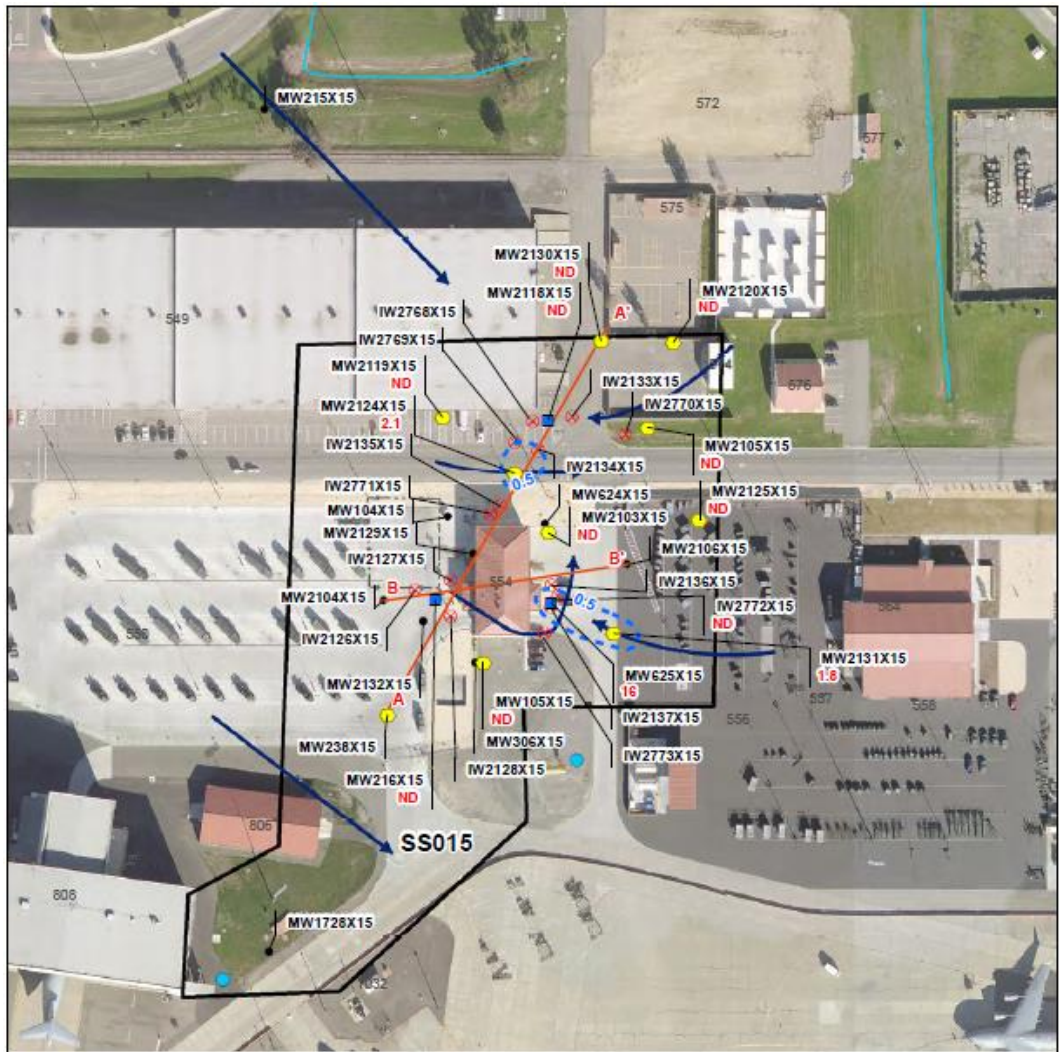


FIGURE 6.2-4
2020 CIS-1,2-DCE DISTRIBUTION AT
SITE SS015
 2020 ANNUAL GROUNDWATER REMEDIATION
 IMPLEMENTATION STATUS REPORT
 TRAVIS AIR FORCE BASE, CALIFORNIA
CH2MHILL

Σχήμα Α.3.8 Ρυπασμένη περιοχή με cis 1,2 DCE το 2020 στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις (CH2MHILL, 2021)



Σχήμα Α.3.9 Ρυπασμένες περιοχές με VC το 2015 στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις (CH2MHILL, 2016b)



LEGEND

- GROUNDWATER MONITORING WELL
- ⊕ INJECTION WELL
- ⬇️ DECREASING TREND
- ⬆️ NO SIGNIFICANT TREND
- MANHOLE
- ⊕ APPROXIMATE ISOCONCENTRATION CONTOURS (µg/L)
- ➔ GROUNDWATER FLOW DIRECTION
- SURFACE WATER
- A— A' CROSS SECTION LINE
- FENCE
- ▭ ERP SITE BOUNDARY

SAMPLE LOCATION — MW691X04
 Vinyl chloride (µg/L) — 0.21 J
 FLAG

NOTES:
 J = REPORTED ANALYTICAL VALUE IS ESTIMATED
 ND = NOT DETECTED; THE VINYL CHLORIDE LIMIT OF DETECTION FOR NONDETECTS IS 0.2 µg/L.
 DATA POSTED ARE THE MOST RECENT DATA AVAILABLE.

(1cm=24.2m)
 0 70 140 FEET

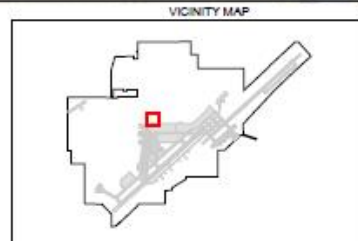
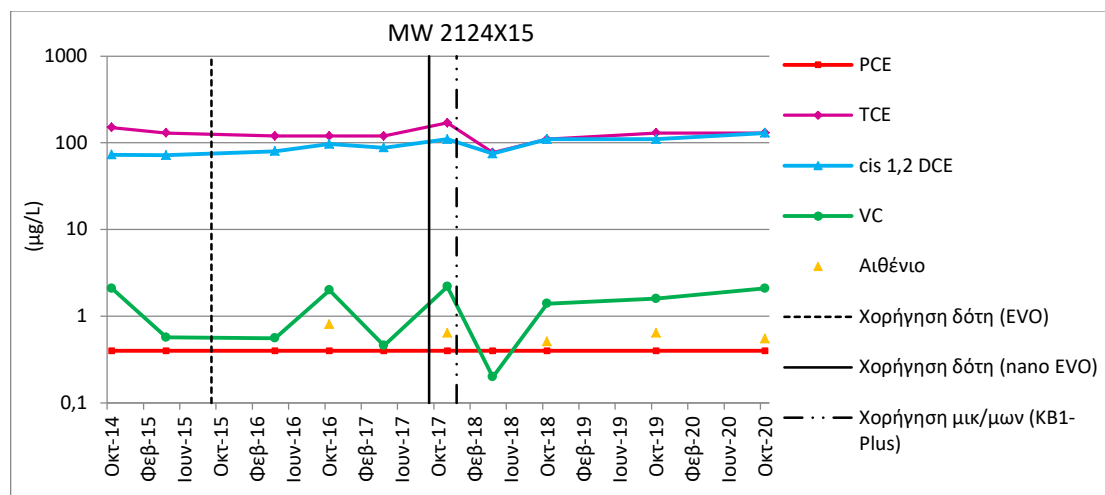


FIGURE 6.2-5
2020 VINYL CHLORIDE DISTRIBUTION AT SITE SS015
 2020 ANNUAL GROUNDWATER REMEDIATION IMPLEMENTATION STATUS REPORT
 TRAVIS AIR FORCE BASE, CALIFORNIA

Σχήμα Α.3.10 Ρυπασμένες περιοχές με VC το 2020 στην Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις (CH2MHILL, 2021)

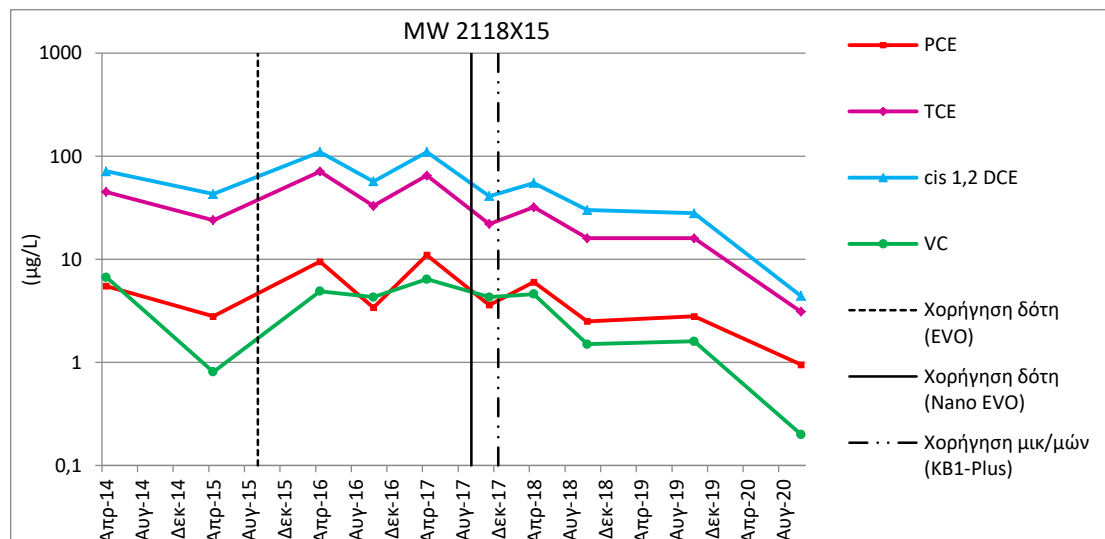
Στο πηγάδι παρακαλούθησης MW2124X15 καταγράφονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις TCE και cis 1,2 DCE στην πλέον πρόσφατη μέτρηση. Αν και πραγματοποιήθηκε και μία προσθήκη μικροοργανισμών κατά τα τέλη του 2017, δεν υπήρξε πρόοδος και οι συγκεντρώσεις TCE και cis 1,2 DCE παρέμειναν σταθερές από την έναρξη της εφαρμογής πλήρους κλίμακας το 2015

(Σχήμα Α.3.11). Το πηγάδι παρακολούθησης MW2124X15 κατατάσσεται στα πηγάδια παρακολούθησης με συμπεριφορά στασιμότητα.



Σχήμα Α.3.11 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW2124X15 της Περιοχής SS015 στη Βάσης Τράβις (CH2MHILL, 2016a; 2016b; 2017b; 2019a; 2019b; 2020; 2021)

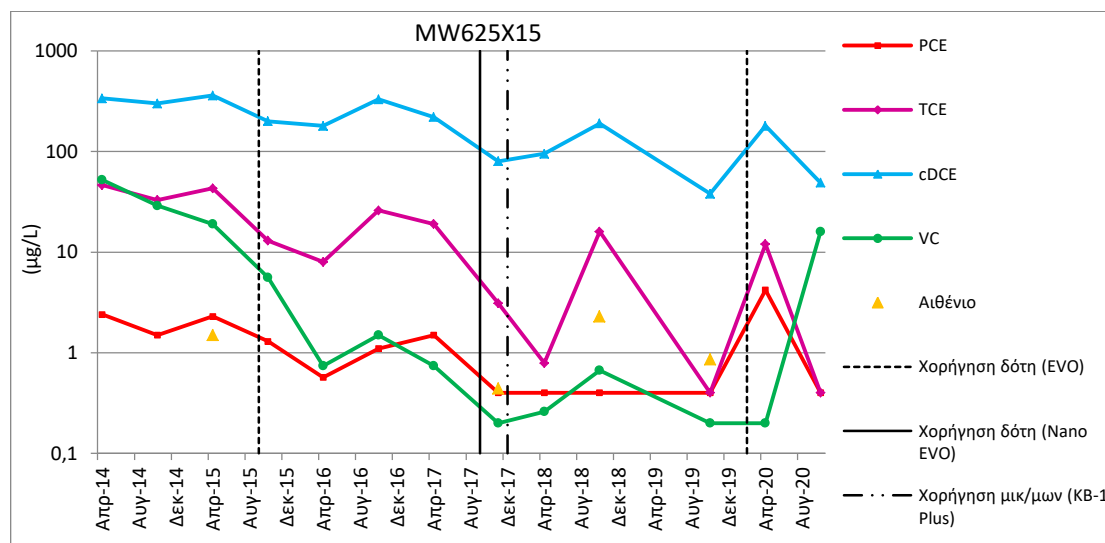
Στο πηγάδι MW2118X15, σχεδόν τέσσερα χρόνια μετά από την προσθήκη δότη (nano EVO) και μικροοργανισμών, οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθινίων είναι μικρότερες από τα όρια αποκατάστασης.



Σχήμα Α.3.12 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW2118X15 της Περιοχής SS015 στη Βάσης Τράβις (CH2MHILL, 2016a; 2016b; 2017b; 2019a; 2019b; 2020; 2021)

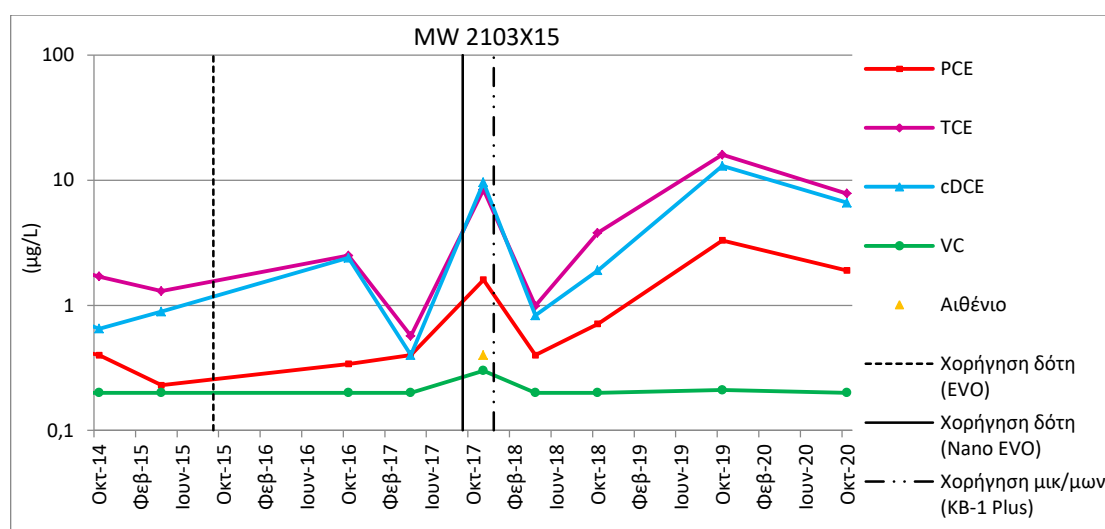
Το πηγάδι παρακολούθησης MW625X15 αποτέλεσε το πηγάδι άντλησης του υπόγειου νερού κατά τη δίμηνη λειτουργία του συστήματος επανακυκλοφορίας νερού το 2020. Στην πλέον πρόσφατη μέτρηση καταγράφεται μείωση των πρωτογενών ρύπων και απότομη αύξηση της συγκέντρωσης VC, γεγονός που υποδηλώνουν ότι η αποχλωρίωση προχώρησε (Σχήμα

A.3.13). Το πηγάδι αυτό κατατάσσεται στα πηγάδια παρακολούθησης με συμπεριφορά στασιμότητα.



Σχήμα A.3.13 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW625X15 της Περιοχής SS015 στη Βάσης Τράβις (CH2MHILL, 2016a; 2016b; 2017b; 2019a; 2019b; 2020; 2021)

Αν και κατά την έναρξη της εφαρμογής πλήρους κλίμακας στην περιοχή, οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθινίων στο πηγάδι MW2103X15 (Σχήμα A.3.14) ήταν μικρότερες από τα όρια αποκατάστασης, στην πλέον πρόσφατη μέτρηση οι συγκεντρώσεις των PCE, TCE και cis 1,2 DCE έχουν σημειώσει αύξηση κατά μία τάξη μεγέθους και η συγκέντρωση VC παρέμεινε σταθερά σε μη ανιχνεύσιμα επίπεδα κατά το χρονικό διάστημα 2015-2020. Το πηγάδι αυτό κατατάσσεται στα πηγάδια παρακολούθησης με συμπεριφορά στασιμότητα.



Σχήμα A.3.14 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW2103X15 της Περιοχής SS015 στη Βάσης Τράβις (CH2MHILL, 2016a; 2016b; 2017b; 2019a; 2019b; 2020; 2021)

Μελλοντικές ενέργειες. Σύμφωνα με την πλέον πρόσφατη Αναφορά Προόδου του περιστατικού (2021), δεν έχει προγραμματιστεί κάποια νέα ενέργεια απορρύπανσης. Η παρακολούθηση και οι δειγματοληψίες στην περιοχή θα συνεχιστούν με σκοπό την καταγραφή και την αξιολόγηση της προόδου της αποκατάστασης.

A.4 Περιστατικό ρύπανσης υπεδάφους με χλωροαιθένια: Ρυπασμένη έκταση στην πόλη Εσπανιόλα, Νέο Μεξικό, Η.Π.Α.

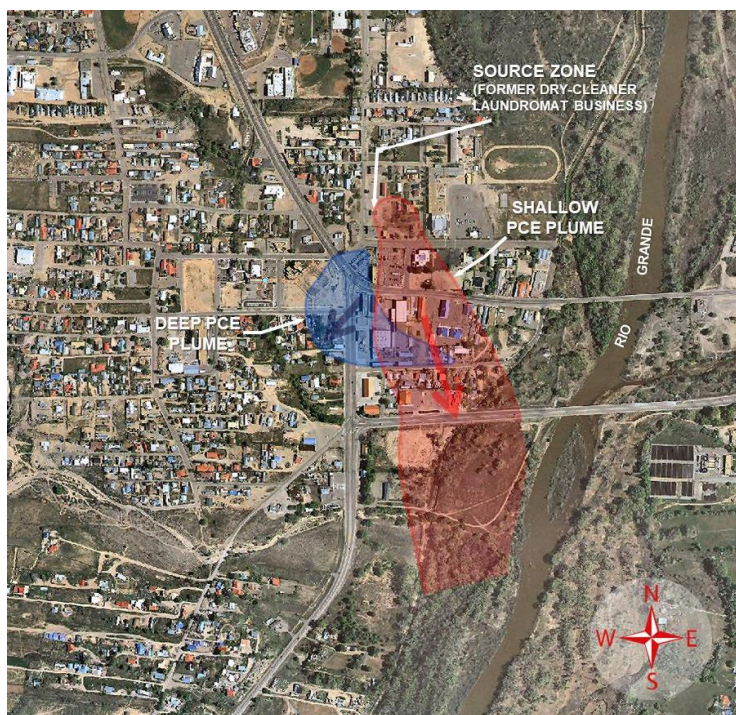
Κατηγορία χώρου. Η πόλη Εσπανιόλα βρίσκεται στο Νέο Μεξικό των Η.Π.Α.. Οι περιβαλλοντικές έρευνες στην πόλη ξεκίνησαν το 1989 και ανακαλύφθηκε η ρύπανση του υπόγειου νερού με PCE. Τον Ιανουάριο του 1999 η Αμερικάνικη Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος καταχώρησε το περιστατικό στη Λίστα Χώρων Προτεραιότητας. Η ρυπασμένη περιοχή βόρεια της πόλης Εσπανιόλας έχει έκταση περίπου 0.17 km² (βλέπε Σχήμα A.4.1). Ο χώρος περιλαμβάνει μία υποενότητα διαχείρισης της ρύπανσης (OU1) με την οποία θα ασχοληθούμε παρακάτω. Η ιδιαιτερότητα του περιστατικού αυτού έγκειται στην παρουσία DNAPL στην πηγή της ρύπανσης, αλλά και στο μεγάλο βάθος της ρύπανσης που φτάνει μέχρι και τα 80 μέτρα από την ελεύθερη επιφάνεια.

Ρυπογόνος δραστηριότητα. Η ρύπανση του υπόγειου νερού με χλωριωμένα αιθυλένια προκλήθηκε από στεγνοκαθαριστήριο που βρισκόταν στην περιοχή και λειτουργούσε κατά το χρονικό διάστημα 1970-2007. Θεωρείται πιθανό το ενδεχόμενο ύπαρξης μίας ακόμη πηγής ρύπανσης περίπου 150 μέτρα κατάντη του πρώην στεγνοκαθαριστηρίου, αφού από το 2012 και έπειτα ξεκίνησαν να καταγράφονται σταθερά αυξητικές τάσεις για τις συγκεντρώσεις των πρωτογενών χλωροαιθινίων σε πηγάδια παρακολούθησης της περιοχής, τα οποία προηγουμένως είχαν χαμηλές συγκεντρώσεις των ρύπων αυτών. Η σχετική έρευνα βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη.

Κύριοι ρύποι. Το 2001 στο υπόγειο νερό ανιχνεύτηκε σε συγκέντρωση PCE ίση με 110,000 μg/L σε βάθος περίπου 5 μέτρων από την ελεύθερη επιφάνεια στην περιοχή του πρώην στεγνοκαθαριστηρίου (USEPA, 2020). Η ύπαρξη DNAPL στην ρηχή στρώση του υδροφορέα στην πηγή της ρύπανσης είναι επιβεβαιωμένη.

Υδρογεωλογικές συνθήκες. Οι ρυπασμένοι υδροφορείς είναι δύο, ο ρηχός και ο βαθύς. Ο ρηχός υδροφορέας έχει πάχος περίπου 3 μέτρα, αποτελείται από αμμοχάλικο, έχει κατεύθυνση ροής κυρίως προς τα νότια και η υδραυλική αγωγιμότητα παίρνει τιμές στο εύρος $2.7 \cdot 10^{-6}$ - $3.6 \cdot 10^{-6}$ m/s. Ο βαθύς υδροφορέας χωρίζεται σε τέσσερις διαφορετικές στρώσεις, δύο ενδιάμεσες (ενδιάμεση στρώση 1 και 2) και δύο βαθύτερες (βαθεία στρώση 1 και 2), αποτελούμενες από λεπτόκοκκη άμμο με προσμίξεις ιλύος. Έχει κατεύθυνση ροής προς τα νότια/νοτιοδυτικά και η υδραυλική αγωγιμότητα παίρνει τιμές στο εύρος $1,5 \cdot 10^{-5}$ - $4 \cdot 10^{-5}$ m/s. Οι δύο ενδιάμεσες στρώσεις έχουν πάχος 15 μέτρα η κάθε μία και οι δύο βαθιές έχουν πάχος 14 και 11 μέτρα αντιστοίχως. Μεταξύ της ρηχής στρώσης και των βαθύτερων

παρεμβάλλεται στρώμα αμμώδους αργίλου και αργίλου με ιλύ το οποίο δεν είναι συνεχόμενο πλευρικά της πηγής ρύπανσης (USEPA, 2015).



Σχήμα Α.4.1 Ρυπασμένες εκτάσεις με τετραχλωροαιθέριο στο ρηχό και στο βαθύ υδροφορέα πριν την έναρξη της πιλοτικής δοκιμής το 2007 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα στο Νεό Μεξικό των Η.Π.Α. (Guerra et al., 2021)

Έργα Αποκατάστασης-Πιλοτική δοκιμή. Η πιλοτική δοκιμή βιοδιέγερσης ξεκίνησε το 2007 και διήρκεσε περίπου επτά μήνες. Διάφοροι δότες ηλεκτρονίων (EVO, γαλακτικός αιθελεστέρας, ορός τυρογάλακτος και μείγμα EVO και αέριου υδρογόνου) χορηγήθηκαν μαζί με θρεπτικά συστατικά στη ρηχή στρώση μέσω τεσσάρων διαφορετικών συστημάτων επανακυκλοφορίας νερού, αποτελούμενα από ένα πηγάδι ένεσης και ένα άντλησης το καθένα. Το ένα σύστημα βρισκόταν στην πηγή της ρύπανσης, με μέγιστη συγκέντρωση PCE κατά τις πρότερες συνθήκες ίση με 8,250 $\mu\text{g/L}$ και τα υπόλοιπα 3 βρισκόντουσαν 40-70 μέτρα κατάντη αυτής (περιοχή επονομαζόμενη ως Hotspot) και οι μέγιστες συγκεντρώσεις PCE κατά τις πρότερες συνθήκες ήταν της τάξεως των 1,000 $\mu\text{g/L}$. Σκοπός της πιλοτικής δοκιμής ήταν η επιλογή του καταλληλότερου δότη και η χορήγησή του κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας τόσο στη ρηχή, όσο και στις βαθύτερες στρώσεις (Guerra et al., 2021). Το ενδεχόμενο η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης κατά τη διενέργεια πιλοτικής δοκιμής να είναι η βιοεπαύξηση δεν εξετάστηκε, αφού στα στο υπόγειο νερό είχαν ήδη ανιχνευτεί χαμηλές συγκεντρώσεις VC στο παρελθόν. Επίσης, είχαν ανιχνευτεί συγκεντρώσεις πετρελαιοειδών, τα οποία θα μπορούσαν ενδεχομένως να λειτουργήσουν ως δότες ηλεκτρονίων. Τα πετρελαιοειδή είχαν ρυπάνει το υπόγειο νερό της περιοχής κατά τη διαρροή

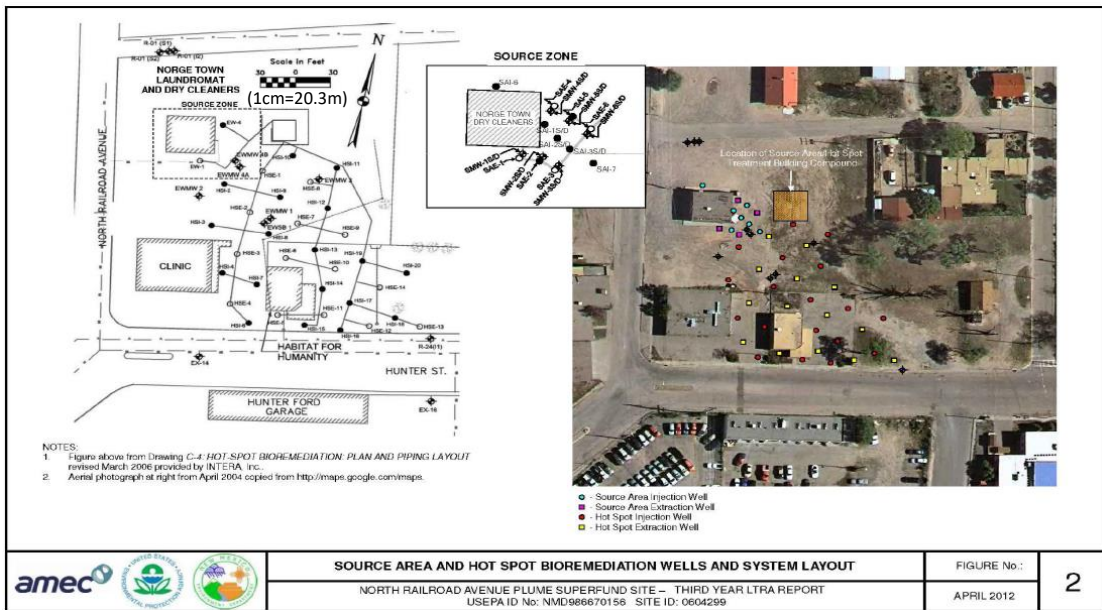
τους από πρατήριο καυσίμων σε κοντινή απόσταση από το πρώην στεγνοκαθαριστηρίου (Guerra et al., 2021).

Αποτελέσματα πιλοτικής δοκιμής. Πέντε περίπου μήνες μετά από την έναρξη της πιλοτικής δοκιμής, μονάχα στην περιοχή του συστήματος όπου ο δότης που χορηγήθηκε ήταν το γαλακτοποιημένο φυτικό λάδι (EVO) αυξήθηκε η συγκέντρωση VC στο υπόγειο νερό και επομένως υπήρξε η ένδειξη ότι η αποχλωριωτική διαδικασία προχωρά. Το EVO θεωρήθηκε ο καταλληλότερος δότης ηλεκτρονίων και πραγματοποιήθηκε μία επαναληπτική χορήγηση EVO και στα τέσσερα συστήματα επανακυκλοφορίας νερού (Guerra et al., 2021). Η πιλοτική δοκιμή ολοκληρώθηκε τον Ιανουάριο του 2008.

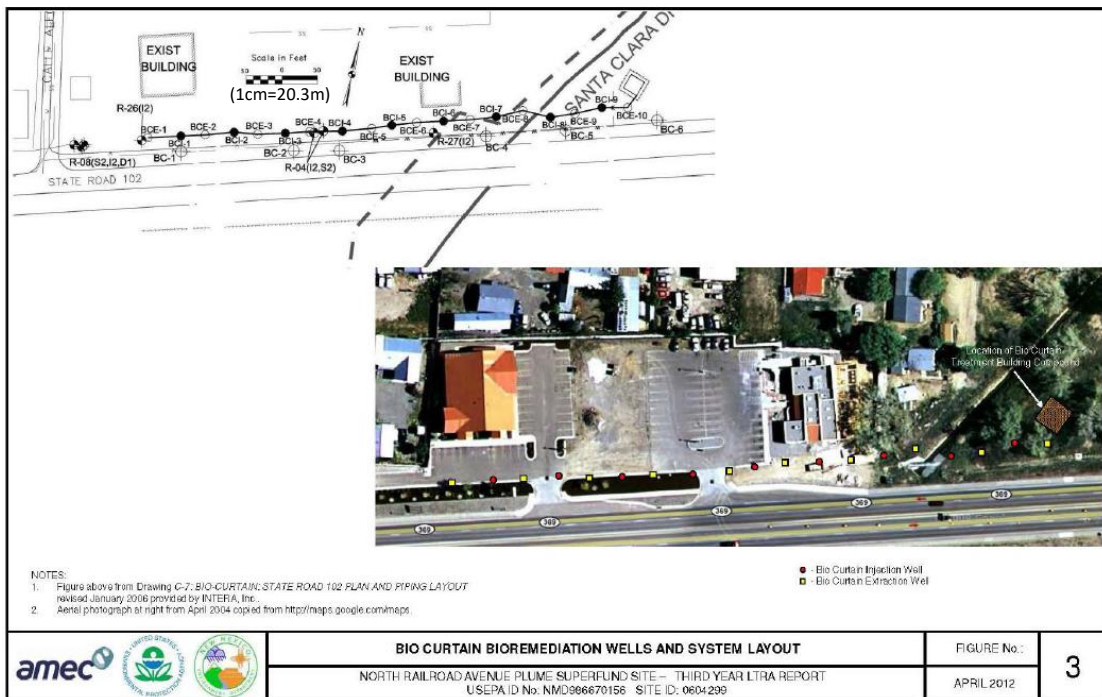
Στόχοι αποκατάστασης. Τα όρια αποκατάστασης είναι τα 5 $\mu\text{g/L}$ για τα PCE και TCE, τα 70 $\mu\text{g/L}$ για το cis 1,2 DCE και τα 2 $\mu\text{g/L}$ για το VC.

Έργα Αποκατάστασης-Εφαρμογή πλήρους κλίμακας. Η εφαρμογή πλήρους κλίμακας ξεκίνησε το 2008 μετά από τη λήξη της πιλοτικής δοκιμής και σήμερα βρίσκεται σε εξέλιξη. Η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η βιοδιέγερση, με στόχο την αποκατάσταση του ρυπασμένου υπόγειου νερού τόσο στον ρηχό, όσο και στον βαθύ υδροφορέα. Παρακάτω αναφέρονται τα συστήματα χορήγησης δότη ανά περιοχή υλοποίησης:

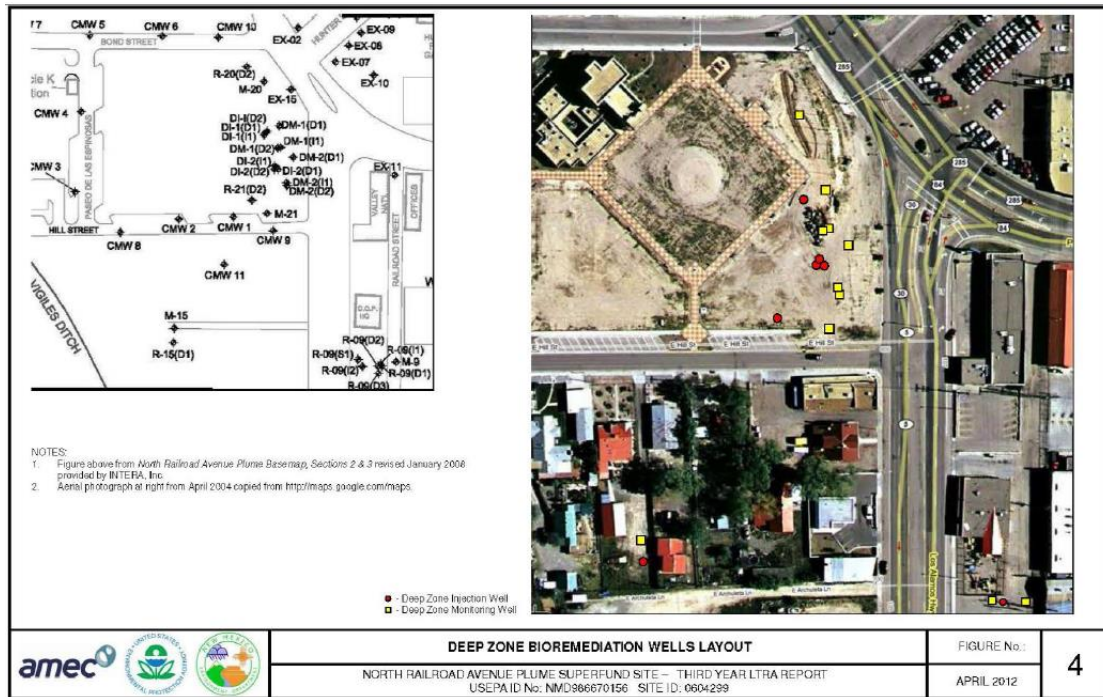
- Στην πηγή της ρύπανσης, ο χορηγούμενος δότης στη ρηχή στρώση του υδροφορέα ήταν το γαλακτοποιημένο φυτικό λάδι (EVO). Η χορήγησή του γινόταν μέσω συστήματος επανακυκλοφορίας νερού που αποτελείται από επτά πηγάδια ένεσης και έξι πηγάδια άντλησης (Σχήμα A.4.2).
- Στην περιοχή Hotspot, η οποία εκτείνεται περίπου 70 μέτρα κατάντη της πηγής, ο χορηγούμενος δότης στη ρηχή στρώση του υδροφορέα ήταν ο γαλακτικός αιθυλεστέρας. Η χορήγησή του γινόταν μέσω συστήματος επανακυκλοφορίας νερού που αποτελείται 18 πηγάδια ένεσης και 14 πηγάδια άντλησης (Σχήμα A.4.2).
- Περίπου 300 μέτρα κατάντη της πηγής ρύπανσης, γαλακτοποιημένο φυτικό λάδι (EVO) χορηγήθηκε στη ρηχή στρώση του υδροφορέα μέσω συστήματος επανακυκλοφορίας νερού που αποτελείται από εννέα πηγάδια ένεσης και 10 πηγάδια άντλησης (Biocurtain Remediation System). Τα πηγάδια του συστήματος είναι στοιχισμένα εναλλάξ σε ευθεία γραμμή μήκους περίπου 200 μέτρων κάθετα στην κατεύθυνση κίνησης του υπόγειου νερού (Σχήμα A.4.3).
- Στις βαθειές στρώσεις, ο χορηγούμενος δότης ήταν το γαλακτοποιημένο φυτικό λάδι (EVO). Η χορήγησή του μαζί με θρεπτικά συστατικά γινόταν μέσω επτά πηγαδιών ένεσης (Σχήμα A.4.4).



Σχήμα Α.4.2 Τοποθεσίες πηγαδιών άντλησης και ένεσης στην πηγή της ρύπανσης (χορηγούμενος δότης το EVO στη ρηχή στρώση) και στην περιοχή Hotspot (χορηγούμενος δότης το γαλακτικό ανιόν στη ρηχή στρώση) κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015)



Σχήμα Α.4.3 Τοποθεσίες πηγαδιών άντλησης και ένεσης 300 μέτρα κατάντη της πηγής ρύπανσης (χορηγούμενος δότης το EVO στη ρηχή στρώση) κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015)



Σχήμα Α.4.4 Τοποθεσίες πηγαδιών ένεσης στις βαθιές στρώσεις 1 και 2 (χορηγούμενος δότης το EVO) κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015)

Εκτιμηθείς χρόνος αποκατάστασης. Ο εκτιμηθείς χρόνος ολοκλήρωσης της αποκατάστασης είναι 30 έτη (USEPA, 2020).

Χρονικό διάστημα παρακολούθησης. Η πλέον πρόσφατη μέτρηση πραγματοποιήθηκε το Μάιο του 2019.

Μεταβολή συγκεντρώσεων και ρυπασμένης έκτασης. Αρχικά σημειώνεται ότι παρά το γεγονός ότι η εφαρμογή πλήρους κλίμακας ξεκίνησε το 2008, οι μετρήσεις που έγιναν κατά τις αρχικές συνθήκες αφορούν στις δειγματοληψίες του 2007, δηλαδή πριν από τη διενέργεια της πιλοτικής δοκιμής στην πηγή της ρύπανσης. Επίσης, στις Αναφορές Προόδου Πενταετίας του περιστατικού δεν δίνονται οι ρυπασμένες περιοχές με χλωροαιθένια κατά τις αρχικές συνθήκες. Έτσι, δεδομένων των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν τα έτη 2007 και 2019 και προκειμένου να προσδιοριστεί η μεταβολή της ρυπασμένης έκτασης ανά στρώση υδροφορέα, σχεδιάστηκαν και παρουσιάζονται στα Σχήματα Α.4.5 έως Α.4.11 οι ρυπασμένες περιοχές με χλωροαιθένια στη ρηχή, στη βαθιά στρώση 1 και βαθιά στρώση 2. Οι περιβάλλουσες των Σχημάτων αυτών αφορούν στο άθροισμα των συγκεντρώσεων των χλωροαιθινίων και για κάθε πηγάδι παρακολούθησης δίνονται αναλυτικά οι συγκεντρώσεις ανά χλωροαιθένιο και ανά χρονολογία.

Το 2007 η ρύπανση στη ρηχή στρώση εκτεινόταν για περίπου 800 μέτρα στην κατεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού, η μέγιστη συγκέντρωση ήταν ίση με 65,000 μg/L στην πηγή της ρύπανσης και αφορούσε στο PCE. Στο Σχήμα Α.4.5 παρουσιάζεται η ρυπασμένη έκταση

με χλωροαιθένια το 2007 στη ρηχή στρώση του υδροφορέα και συγκεκριμένα στην πηγή της ρύπανσης και αμέσως κατόντη αυτής (Hotspot περιοχή). Στο Σχήμα Α.4.6 παρουσιάζεται συνολικά η ρυπασμένη περιοχή της ρηχής στρώσης το 2007. Η ρυπασμένη περιοχή το 2019 έχει αποκατασταθεί με εξαίρεση τις περιοχές της πηγής ρύπανσης και Hotspot, στις οποίες η μέγιστη συγκέντρωση είναι πλέον ίση με 10,000 µg/L και αφορά στο cis 1,2 DCE. Στο Σχήμα Α.4.7 παρουσιάζεται η ρυπασμένη έκταση με χλωροαιθένια το 2019 στη ρηχή στρώση του υδροφορέα. Στην Αναφορά Προόδου Πενταετίας του περιστατικού το 2020 δίνονται οι ρυπασμένες εκτάσεις με PCE, TCE και VC της ρηχής στρώσης το 2019.



Σχήμα Α.4.5 Ρυπασμένη έκταση με χλωροαιθένια στην πηγή της ρύπανσης και αμέσως κατάντη αυτής (Hotspot) στη ρηχή στρώση στην πόλη Εσπανιόλα το 2007 (χάρτης από δορυφόρο-Google Earth Pro)



Σχήμα Α.4.6 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένια στη ρηχή στρώση στην πόλη Εσπανιόλα το 2007 (χάρτης από δορυφόρο-Google Earth Pro)



Σχήμα Α.4.7 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένια στη ρηχή στρώση στην πόλη Εσπανιόλα το 2019 (χάρτης από δορυφόρο-Google Earth Pro)

Όσον αφορά στις ενδιάμεσες στρώσεις 1 και 2, κατά την έναρξη της εφαρμογής πλήρους κλίμακας οι μέγιστες συγκεντρώσεις ήταν ίσες με 26 µg/L και 48 µg/L αντίστοιχα. Λόγω των σημαντικά μικρότερων συγκεντρώσεων στις στρώσεις αυτές συγκριτικά με τις δύο βαθύτερες στρώσεις, στην περιοχή εγκαταστάθηκαν δύο πηγάδια ένεσης με σκοπό τη χορήγηση δότη στις ενδιάμεσες στρώσεις. Ωστόσο, τα πηγάδια ένεσης δότη τελικώς ήταν εγκατεστημένα εκτός των περιοχών με τις μέγιστες συγκεντρώσεις χλωροαιθενίων, λόγω λανθασμένης εκτίμησης των ρυπασμένων περιοχών στις στρώσεις αυτές. Κατά το χρονικό διάστημα 2009-2019 δεν έχει πραγματοποιηθεί καμία νέα ενέργεια με σκοπό την αποκατάσταση του ρυπασμένου υπόγειου νερού στις ενδιάμεσες στρώσεις (USEPA, 2020).

Η ρύπανση στις δύο βαθιές στρώσεις εκτεινόταν για περίπου 400 μέτρα στην κατεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού το 2007 (βλέπε Σχήματα A.4.8 και A.4.9). Στη βαθιά στρώση 1 η μέγιστη συγκέντρωση ήταν ίση με 750 µg/L και στη βαθιά στρώση 2 ήταν ίση με 530 µg/L και αμφότερες αφορούσαν στο PCE. Η ρυπασμένη περιοχή της βαθιάς στρώσης 1 το 2019 έχει παραμείνει περίπου σταθερή και με ίδια τάξη μεγέθους μέγιστες συγκεντρώσεις (310 µg/L το 2019 για το PCE). Η ρυπασμένη περιοχή της βαθιάς στρώσης 2 το 2019 έχει παραμείνει επίσης σχεδόν σταθερή αλλά οι μέγιστες συγκεντρώσεις έχουν σημειώσει μείωση κατά μία τάξη μεγέθους (85 µg/L το 2019 για το PCE). Στα Σχήματα A.4.10 και A.4.11 παρουσιάζονται οι ρυπασμένες περιοχές με χλωροαιθένια το 2019 για τη βαθιά στρώση 1 και 2 αντίστοιχα. Στην Αναφορά Προόδου Πενταετίας του περιστατικού το 2020 δίνονται οι ρυπασμένες εκτάσεις με PCE και TCE των βαθύτερων στρώσεων 1 και 2 το 2019.



Σχήμα Α.4.8 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένη στη βαθιά στρώση 1 στην πόλη Εσπανιόλα το 2007 (χάρτης από δορυφόρο-Google Earth Pro)



Σχήμα Α.4.9 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένη στη βαθειά στρώση 2 στην πόλη Εσπανίολα το 2007 (χάρτης από δορυφόρο-Google Earth Pro)

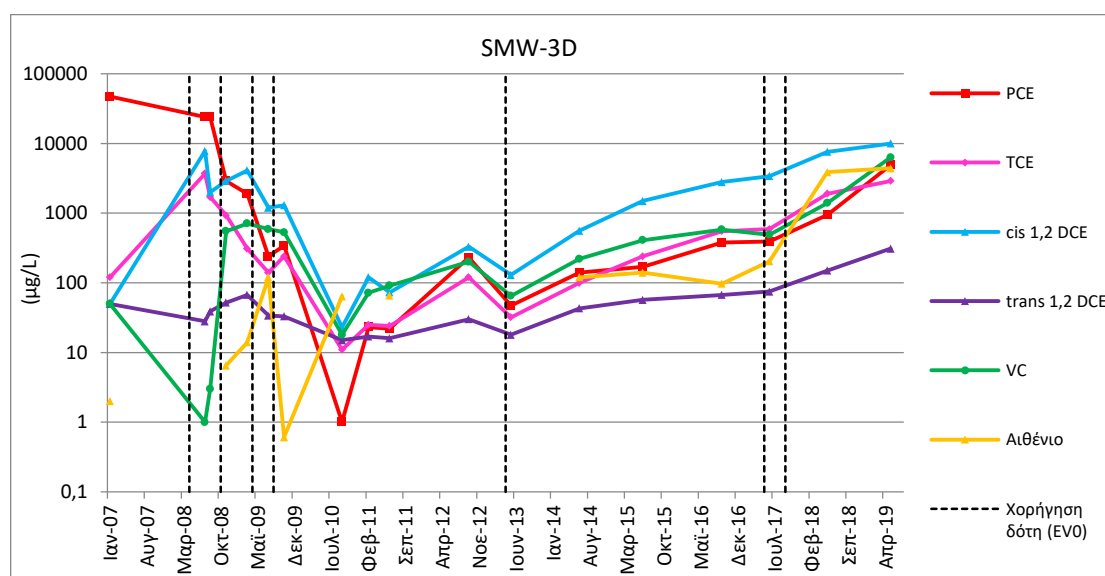


Σχήμα Α.4.10 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένια στη βαθιά στρώση 1 στην πόλη Εσπανιόλα το 2019 (χάρτης από δορυφόρο-Google Earth Pro)

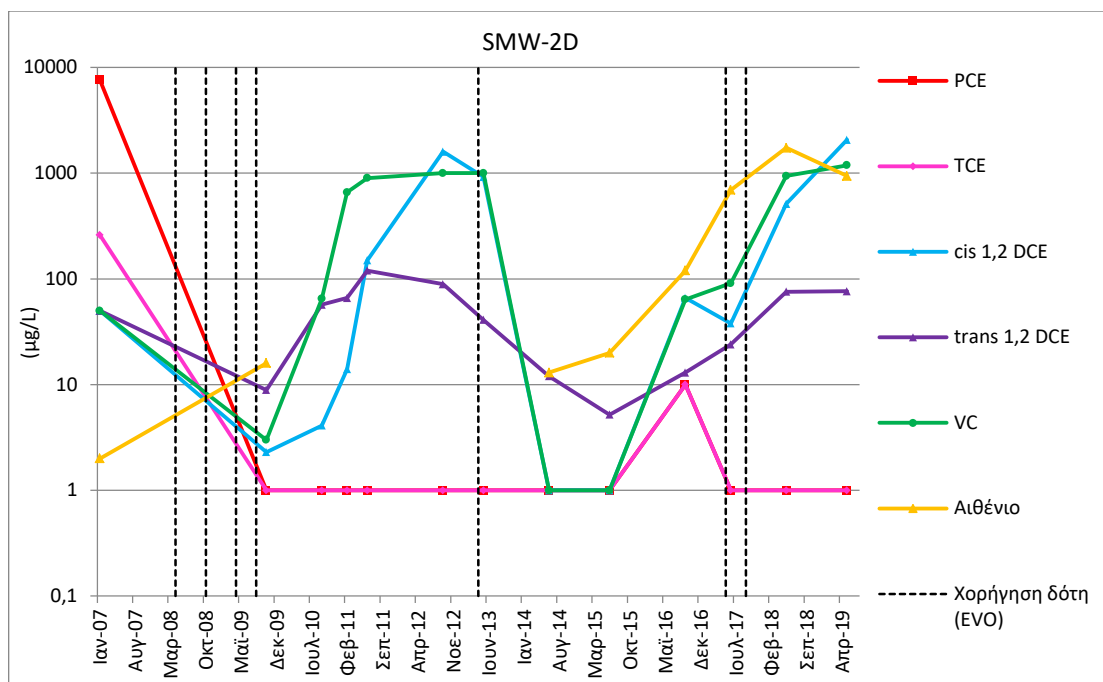


Σχήμα Α.4.11 Ρυπασμένη περιοχή με χλωροαιθένια στη βαθειά στρώση 2 στην πόλη Εσπανιόλα το 2019 (χάρτης από δορυφόρο-Google Earth Pro)

Τα πηγάδια SMW-3D και SMW-2D είναι πηγάδια παρακολούθησης της ρηχής στρώσης στην πηγή της ρύπανσης. Και τα δύο αυτά πηγάδια κατατάσσονται στα πηγάδια παρακολούθησης με συμπεριφορά υποτροπή. Μάλιστα, στο πηγάδι δειγματοληψίας SMW-3D (Σχήμα Α.4.12) η αύξηση των συγκεντρώσεων διαφέρει ποιοτικά από την αντίστοιχη που καταγράφεται στα πηγάδια των Περιοχών 5 και 6 της Βάσης Ντόβερ με την ίδια συμπεριφορά. Η αύξηση των συγκεντρώσεων που καταγράφεται στο SMW-3D είναι πιο σταδιακή· από τα μέσα του 2013 οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθενίων, αλλά και του αιθένιου, ξεκινούν να έχουν αυξητικές τάσεις και στην πλέον πρόσφατη μέτρηση (σχεδόν έξι χρόνια μετά) έχουν κορυφωθεί. Στις προαναφερθείσες περιοχές (Περιοχές 5 και 6 της Βάσης Ντόβερ), οι αυξήσεις ήταν πιο απότομες και αφορούσαν κυρίως στα θυγατρικά προϊόντα. Αν και στο SMW-3D η μέγιστη συγκέντρωση το 2019 αφορά στο cis 1,2 DCE (10,000 µg/L), σταθερά αυξητική τάση είχαν και οι συγκεντρώσεις των PCE και TCE κατά το χρονικό διάστημα 2013-2019. Παρόμοια συμπεριφορά είχε και το πηγάδι παρακολούθησης SMW-2D (Σχήμα Α.4.13). Παρότι και στα δύο αυτά πηγάδια πραγματοποιήθηκαν δύο προσθήκες δότη το 2017, οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθενίων παρέμειναν σε αυξημένες τιμές μέχρι την πλέον πρόσφατη μέτρηση.

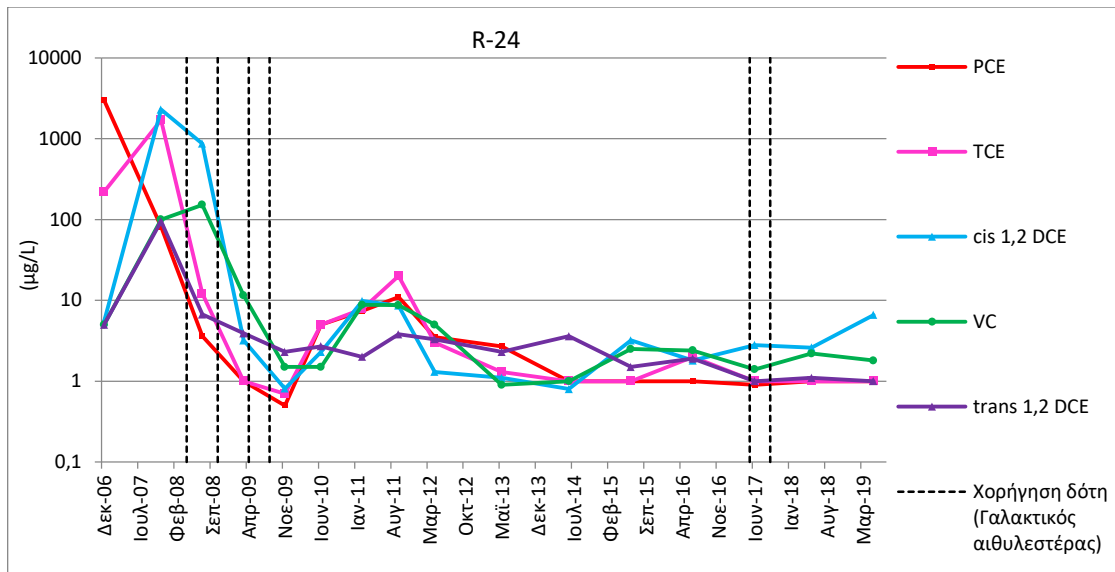


Σχήμα Α.4.12 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης SMW-3D της ρηχής στρώσης (στην πηγή της ρύπανσης) στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)

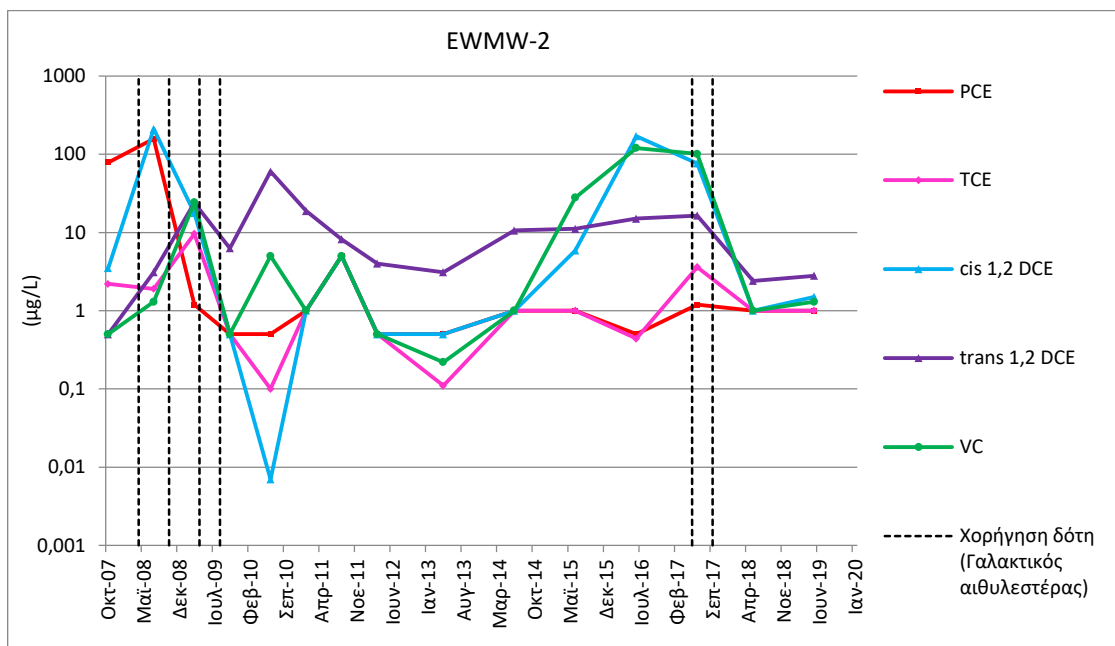


Σχήμα A.4.13 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης SMW-2D της ρηχής στρώσης (στην πηγή της ρύπανσης) στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)

Η πρόοδος στην περιοχή Hotspot ήταν μεγαλύτερη από εκείνη που σημειώνεται στην πηγή της ρύπανσης για τη ρηχή στρώση. Κατά τις αρχικές συνθήκες στην περιοχή Hotspot οι μέγιστες συγκεντρώσεις ήταν της τάξεως των 1,000 µg/L και αφορούσαν στο PCE. Στο πηγάδι παρακολούθησης R-24 (συμπεριφορά πρόοδος, Σχήμα A.4.14) οι συγκεντρώσεις όλων των χλωροαιθινίων μειώθηκαν απότομα αμέσως μετά από τους πρώτους γύρους χορήγησης δότη και παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα μέχρι το 2019. Στο πηγάδι παρακολούθησης EWMW-2 (Σχήμα A.4.15) κατά το φθινόπωρο του 2014 οι συγκεντρώσεις των θυγατρικών προϊόντων παρουσίασαν αύξηση κατά δύο τάξεις μεγέθους μέσα σε περίπου τρία χρόνια. Οι επαναληπτικές χορηγήσεις δότη που πραγματοποιήθηκαν το 2017 ήταν επιτυχημένες· οι συγκεντρώσεις των θυγατρικών προϊόντων επανήλθαν σε τιμές της τάξεως του 1 µg/L στην πλέον πρόσφατη μέτρηση (2019). Το πηγάδι αυτό κατατάσσεται στα πηγάδια παρακολούθησης με συμπεριφορά υποτροπή.



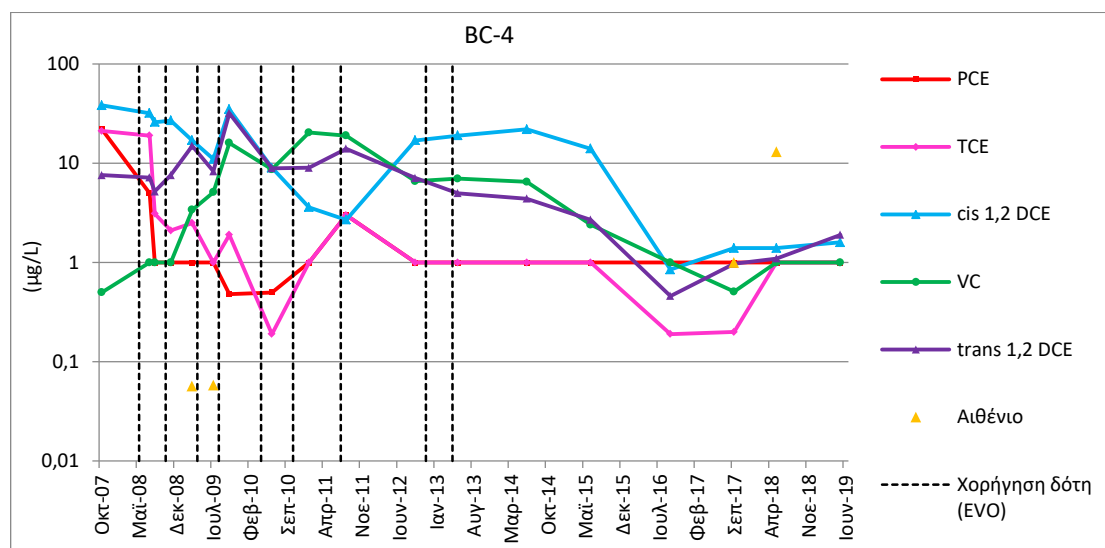
Σχήμα Α.4.14 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης R-24 της ρηχής στρώσης (στην περιοχή Hotspot) στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)



Σχήμα Α.4.15 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης EWMW-2 της ρηχής στρώσης (στην περιοχή Hotspot) στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)

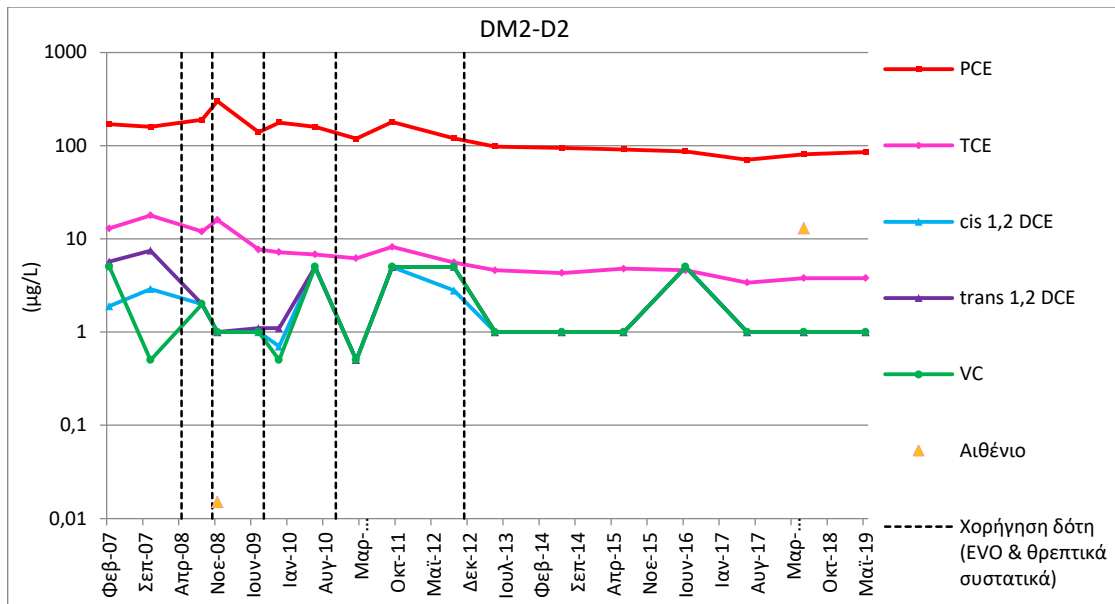
Όσον αφορά στο σύστημα επανακυκλοφορίας νερού που βρίσκεται περίπου 300 μέτρα κατάντη της πηγής ρύπανσης και της περιοχής Hotspot, οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθινίων ήταν ήδη αρκετά μικρές κατά την έναρξη της εφαρμογής πλήρους κλίμακας· στα περισσότερα πηγάδια παρακολούθησης στην τοποθεσία οι πρωτογενείς ρύποι ανιχνεύονταν σε συγκεντρώσεις της τάξεως των 10 µg/L το 2007. Για το λόγο αυτό, φαίνεται ότι το σύστημα αυτό εγκαταστάθηκε στη συγκεκριμένη τοποθεσία με σκοπό να μην επεκταθεί

περαιτέρω η ρύπανση προς τα κατάντη. Ενδεικτικά στο Σχήμα A.4.16 δίνεται η χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης BC-4. Κατά τις αρχικές συνθήκες η μέγιστη συγκέντρωση στο πηγάδι αυτό ήταν ίση με 40 µg/L και αφορούσε στο cis 1,2 DCE. Τα όρια αποκατάστασης για τους πρωτογενείς ρύπους είχαν επιτευχθεί ήδη κατά τα τέλη του 2008 και σχεδόν οκτώ χρόνια μετά, επετεύχθει και η συγκέντρωση-στόχος για το VC. Υπενθυμίζεται ότι η συγκέντρωση-στόχος για το cis 1,2 DCE στο συγκεκριμένο περιστατικό είναι ίση με 70 µg/L.

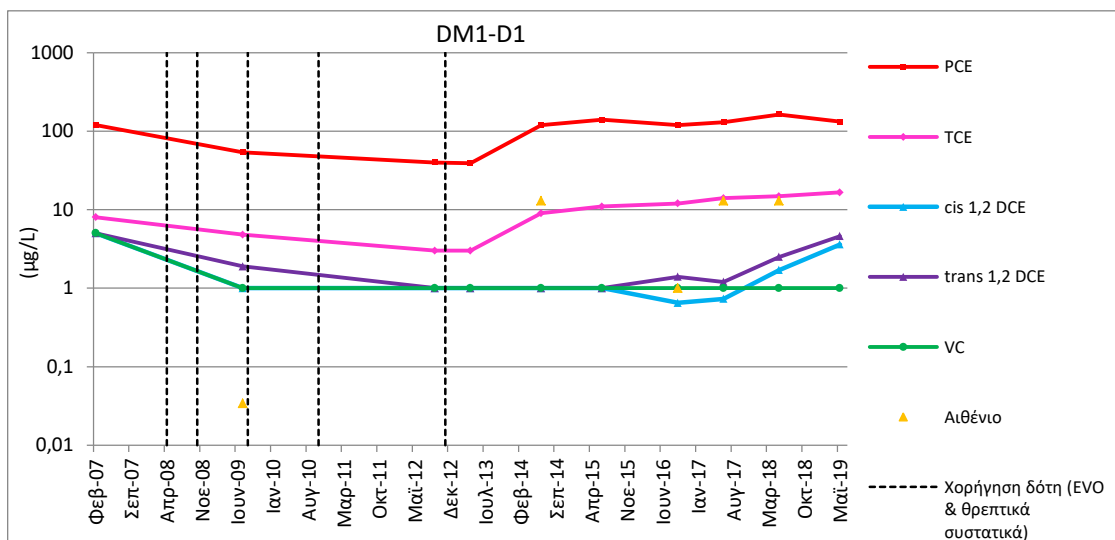


Σχήμα A.4.16 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης BC-4 της ρηχής στρώσης (300 μέτρα κατάντη της πηγής ρύπανσης) στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)

Στις βαθιές στρώσεις 1 και 2, δεν έχει σημειωθεί ιδιαίτερη πρόοδος μέχρι την πλέον πρόσφατη μέτρηση και τα περισσότερα πηγάδια παρακολούθησης κατατάσσονται στα πηγάδια με συμπεριφορά στασιμότητα. Οι συγκεντρώσεις των πρωτογενών ρύπων είτε (α) παραμένουν σταθερές, είτε (β) έχουν αυξηθεί ελαφρώς και οι συγκεντρώσεις των θυγατρικών προϊόντων παραμένουν σε μη ανιχνεύσιμα επίπεδα μέχρι το 2019. Στο Σχήμα A.4.17 δίνεται η χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM2-D2 της βαθιάς στρώσης 2 με συμπεριφορά στασιμότητα της περίπτωσης (α). Στο Σχήμα A.4.18 δίνεται η χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM1-D1 της βαθιάς στρώσης 1 με συμπεριφορά στασιμότητα της περίπτωσης (β).



Σχήμα Α.4.17 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM2-D2 της βαθιάς στρώσης 2 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)



Σχήμα Α.4.18 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM1-D1 της βαθιάς στρώσης 1 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)

Μελλοντικές ενέργειες. Σχετικά με την αποκατάσταση της ρηχής στρώσης και σύμφωνα με την Αναφορά Προόδου Πενταετίας του 2020, έχουν ήδη προγραμματιστεί επιπρόσθετες χορηγήσεις δότη στην πηγή της ρύπανσης. Επιπλέον, αναμένεται να διεξαχθεί περαιτέρω έρευνα σχετικά με τη ρύπανση του ρηχού υδροφόρου που ανακαλύφθηκε το 2012 και θεωρείται πως οφείλεται σε διαφορετική πηγή ρύπανσης. Σχετικά με τον βαθύ υδροφόρο, αναμένεται η εγκατάσταση νέων πηγαδιών ένεσης στις δύο ενδιάμεσες ζώνες. Από τις αρχές του 2020 διενεργείται πιλοτική δοκιμή χορήγησης δότη χαμηλότερου ιξώδους στις δύο βαθύτερες ζώνες 1 και 2, με σκοπό τη βελτιωμένη κατανομή του δότη στο υπόγειο νερό των στρώσεων αυτών.

A.5 Περιστατικό ρύπανσης υπεδάφους με χλωροαιθένια: Πρώην εγκατάσταση 87, Πρώην Αεροπορική Βάση Νιούαρκ, Οχάιο, Η.Π.Α.

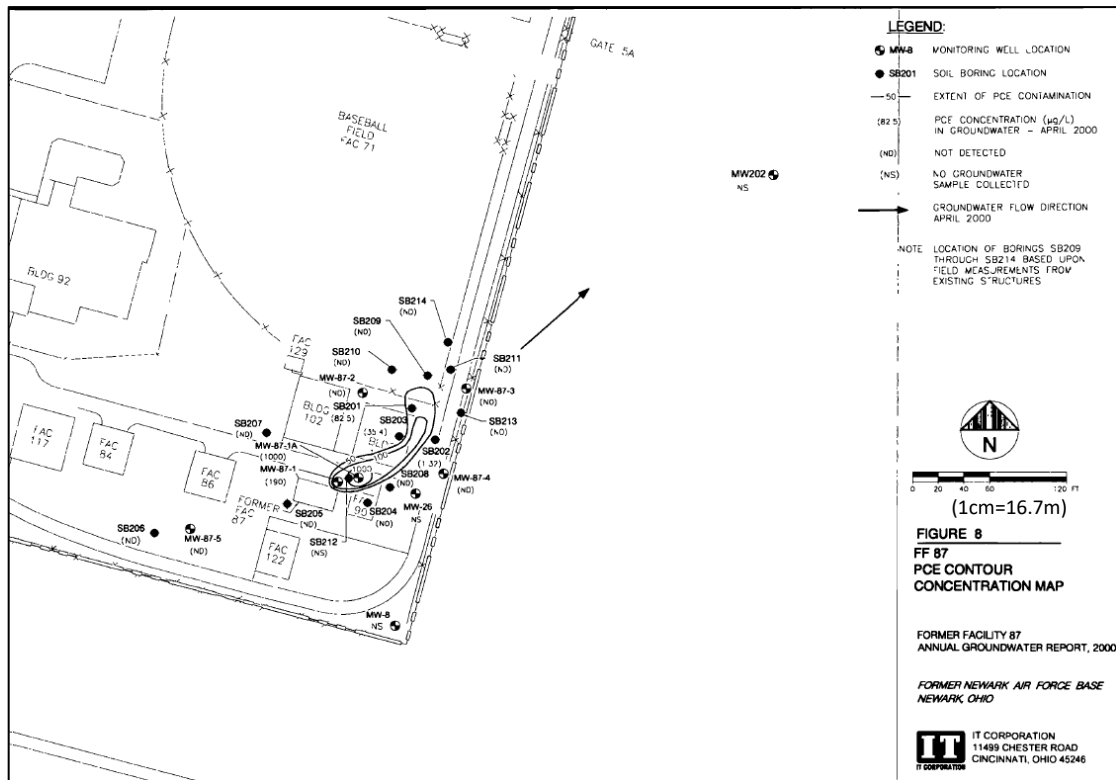
Κατηγορία χώρου. Η πρώην Αεροπορική Βάση Νιούαρκ βρίσκεται στην πολιτεία Οχάιο της Αμερικής και παρέμεινε ενεργή κατά το χρονικό διάστημα 1950-1990. Στην έννοτητα αυτή θα ασχοληθούμε με την πρώην εγκατάσταση 87 (Former Facility 87), η οποία βρισκόταν στο νοτιοανατολικό τμήμα της Πρώην Αεροπορικής Βάσης Νιούαρκ και χρησιμοποιήτο με σκοπό την αποθήκευση επικίνδυνων υλικών κατά τα έτη 1977-1996 (IT, 2001).

Ρυπογόνος δραστηριότητα. Ψυχτικά υγρά και διαλύτες, χρησιμοποιημένοι και μη, αποθηκεύονταν σε μεταλλικά βαρέλια εντός της πρώην εγκατάστασης 87. Στις αρχές του 1990 ανακαλύφθηκε η ρύπανση του υπεδάφους κοντά στην πρώην εγκατάσταση 87. Θεωρείται πως οι ρύποι διέρρευσαν στην πλάκα σκυροδέματος της εγκατάστασης και εν συνεχεία ρύπαναν το υπέδαφος (Parsons, 2007).

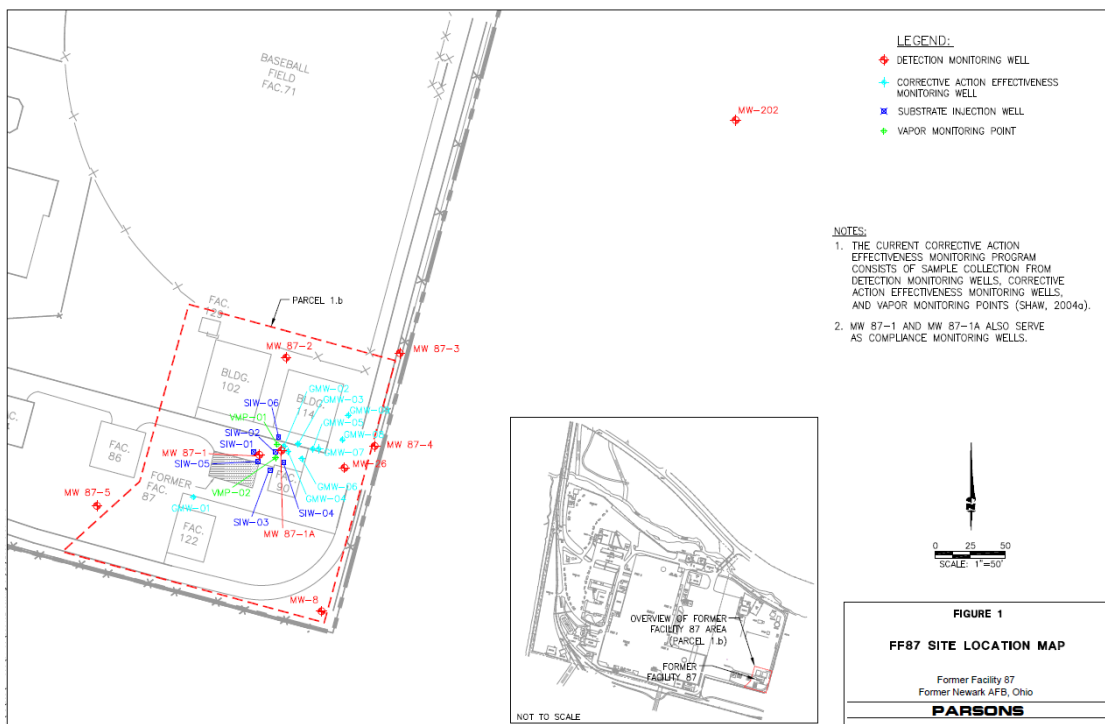
Κύριοι ρύποι. Οι ρύποι ενδιαφέροντος στην περιοχή είναι τα χλωροαιθένια και δευτερευόντως τα χλωροαιθάνια.

Υδρογεωλογικές συνθήκες. Πρώτα από την ελεύθερη επιφάνεια συναντάται στρώμα αποτελούμενο από ιλύ και άργιλο πάχους 2.4-4 μέτρων. Ακολουθεί στρώμα ιλυώδους άμμου και άμμου με προσμίξεις χαλκιού που εκτείνεται σε βάθη μέχρι και 5.5-6.7 m από την ελεύθερη επιφάνεια. Ακολουθεί ακανόνιστο στρώμα ιλύος πάχους 0,6-1,8 μέτρων και αδιαπερατο στρώμα αργίλου πάχους περίπου 22 μέτρων. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται στα πρώτα 3.5 μέτρα από την ελεύθερη επιφάνεια. Ο υδροφορέας του εδαφικού σχηματισμού έχει πάχος περίπου 4 μέτρα και κατεύθυνση ροής προς τα βορειοανατολικά. Η υδραυλική αγωγιμότητα κυμαίνεται στο εύρος $1.18 \cdot 10^{-4}$ - $2.4 \cdot 10^{-4}$ m/s (Parsons, 2007).

Έργα αποκατάστασης-Εφαρμογή πλήρους κλίμακας. Η εφαρμογή βιοδιέγερσης πλήρους κλίμακας πραγματοποιήθηκε κατά το χρονικό διάστημα 2001-2008. Κατά τις πρότερες συνθήκες (2000) η ρύπανση εκτεινόταν για περίπου 30 μέτρα στην κατεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού (Σχήμα A.5.1). Η πρώτη προσθήκη δότη στην περιοχή πραγματοποιήθηκε το 2001. Ο χορηγούμενος δότης ηλεκτρονίων ήταν μείγμα γαλακτοποιημένου φυτικού λαδιού (EVO), λεκιθίνης και υπόγειου νερού που είχε αντληθεί από παρακείμενο δειγματοληπτικό πηγάδι της περιοχής. Η χορήγησή του έγινε μέσω έξι πηγαδιών ένεσης (πηγάδια ένεσης SIW-01 έως SIW-06, Σχήμα A.5.2). Η δεύτερη προσθήκη δότη έλαβε χώρα το 2003 μέσω εισπίεσης σε τέσσερα σημεία στην τοποθεσία του δειγματοληπτικού πηγαδιού MW-87-1A (βλ. Σχήμα A.5.2).



Σχήμα Α.5.1 Ρυπασμένη περιοχή με PCE το 2000 στην Πρώην Εγκατάσταση 87 της Πρώην Βάσης Νιούαρκ (IT, 2001)

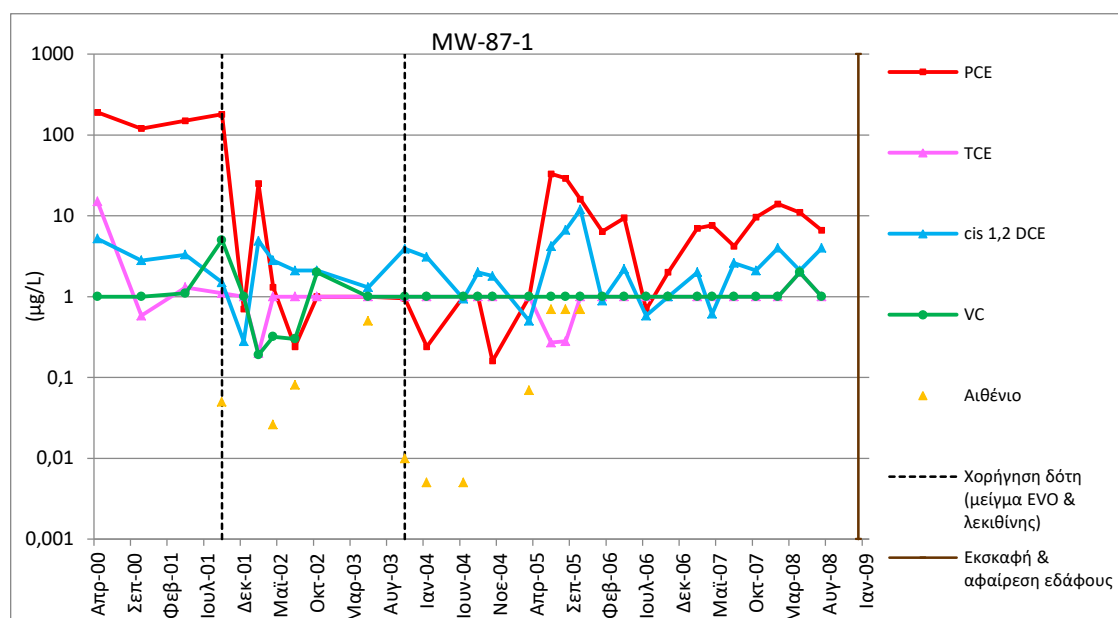


Σχήμα Α.5.2 Πηγάδια ένεσης δότη (πρώτη προσθήκη, πηγάδια ένεσης SIW-01 έως SIW-06) το 2001 στην πρώην εγκατάσταση 87 της Πρώην Βάσης Νιούαρκ (Parsons, 2007)

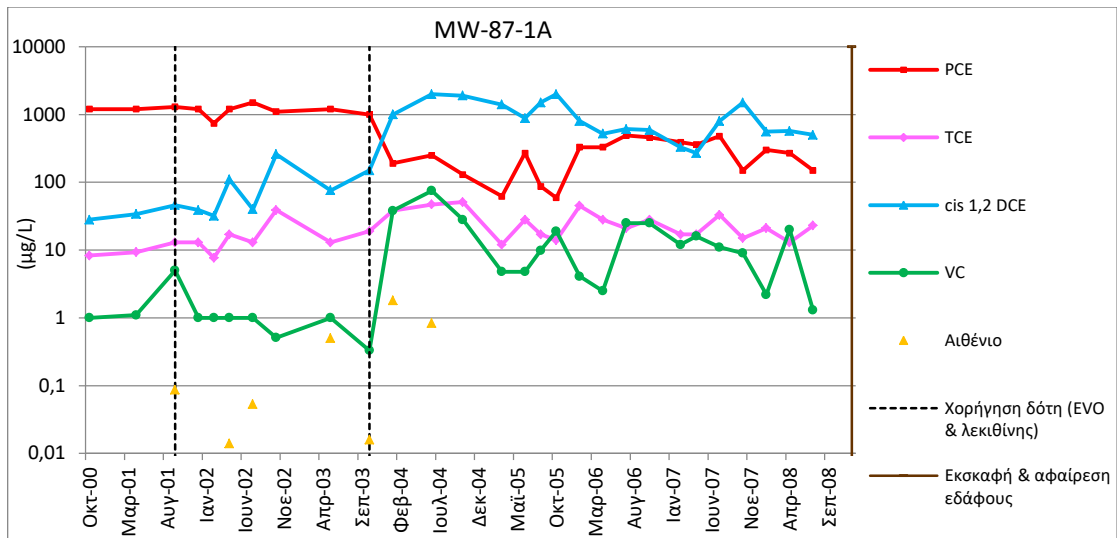
Στόχοι αποκατάστασης. Τα όρια αποκατάστασης για τα PCE και TCE ήταν τα 5 µg/L, για το cis 1,2 DCE τα 20 µg/L και για το VC τα 2 µg/L.

Χρονικό διάστημα παρακολούθησης. Η εφαρμογή πλήρους κλίμακας ολοκληρώθηκε το 2008. Έκτοτε η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης στην περιοχή ήταν η ενδογενής αποχλωρίωση μέχρι το 2015, όπου η αποκατάσταση ολοκληρώθηκε.

Μεταβολή συγκεντρώσεων-Μεταβολή ρυπασμένης έκτασης. Κατά τις αρχικές συνθήκες (Απρίλιος 2001), οι συγκεντρώσεις των χλωροαιθενίων ήταν μεγαλύτερες των ορίων αποκατάστασης σε δύο πηγάδια παρακολούθησης, τα MW-87-1 και MW-87-1A. Στα δύο αυτά πηγάδια οι μέγιστες συγκεντρώσεις το 2001 ήταν ίσες με 150 µg/L και 1,200 µg/L αντίστοιχα και αμότερες αφορούσαν στο PCE (Parsons, 2007). Έπειτα από την πρώτη χορήγηση δότη το Σεπτέμβριο 2001, στο πηγάδι παρακολούθησης MW87-1 είχε σημειωθεί μείωση της μέγιστης συγκέντρωσης κατά δύο τάξεις μεγέθους για το PCE (από τα 150 µg/L το 2001 στο 1 µg/L το 2003, βλ. Σχήμα Α.5.3), αλλά στο πηγάδι παρακολούθησης MW87-1A η μέγιστη συγκέντρωση PCE είχε παραμείνει σταθερή (Σχήμα Α.5.4). Η προσθήκη δότη μέσω εισπίεσης που πραγματοποιήθηκε το 2003 εστίασε στην τοποθεσία του πηγαδιού αυτού, αφού θεωρήθηκε ότι κατά πάσα πιθανότητα ο δότης κατά την πρώτη προσθήκη δεν την προσέγγισε (Parsons, 2007). Παρά το γεγονός ότι το 2008 σημειώθηκε μείωση της συγκέντρωσης PCE κατά μία τάξη μεγέθους (από τα 1,200 µg/L το 2003 στα 150 µg/L το 2008) στο MW87-1A, η συγκέντρωση cis 1,2 DCE αμέσως μετά από τη δεύτερη χορήγηση δότη ξεκίνησε να έχει αυξητικές τάσεις, φθάνοντας τα 500 µg/L το 2008 από τα 150 µg/L το 2003 (Parsons, 2009). Οι χρονοσειρές των μετρήσεων των πηγαδιών παρακολούθησης MW-87-1 και MW-87-1A παρουσιάζονται στα Σχήματα Α.5.3 και Α.5.4 αντίστοιχα.

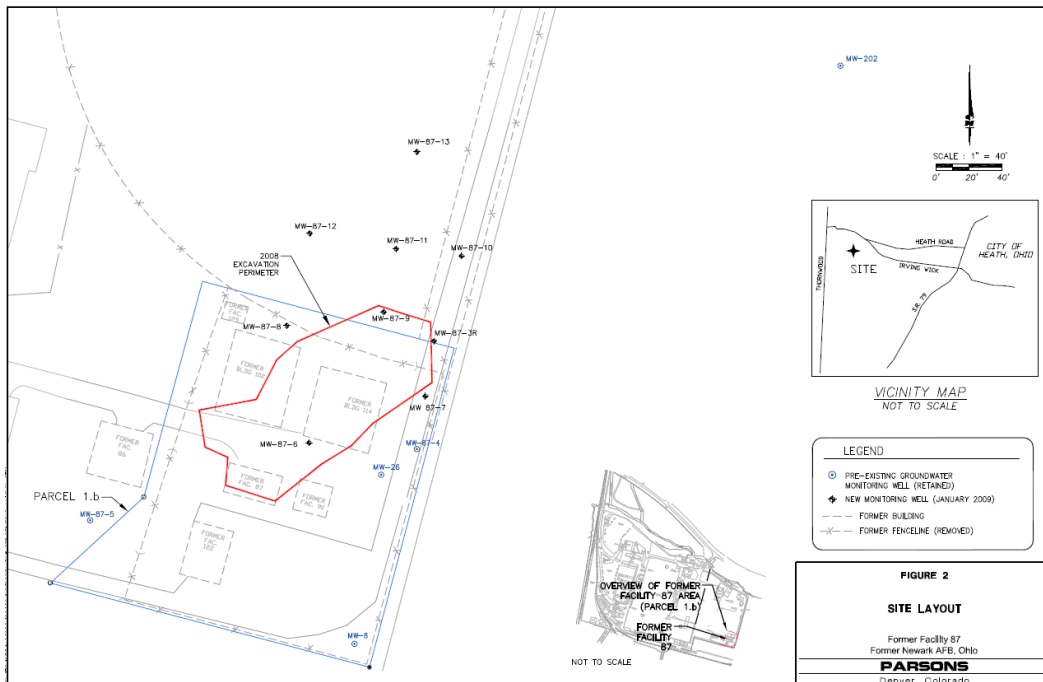


Σχήμα Α.5.3 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW87-1 στην πρώην Έγκατάσταση 87 της Πρώην Βάσης Νιούαρκ κατά την εφαρμογή βιοδιέγερσης σε πλήρη κλίμακα (Parsons, 2007; 2009)



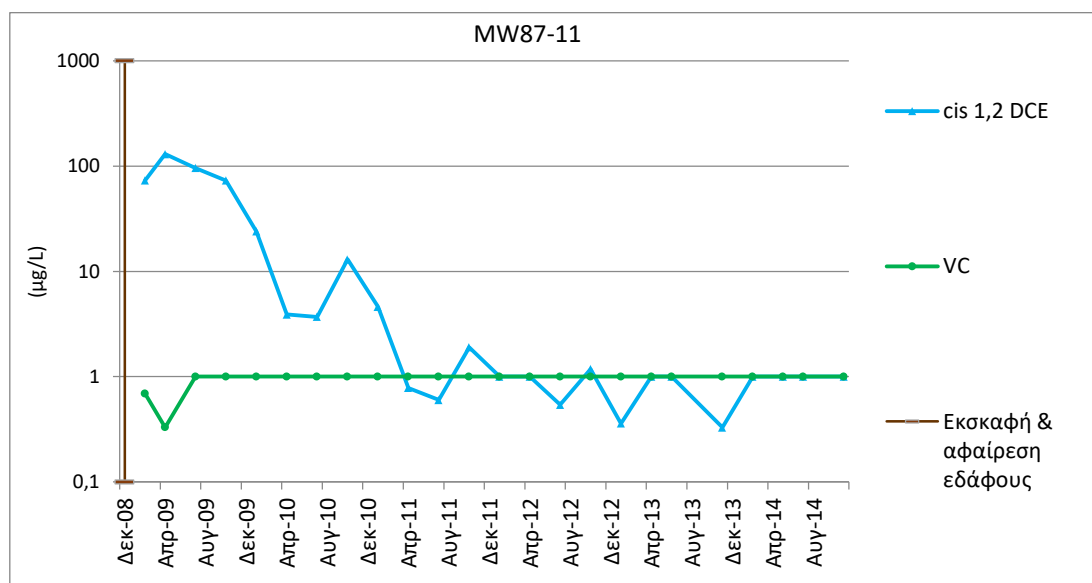
Σχήμα Α.5.4 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW87-1A στην πρώην Εγκατάσταση 87 της Πρώην Βάσης Νιούαρκ κατά την εφαρμογή βιοδιέγερσης σε πλήρη κλίμακα (Parsons, 2007; 2009)

Εφόσον υπήρχαν ενδείξεις ότι στην εγγύς περιοχή του πηγαδιού παρακολούθησης MW87-1A η διαρροή PCE δεν έχει σταματήσει και ο ρυθμός κινείται από την ακόρεστη ζώνη του εδάφους στον υδροφορέα κατά τις εποχιακές διακυμάνσεις της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, αλλά ενδεχομένως και λόγω της μικρής ρυπασμένης έκτασης στην περιοχή, το 2008 πραγματοποιήθηκε εκσκαφή και αφαίρεση του άμεσα υποκείμενου εδάφους της εγκατάστασης βάθους περίπου 5 μέτρων. Η περίμετρος της εκσκαφής που ολοκληρώθηκε κατά τα τέλη του 2008 στην περιοχή φαίνεται στο Σχήμα Α.5.5.

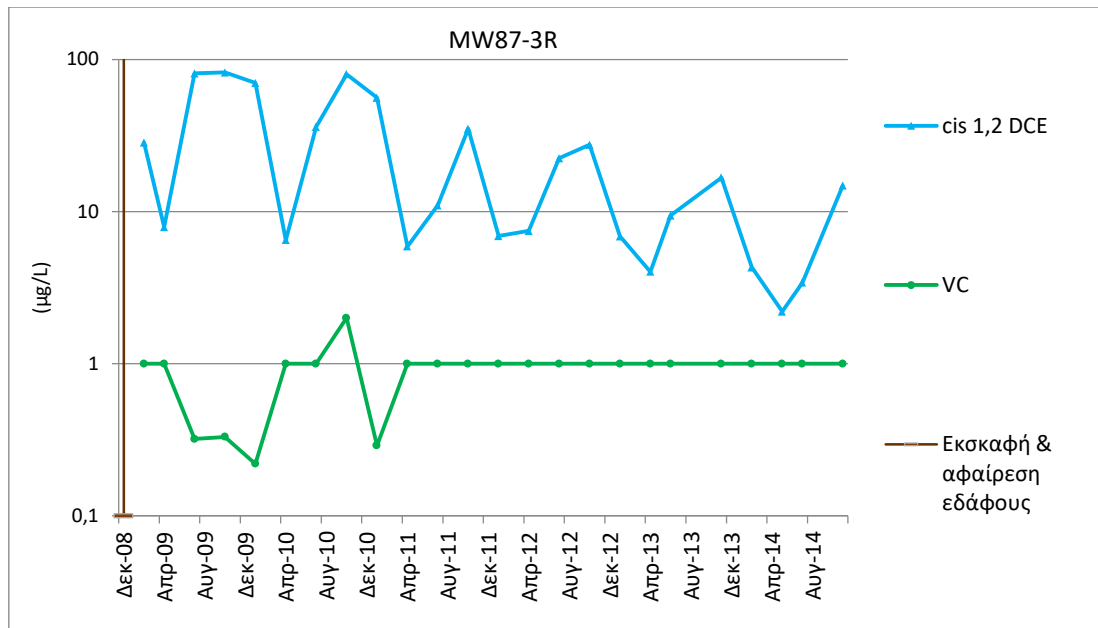


Σχήμα Α.5.5 Περίμετρος εκσκαφής (οριοθετημένη με κόκκινο χρώμα) στην πρώην εγκατάσταση 87 της πρώην Βάσης Νιούαρκ (η εκσκαφή και αφαίρεση εδάφους ολοκληρώθηκε κατά τα τέλη του 2008) (Parsons, 2010)

Έκτοτε, η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης στην περιοχή ήταν η ενδογενής αποχλωρίωση. Η εκσκαφή προφανώς και επιτάχυνε κατά πολύ το ρυθμό της αποκατάστασης του υπόγειου νερού. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις στο υπόγειο νερό μετά από την εκσκαφή αφορούσαν στο cis 1,2 DCE και ήταν της τάξεως των 70 µg/L, ενώ οι συγκεντρώσεις των πρωτογενών χλωροαιθινίων ήταν μικρότερες του 1 µg/L σε όλα τα νέα δειγματοληπτικά πηγάδια της περιοχής και παρέμειναν σε αυτές τις τιμές μέχρι και την ολοκλήρωση της αποκατάστασης. Το 2012 το όριο αποκατάστασης για το cis 1,2 DCE τροποποιήθηκε και προσαρμόστηκε στα 70 µg/L (πριν το 2012 το όριο αποκατάστασης ήταν ίσο με 20 µg/L) (FPM, 2012). Το 2015 η αποκατάσταση του χώρου ολοκληρώθηκε. Στα Σχήματα A.5.6 και A.5.7 δίνονται οι χρονοσειρές μετρήσεων των πηγαδιών παρακολούθησης στα όποια μετά από την εκσκαφή καταγράφηκαν οι μέγιστες συγκεντρώσεις cis 1,2 DCE στο υπόγειο νερό της περιοχής. Σε όλα τα υπόλοιπα πηγάδια παρακολούθησης οι συγκντρώσεις cis 1,2 DCE και VC ήταν μικρότερες των αρχικών ορίων αποκατάστασης αμέσως μετά από την εκσκαφή του 2008. Οι τοποθεσίες των πηγαδιών παρακολούθησης MW87-11 και MW87-3R φαίνονται στο Σχήμα A.5.5.



Σχήμα A.5.6 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW87-11 στην Πρώην Εγκατάσταση 87 της πρώην Βάσης Νιούαρκ μετά από την εκσκαφή και αφαίρεση εδάφους (εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης στην περιοχή η ενδογενής αποχλωρίωση) (FPM, 2015)

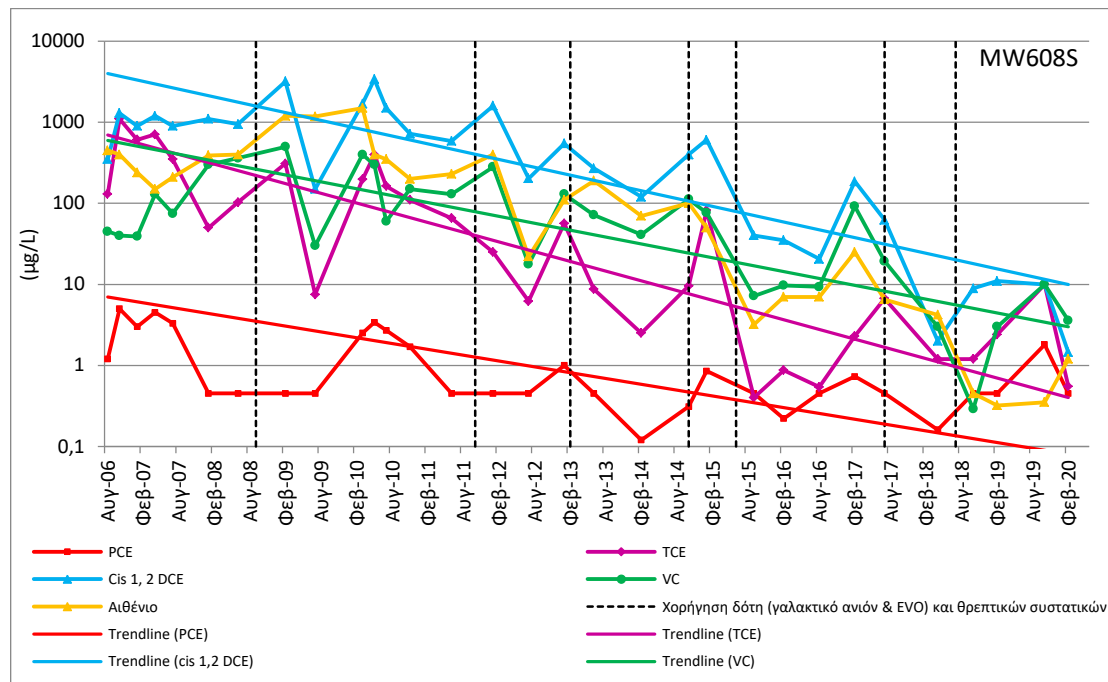


Σχήμα Α.5.7 Χρονοσειρά μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW87-3R στην Πρώην Εγκατάσταση 87 της πρώην Βάσης Νιούαρκ μετά από την εκσκαφή και αφαίρεση εδάφους (εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης στην περιοχή η ενδογενής αποχλωρίωση) (FPM, 2015)

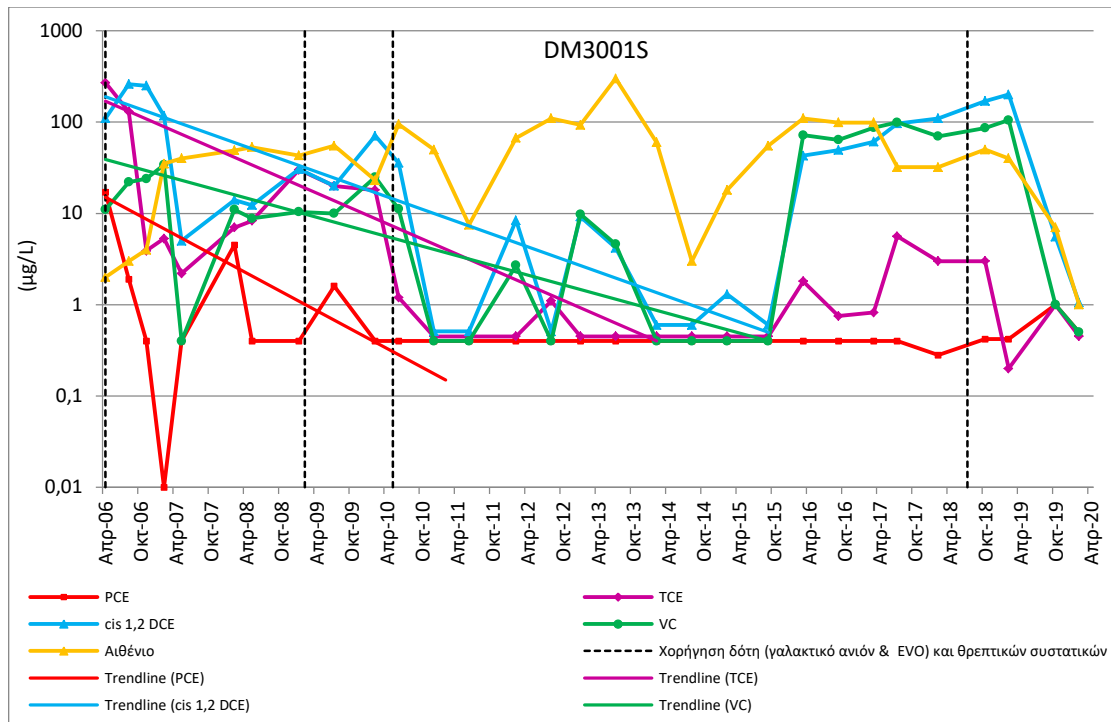
Παράρτημα Β: Υπολογισμός χρόνων ημιζωής - Γραμμικές προσεγγίσεις

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται οι γραμμικές προσεγγίσεις των χρονοσειρών των οποίων οι μετρήσεις στο πεδίο αξιοποιήθηκαν με σκοπό τον υπολογισμό των χρόνων ημιζωής των χλωριωμένων αιθυλενίων. Για καθένα από τους πέντε συνολικά ρυπασμένους χώρους, οι υπολογισθείσες τιμές των χρόνων ημιζωής παρουσιάζονται υπό τη μορφή πίνακα για κάθε πηγάδι παρακολούθησης ξεχωριστά.

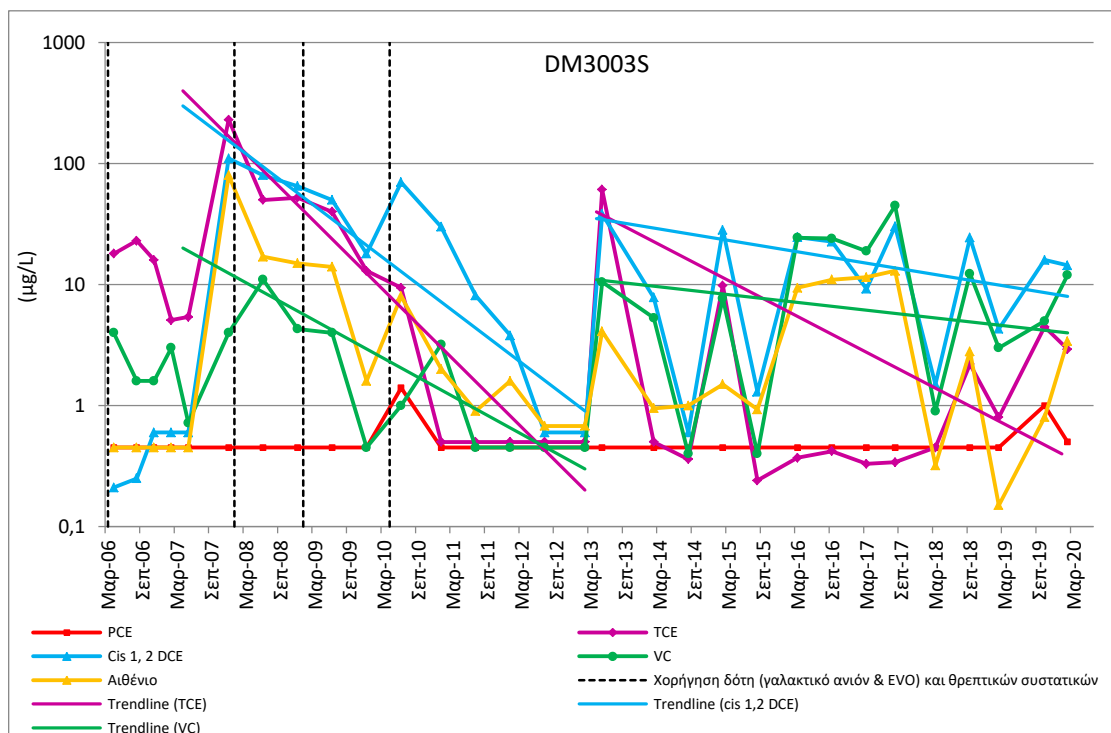
Για τον υπολογισμό των χρόνων ημιζωής στην Περιοχή 6 της Αεροπορικής Βάσης Ντόβερ αξιοποιήθηκαν οι μετρήσεις συνολικά οκτώ πηγαδιών παρακολούθησης, από τα οποία τα τέσσερα είναι πηγάδια της ρηχής στρώσης και τα υπόλοιπα τέσσερα της βαθιάς. Στα Σχήματα Β.1 έως Β.8 παρουσιάζονται οι γραμμικές προσεγγίσεις των χρονοσειρών.



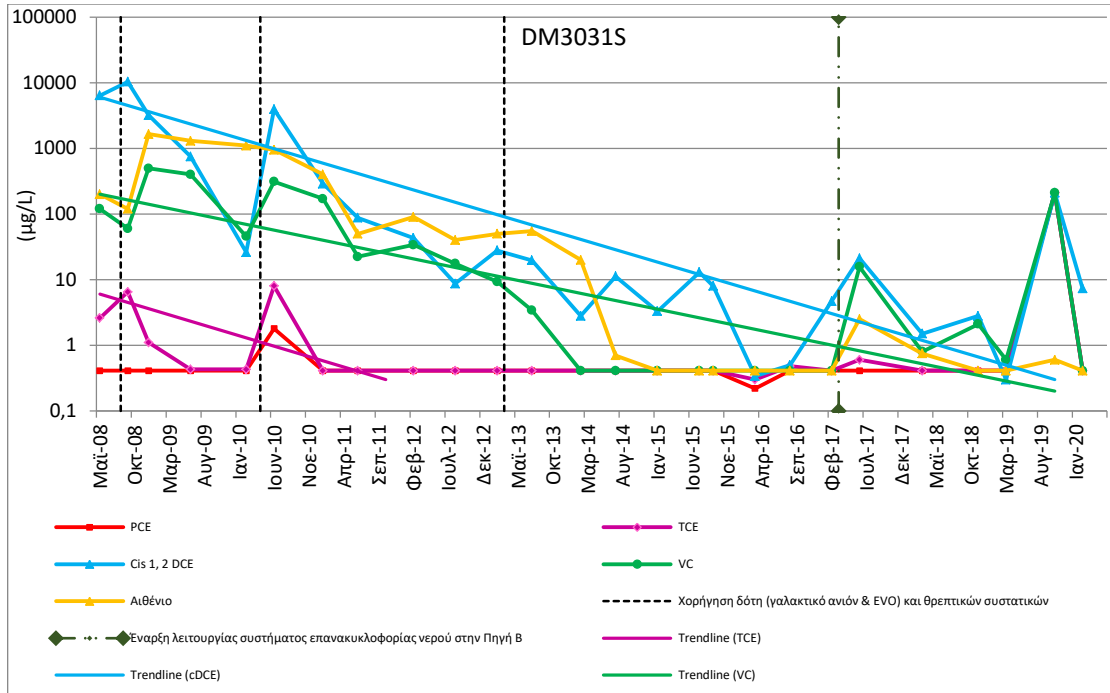
Σχήμα Β.1 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW608S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007b; 2007c; 2008c; 2008d; 2008e; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2017; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM, 2016c; 2018a; 2020c; 2020d)



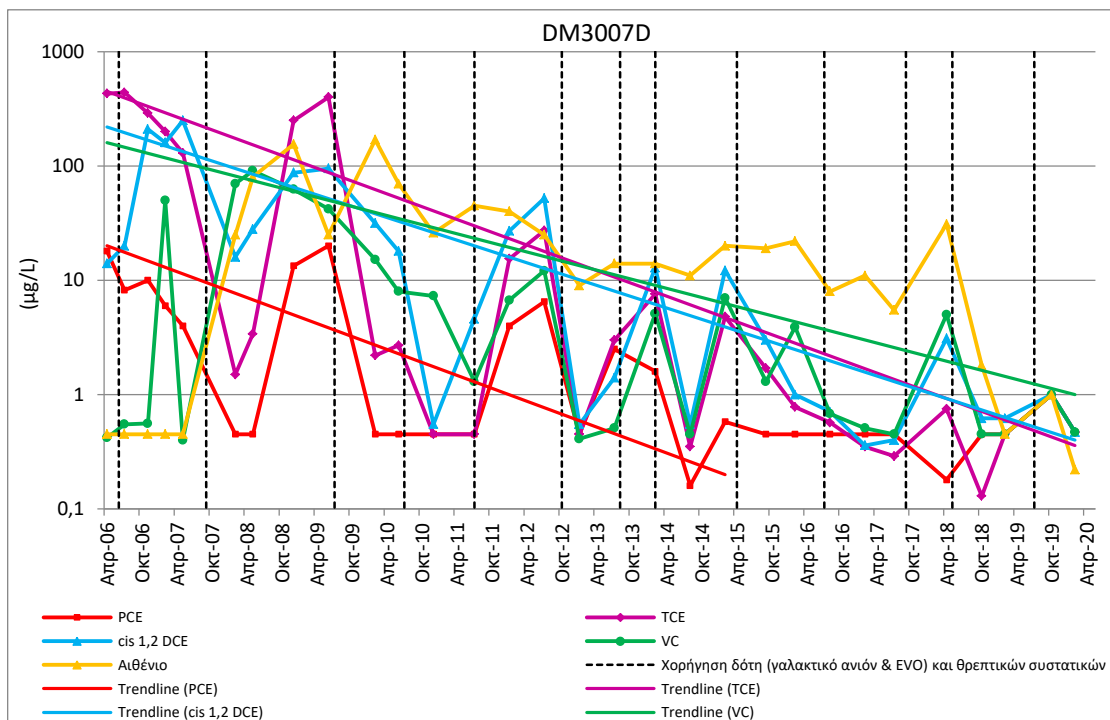
Σχήμα Β.2 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3001S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007b; 2007c; 2008c; 2008d; 2008e; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2017; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM, 2016c; 2018a; 2020c; 2020d)



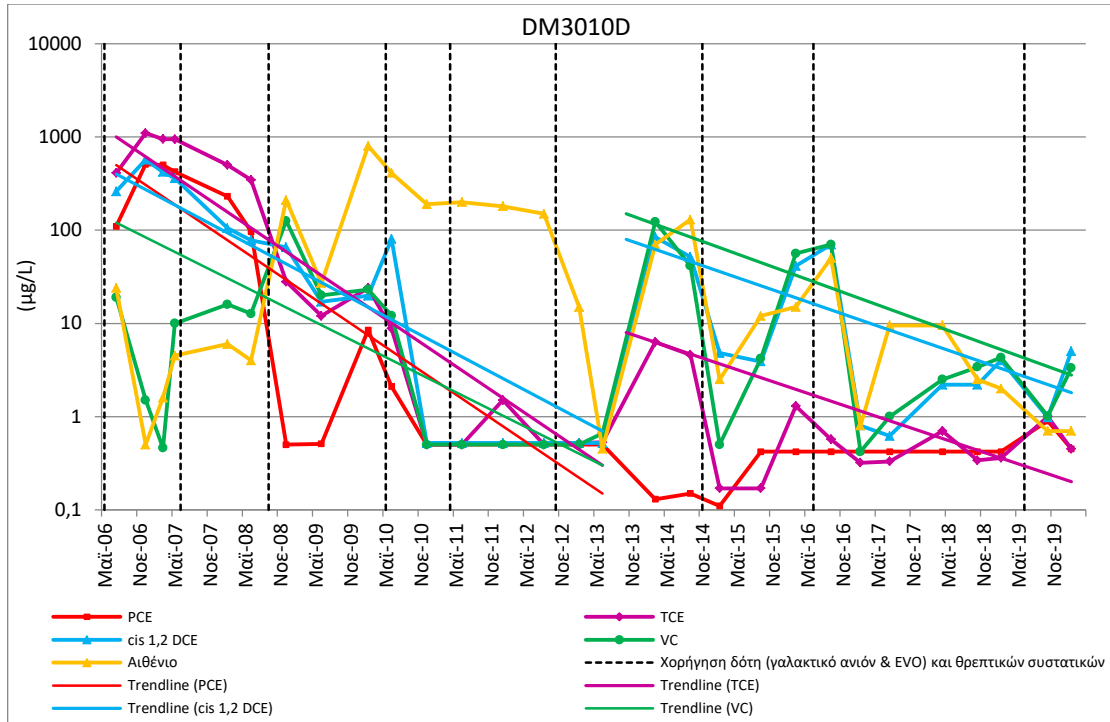
Σχήμα Β.3 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3003S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007b; 2007c; 2008c; 2008d; 2008e; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2017; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM, 2016c; 2018a; 2020c; 2020d)



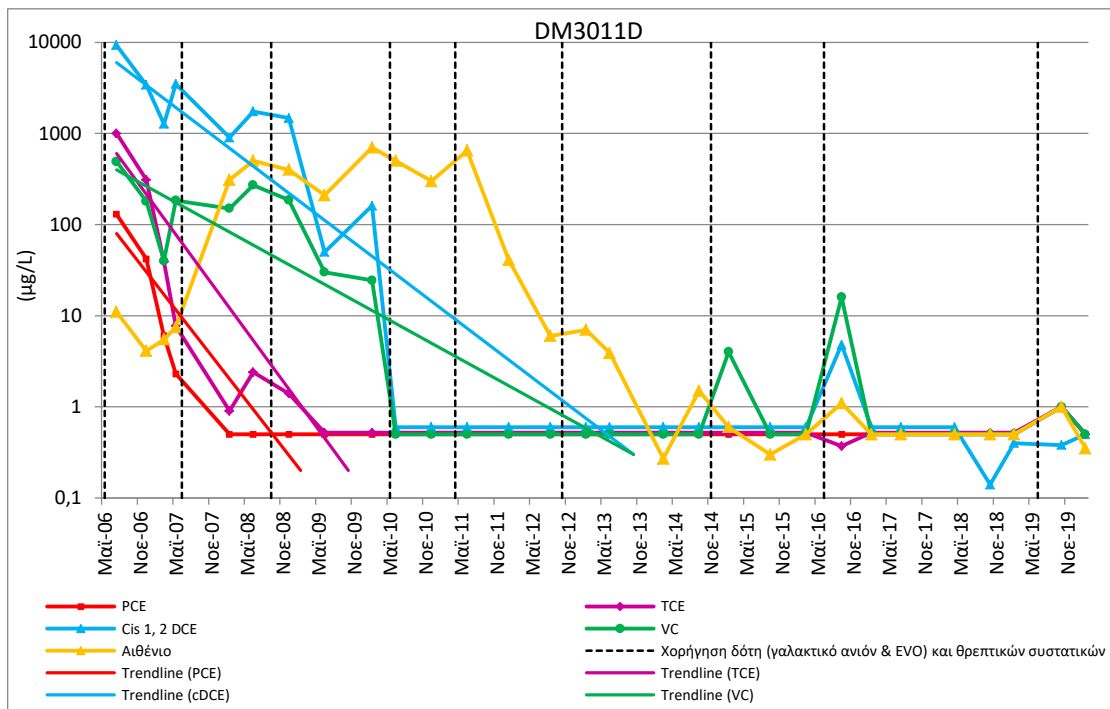
Σχήμα Β.4 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3031S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007b; 2007c; 2008c; 2008d; 2008e; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2017; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM, 2016c; 2018a; 2020c; 2020d)



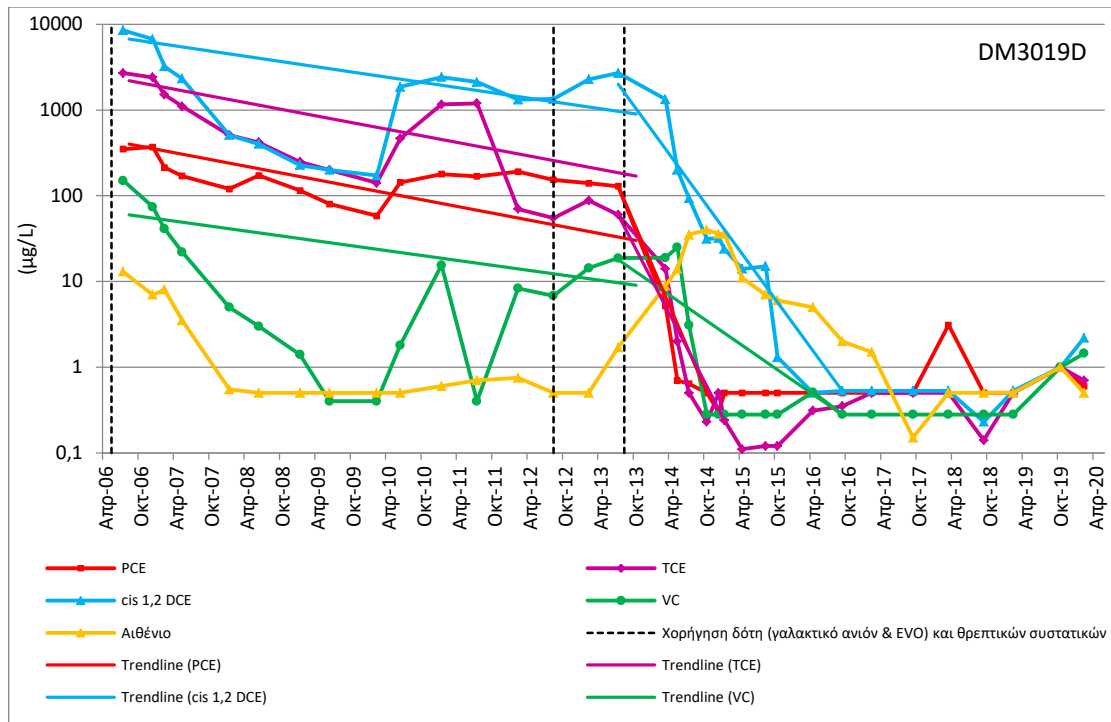
Σχήμα Β.5 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3007D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007b; 2007c; 2008c; 2008d; 2008e; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2017; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM, 2016c; 2018a; 2020c; 2020d)



Σχήμα Β.6 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3010D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007b; 2007c; 2008c; 2008d; 2008e; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2017; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM, 2016c; 2018a; 2020c; 2020d)



Σχήμα Β.7 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3011D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007b; 2007c; 2008c; 2008d; 2008e; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2017; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM, 2016c; 2018a; 2020c; 2020d)



Σχήμα Β.8 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM30019D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007b; 2007c; 2008c; 2008d; 2008e; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2017; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM, 2016c; 2018a; 2020c; 2020d)

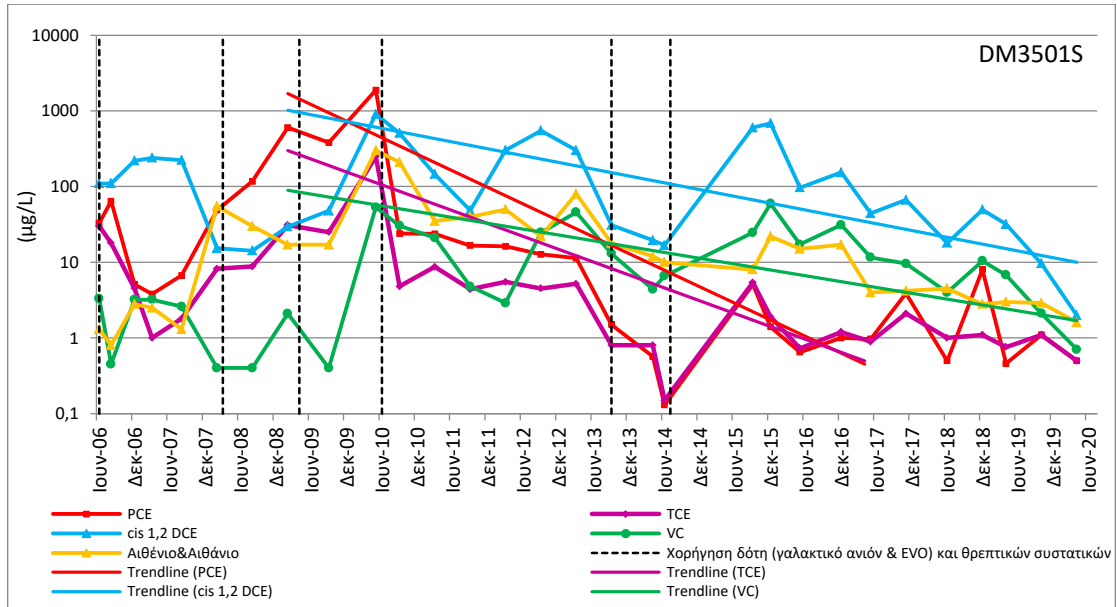
Ακολουθώς, στον Πίνακα Β.1 παρατίθενται οι τιμές των χρόνων ημιζωής που υπολογίστηκαν μέσω των παραπάνω οκτώ χρονοσειρών.

Πίνακας Β.1 Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής ανά πηγάδι παρακολούθησης στην Περιοχή 6 της Αεροπορικής Βάσης Ντόβερ

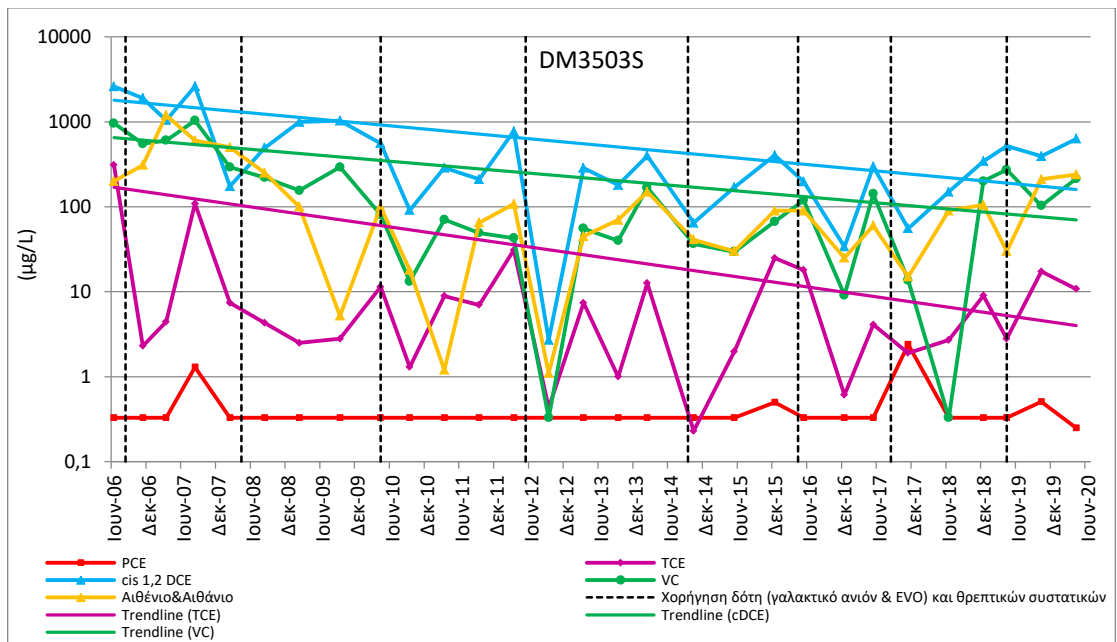
Ρυλασμένος χώρος	Στρώση υδροφορέα	Πηγάδι παρακολούθησης	Πλήθος χορηγήσεων δότη	Πλήθος δειγματοληψιών	Τάση συμπεριφοράς	Χρόνοι ημιζωής - $T_{1/2}$ (έτη)			
						PCE	TCE	cDCE	VC
Περιοχή 6, Αεροπορική Βάση Ντόβερ Ντέλαγουερ, Η.Π.Α.	Ρηχή	MW608S	7	31	Πρόοδος	1.24	1.28	1.59	1.8
		DM3001S	4	30	Υποτροπή	0.73	0.9	1.11	1.44
		DM3003S	4	30	Υποτροπή	MA ¹	0.79	1.99	2.46
		DM3031S	4	26	Υποτροπή	MA ¹	0.8	0.82	1.17
	Βαθεία	DM3007D	13	30	Πρόοδος	1.35	1.37	1.54	1.92
		DM3010D	9	29	Υποτροπή	0.6	0.91	0.97	0.97
		DM3011D	9	29	Πρόοδος	0.3	0.3	0.52	0.71
		DM3019D	3	34	Υστέρηση	1.06	1.08	1.39	1.6

Σημειώσεις:
¹ μη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση

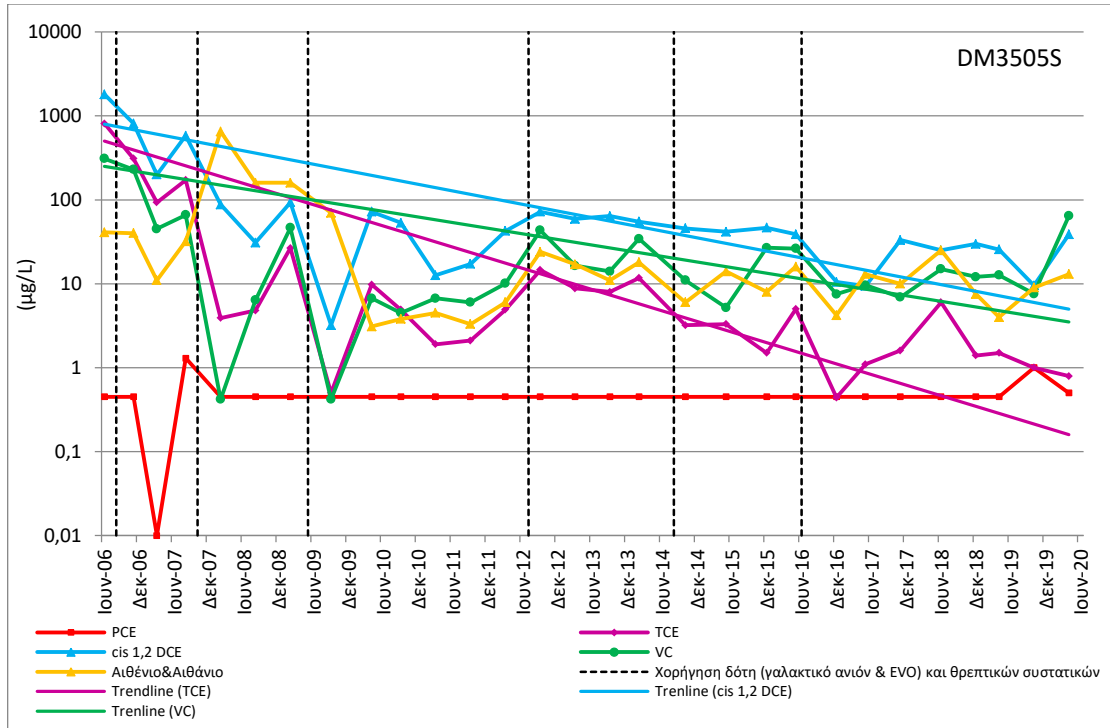
Στην Περιοχή 5 της Αεροπορικής Βάσης Ντόβερ, για τον υπολογισμό των χρόνων ημιζωής αξιοποιήθηκαν οι μετρήσεις συνολικά επτά πηγαδιών παρακολούθησης, από τα οποία τα τέσσερα είναι πηγάδια της ρηχής στρώσης και τα υπόλοιπα τρία της βαθιάς. Στα Σχήματα Β.9 έως Β.15 παρουσιάζονται οι γραμμικές προσεγγίσεις των χρονοσειρών.



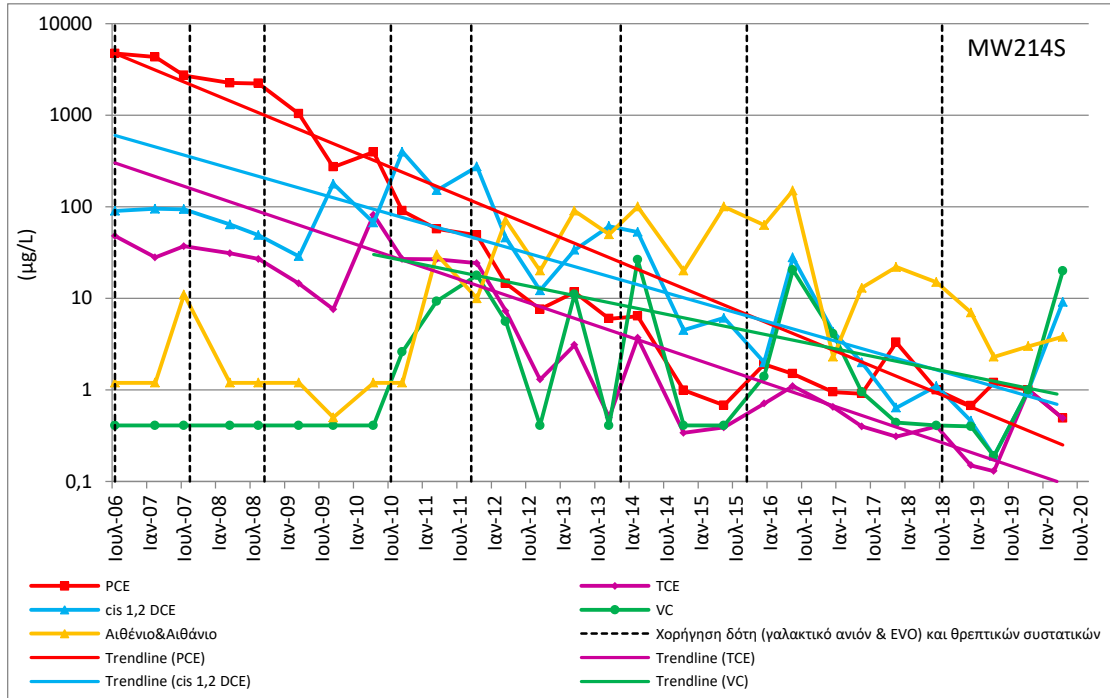
Σχήμα Β.9 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3501S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007a; 2008a; 2008b; 2008e; 2009a; 2009c; 2011a; 2011b; 2012b; 2012c; 2013a; 2013e; 2014a; 2014b; 2015a; 2018b; AECOM, 2016a; 2016b; 2017a; 2017b; 2018b; 2019a; 2019b; 2020a; 2020b)



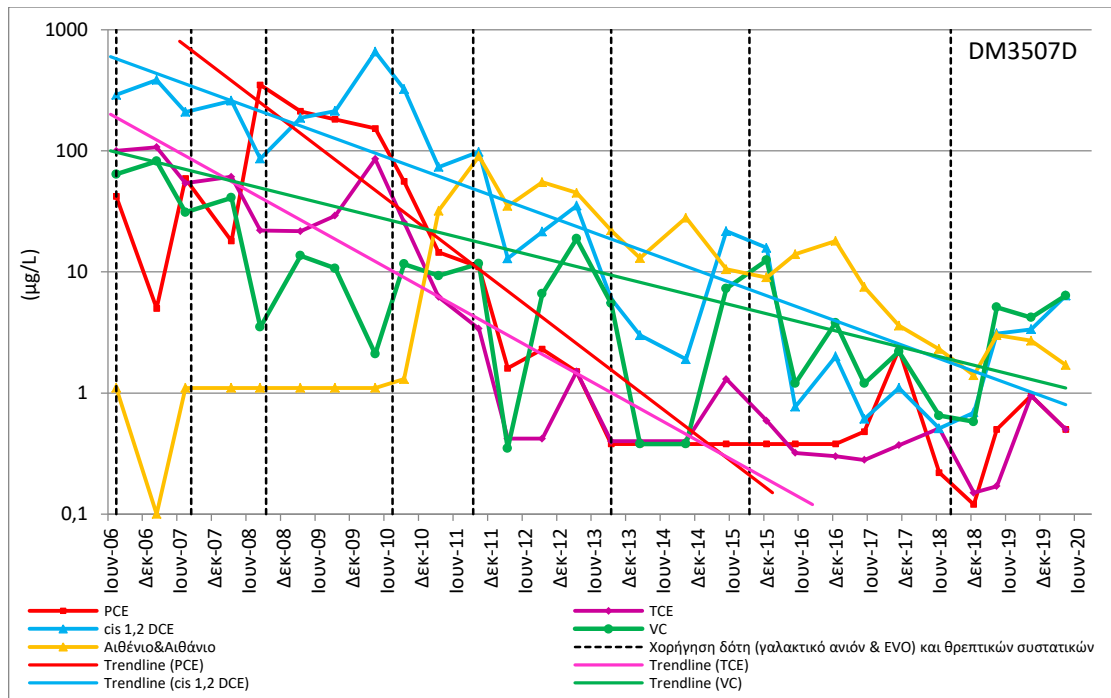
Σχήμα Β.10 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3503S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007a; 2008a; 2008b; 2008e; 2009a; 2009c; 2011a; 2011b; 2012b; 2012c; 2013a; 2013e; 2014a; 2014b; 2015a; 2018b; AECOM, 2016a; 2016b; 2017a; 2017b; 2018b; 2019a; 2019b; 2020a; 2020b)



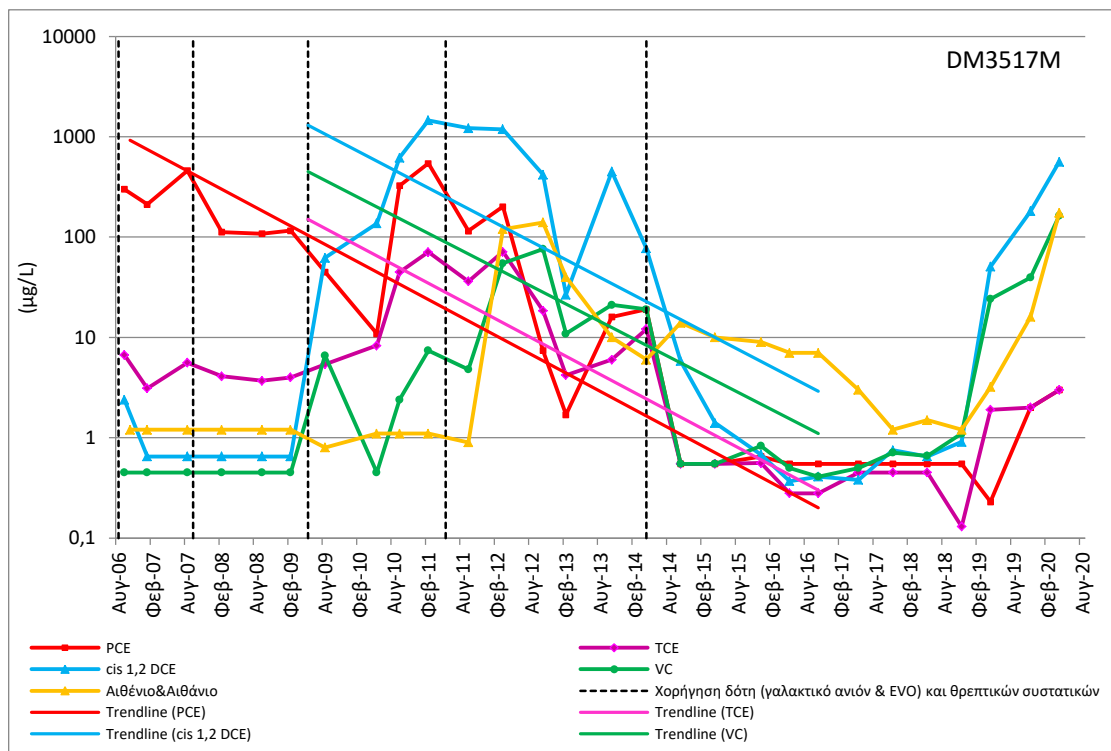
Σχήμα Β.11 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3505S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007a; 2008a; 2008b; 2008e; 2009a; 2009c; 2011a; 2011b; 2012b; 2012c; 2013a; 2013e; 2014a; 2014b; 2015a; 2018b; AECOM, 2016a; 2016b; 2017a; 2017b; 2018b; 2019a; 2019b; 2020a; 2020b)



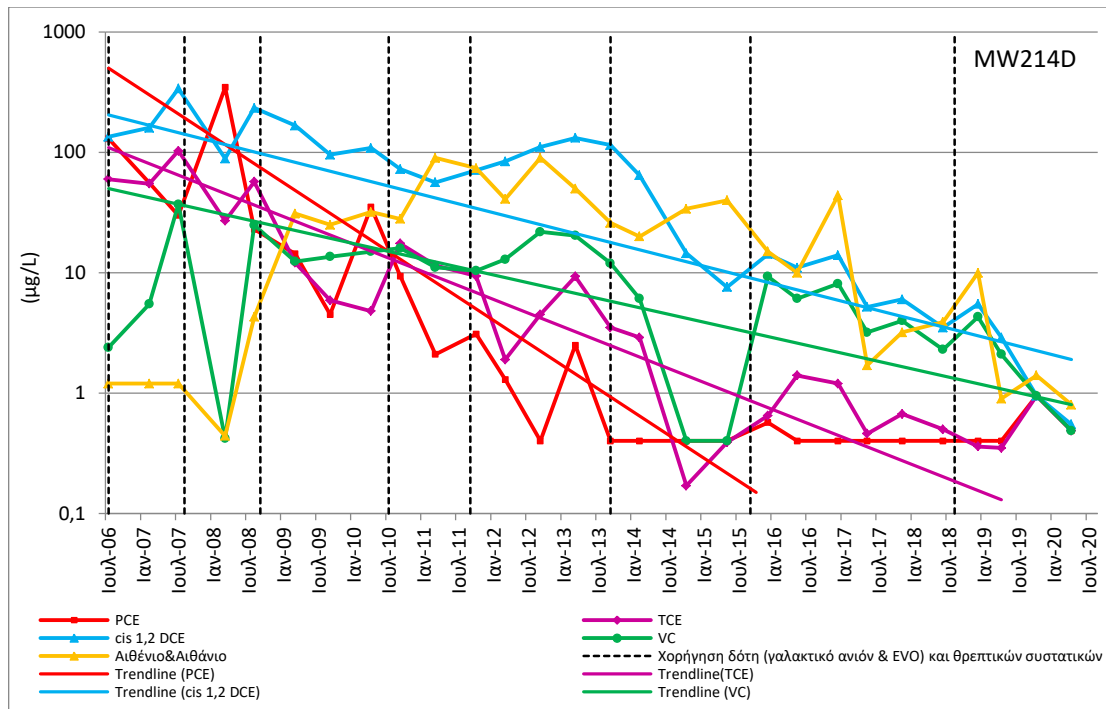
Σχήμα Β.12 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW214S της ρηχής στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007a; 2008a; 2008b; 2008e; 2009a; 2009c; 2011a; 2011b; 2012b; 2012c; 2013a; 2013e; 2014a; 2014b; 2015a; 2018b; AECOM, 2016a; 2016b; 2017a; 2017b; 2018b; 2019a; 2019b; 2020a; 2020b)



Σχήμα Β.13 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3507D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007a; 2008a; 2008b; 2008e; 2009a; 2009c; 2011a; 2011b; 2012b; 2012c; 2013a; 2013e; 2014a; 2014b; 2015a; 2018b; AECOM, 2016a; 2016b; 2017a; 2017b; 2018b; 2019a; 2019b; 2020a; 2020b)



Σχήμα Β.14 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM3507D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007a; 2008a; 2008b; 2008e; 2009a; 2009c; 2011a; 2011b; 2012b; 2012c; 2013a; 2013e; 2014a; 2014b; 2015a; 2018b; AECOM, 2016a; 2016b; 2017a; 2017b; 2018b; 2019a; 2019b; 2020a; 2020b)



Σχήμα Β.15 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW214D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007a; 2008a; 2008b; 2008e; 2009a; 2009c; 2011a; 2011b; 2012b; 2012c; 2013a; 2013e; 2014a; 2014b; 2015a; 2018b; AECOM, 2016a; 2016b; 2017a; 2017b; 2018b; 2019a; 2019b; 2020a; 2020b)

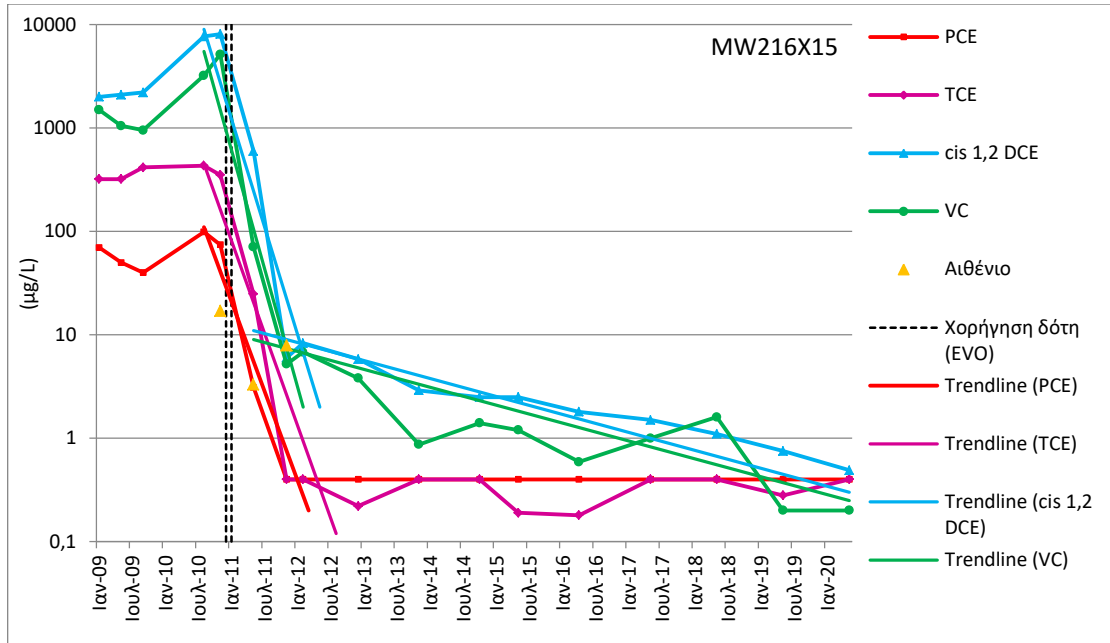
Στον Πίνακα Β.2 παρατίθενται οι τιμές των χρόνων ημιζωής που υπολογίστηκαν μέσω των παραπάνω χρονοσειρών για την Περιοχή 5 της Βάσης Ντόβερ.

Πίνακας Β.2 Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής ανά πηγάδι παρακολούθησης στην Περιοχή 5 της Αεροπορικής Βάσης Ντόβερ

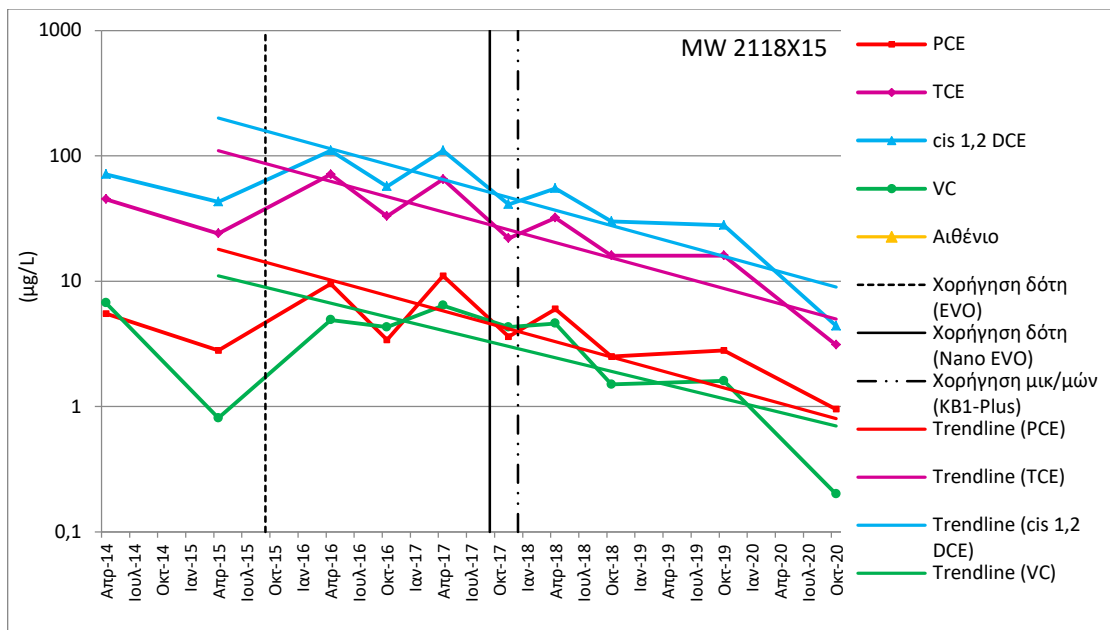
Ρυπασμένοι χώρος	Στρώση υδροφορέα	Πηγάδι παρακολούθησης	Πλήθος χορηγήσεων δότη	Πλήθος δειγματοληψιών	Τάση συμπεριφοράς	Χρόνοι ημιζωής - $T_{1/2}$ (έτη)			
						PCE	TCE	cDCE	VC
Περιοχή 5, Αεροπορική Βάση Ντόβερ, Ντέλαγουερ, Η.Π.Α	Ρηχή	DM3501S	6	30	Πρόοδος	0.69	0.89	1.69	1.98
		DM3503S	8	29	Στασιμότητα	MA ¹	2.59	4.01	4.38
		DM3505S	8	29	Πρόοδος	MA ¹	1.21	1.92	2.28
		MW214S	8	28	Πρόοδος	0.98	1.2	1.42	1.99
	Βαθεία	DM3507D	8	28	Πρόοδος	0.7	0.96	1.47	2.16
		DM3517M	5	28	Υποτροπή	0.84	0.84	0.85	0.87
		MW214D	8	28	Πρόοδος	0.81	1.33	2.06	2.33

Σημειώσεις:
¹ μη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση

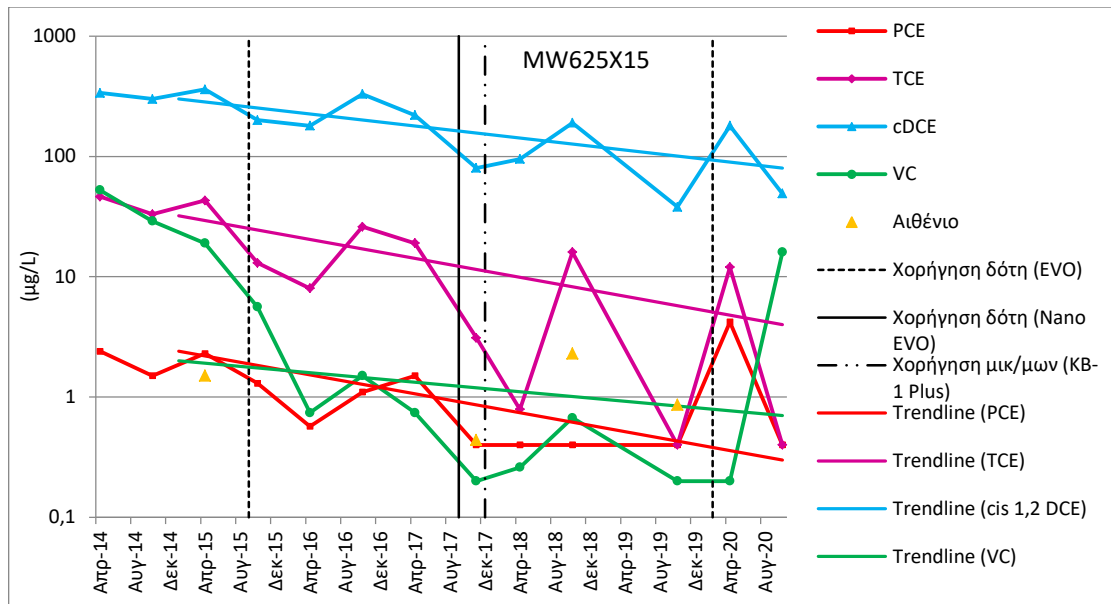
Για τον υπολογισμό των χρόνων ημιζωής στην Περιοχή SS015 της Αεροπορικής Βάσης Τράβις αξιοποιήθηκαν οι μετρήσεις συνολικά τριών πηγαδιών παρακολούθησης. Στα Σχήματα Β.16 έως Β.18 παρουσιάζονται οι γραμμικές προσεγγίσεις των χρονοσειρών.



Σχήμα Β.16 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW216X15 της Περιοχής SS015 της Βάσης Τραβις (CH2MHILL, 2011a; 2012a, 2012b; 2013; 2014; 2016a; 2016b; 2017b; 2019a; 2019b; 2020; 2021)



Σχήμα Β.17 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW2118X15 της Περιοχής SS015 της Βάσης Τραβις (CH2MHILL, 2016a; 2016b; 2017b; 2019a; 2019b; 2020; 2021)



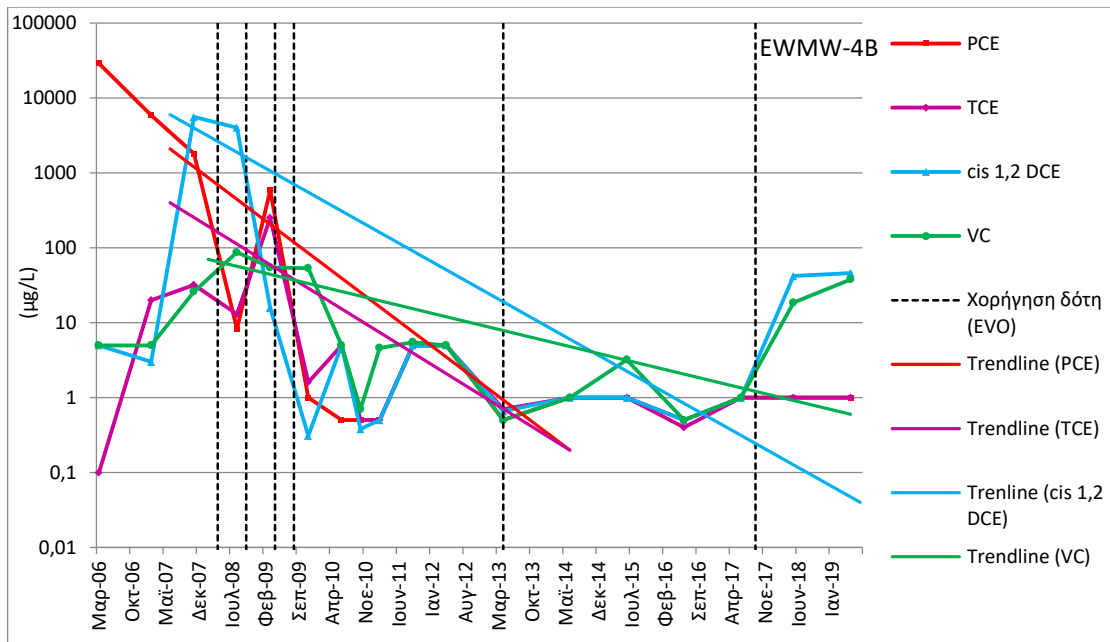
Σχήμα Β.18 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW625X15 της Περιοχής SS015 της Βάσης Τραβίς (CH2MHILL, 2016a; 2016b; 2017b; 2019a; 2019b; 2020; 2021)

Στον Πίνακα Β.3 παρατίθενται οι τιμές των χρόνων ημιζωής που υπολογίστηκαν μέσω των παραπάνω χρονοσειρών για την Περιοχή SS015 της Βάσης Τράβις.

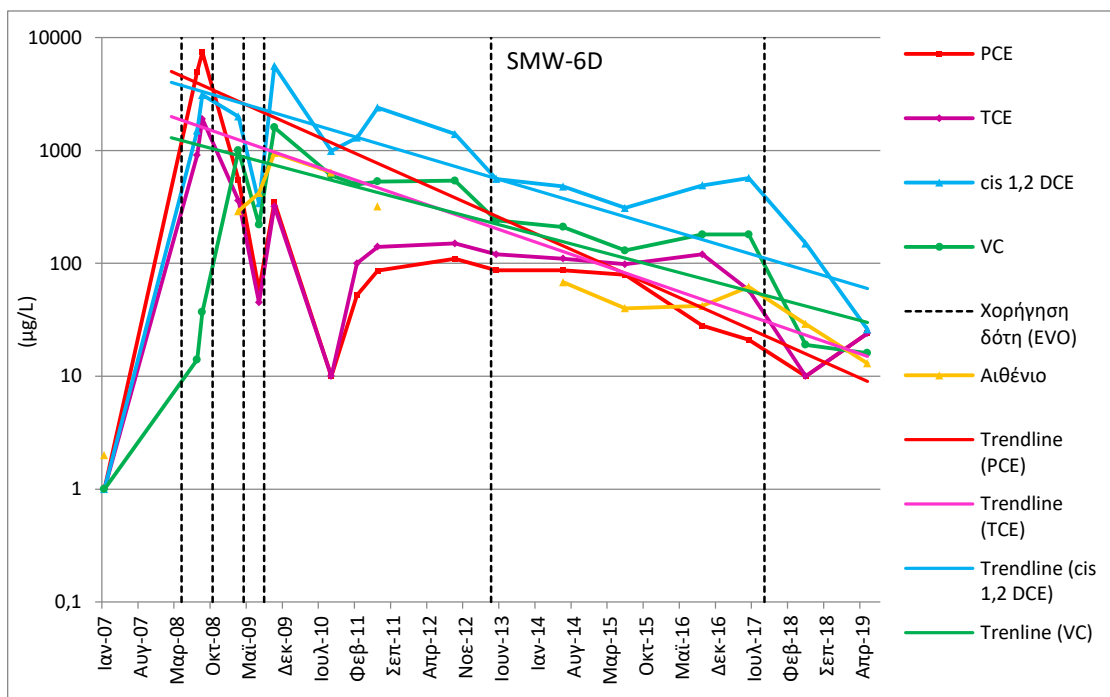
Πίνακας Β.3 Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής ανά πηγάδι παρακολούθησης στην Περιοχή SS015 της Αεροπορικής Βάσης Τράβις

Ρυπασμένος χώρος	Πηγάδι παρακολούθησης	Πλήθος χορηγήσεων δότη ή/και δειγματοληγιών μικ/μωv	Πλήθος δειγματοληγιών	Τάση συμπεριφοράς	Χρόνοι ημιζωής - $T_{1/2}$ (έτη)			
					PCE	TCE	cDCE	VC
Περιοχή SS015, Αεροπορική Βάση Τράβις, Καλιφόρνια, Η.Π.Α.	MW 216X15	2	17	Πρόοδος	0.17 (2.04 μήνες)	0.17 (2.04 μήνες)	0.95 (11.4 μήνες)	0.95 (11.4 μήνες)
	MW 2118X15	3	10	Πρόοδος	1.21	1.26	1.26	1.42
	MW 625X15	4	12	Στασιμότητα	1.96	1.96	3.09	3.88

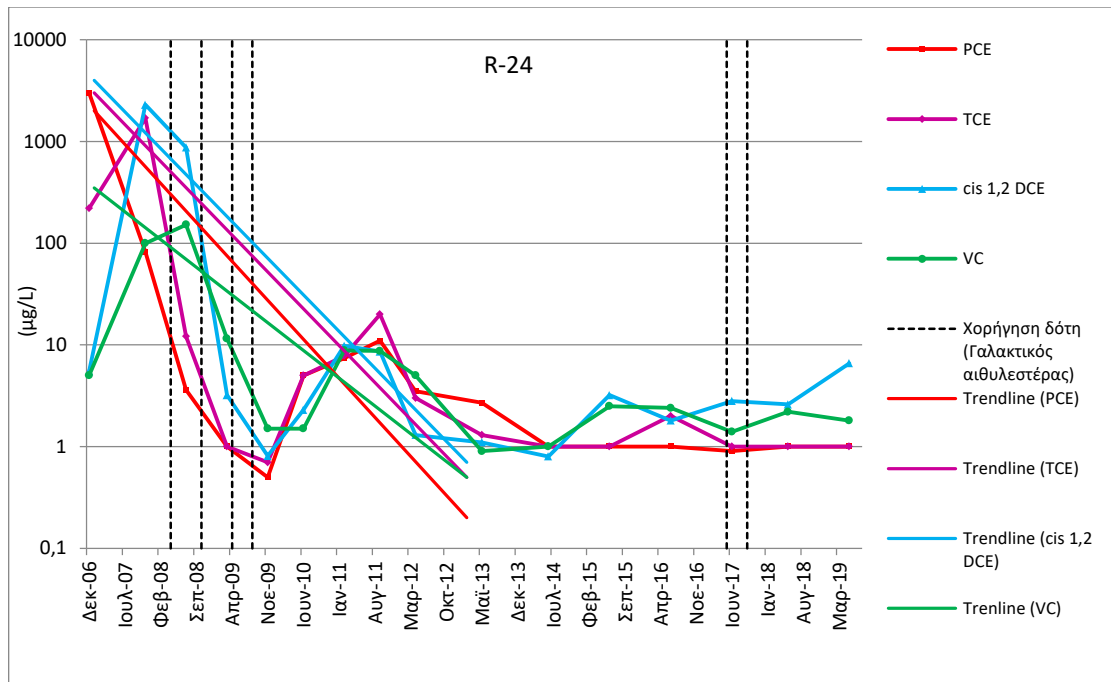
Στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα στο Νέο Μεξικό, για τον υπολογισμό των χρόνων ημιζωής αξιοποιήθηκαν οι μετρήσεις συνολικά οκτώ πηγαδιών παρακολούθησης, από τα οποία τα έξι είναι πηγάδια της ρηχής στρώσης, ένα είναι πηγάδι της βαθιάς στρώσης 1 και ακόμη ένα της βαθιάς στρώσης 2. Στα Σχήματα Β.19 έως Β.26 παρουσιάζονται οι γραμμικές προσεγγίσεις των χρονοσειρών και στον Πίνακα παρατίθενται οι τιμές των χρόνων ημιζωής που υπολογίστηκαν μέσω αυτών.



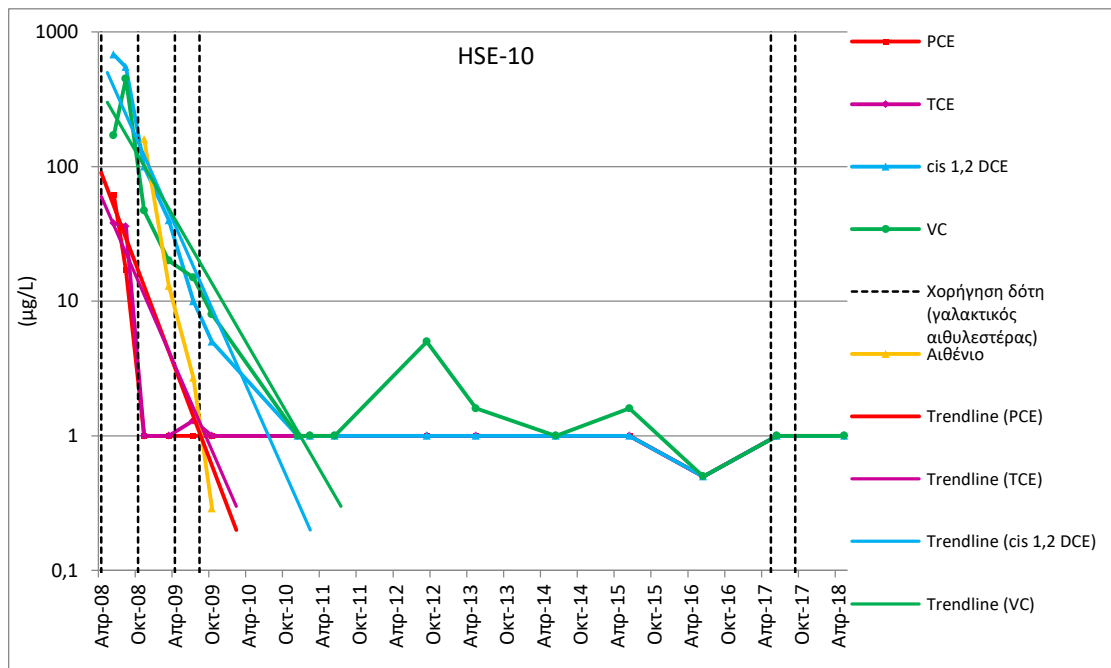
Σχήμα Β.19 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης EMW-4B της ρηχής στρώσης στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)



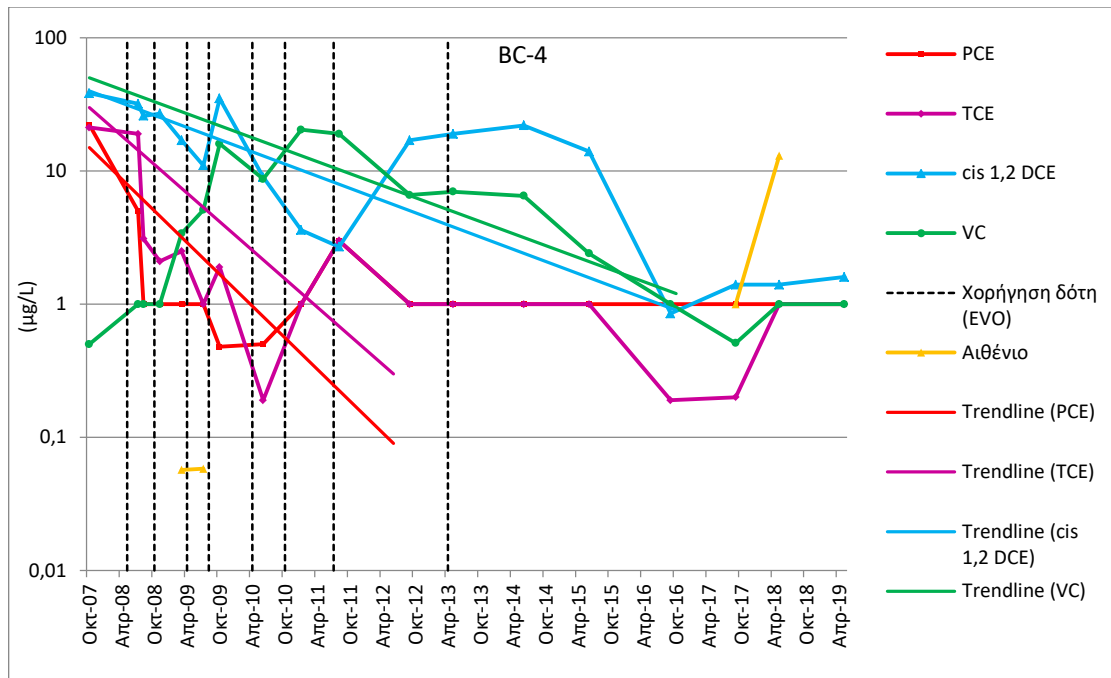
Σχήμα Β.20 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης SMW-6D της ρηχής στρώσης στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)



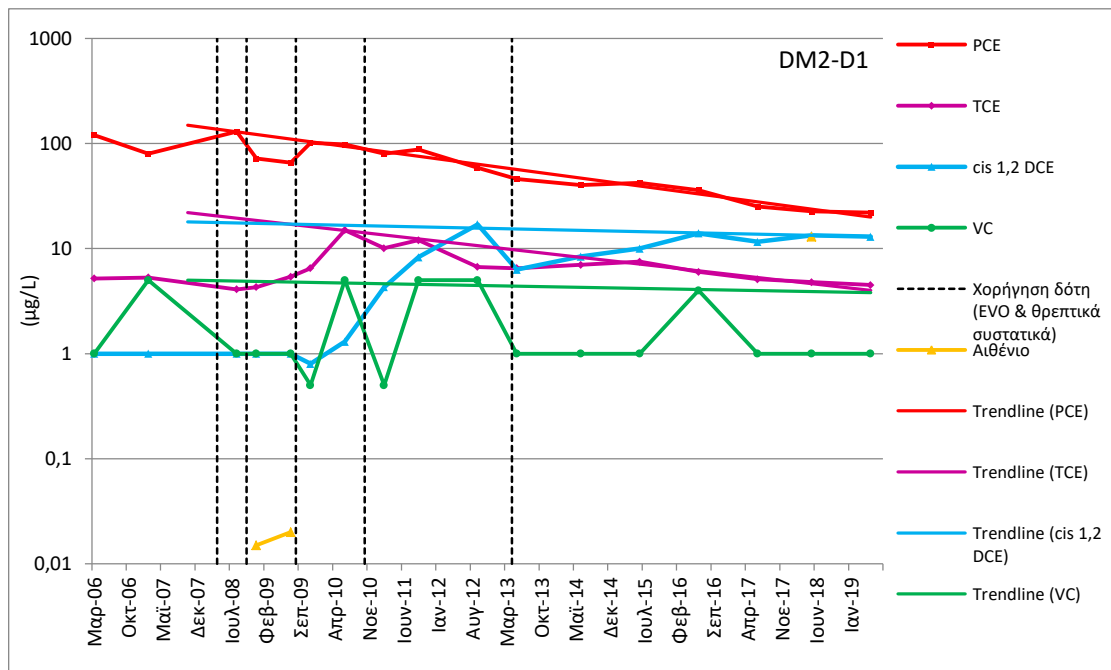
Σχήμα Β.21 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης R-24 της ρηχής στρώσης στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)



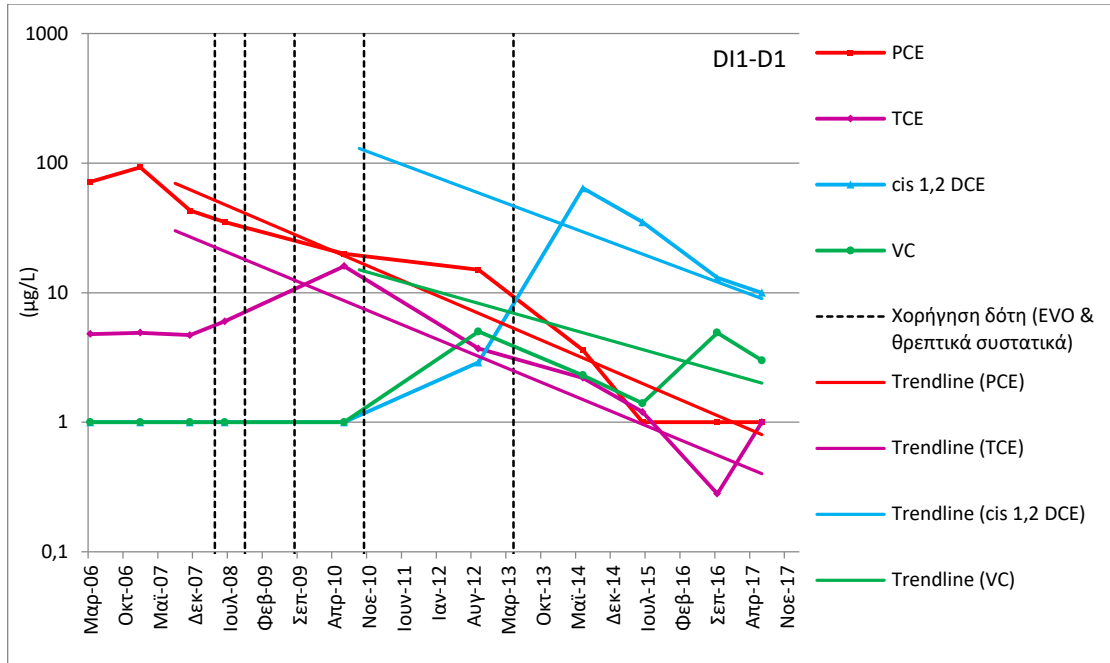
Σχήμα Β.22 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης HSE-10 της ρηχής στρώσης στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)



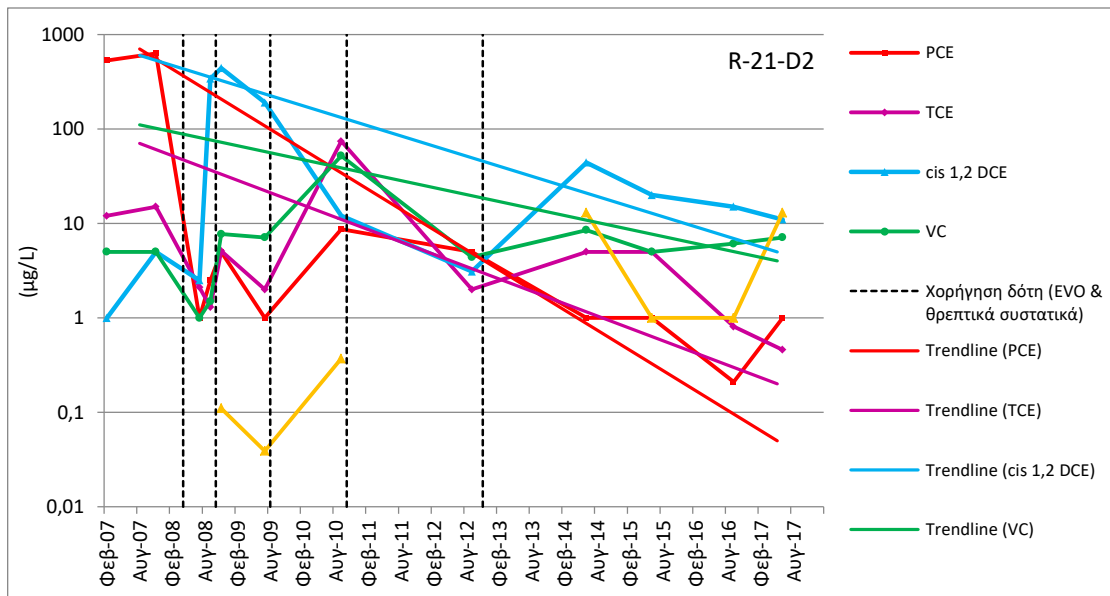
Σχήμα Β.23 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης BC-4 της ρηχής στρώσης στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)



Σχήμα Β.24 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM2-D1 της βαθιάς στρώσης 1 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)



Σχήμα Β.25 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DI1-D1 της βαθιάς στρώσης 1 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)



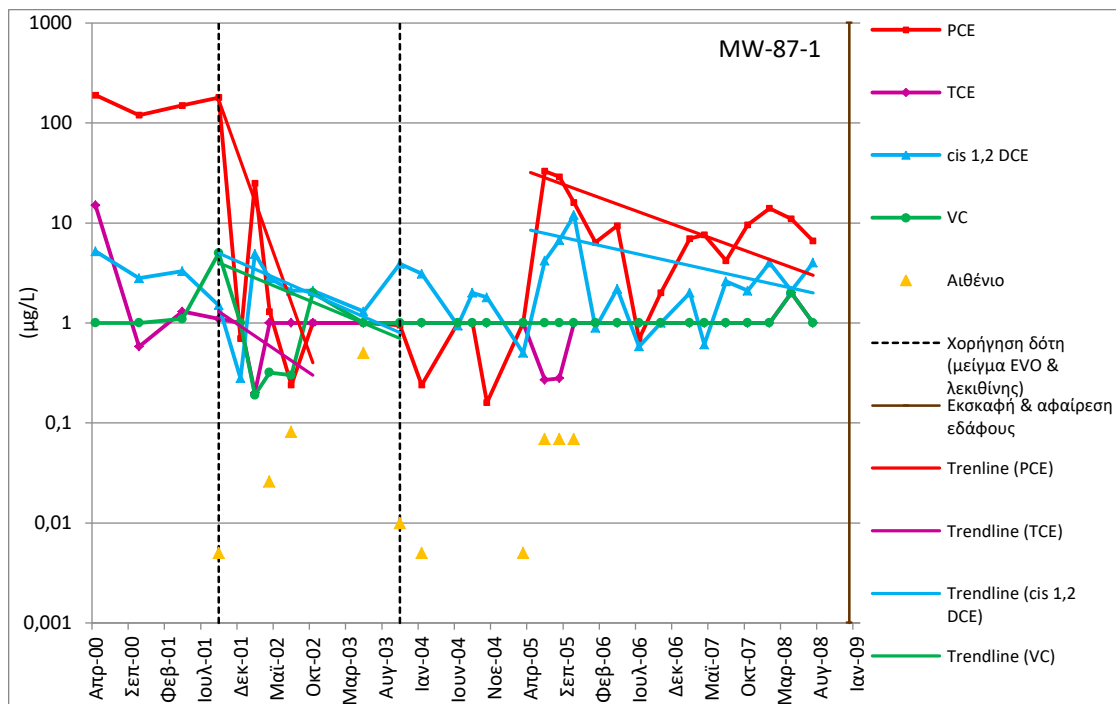
Σχήμα Β.26 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης R-21-D2 της βαθιάς στρώσης 2 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)

Στον Πίνακα Β.4 παρατίθενται οι τιμές των χρόνων ημιζωής που υπολογίστηκαν μέσω των παραπάνω χρονοσειρών για την ρυπασμένη έκταση στην πόλη Εσπανιόλα.

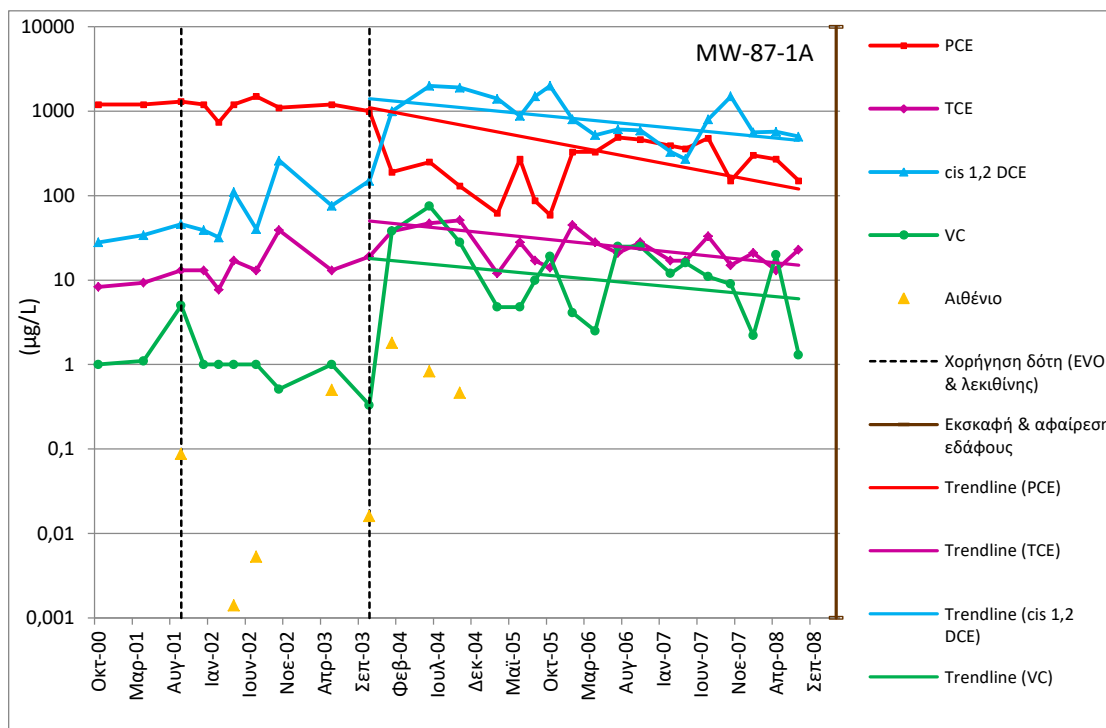
Πίνακας Β.4 Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής ανά πηγάδι παρακολούθησης στην ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα

Ρυπασμένος χώρος	Στρώση υδροφορέα	Πηγάδι παρακολούθησης	Πλήθος χορηγήσεων δότη	Πλήθος δειγματοληψιών	Τάση συμπεριφοράς	Χρόνοι ημιζωής - $T_{1/2}$ (έτη)			
						PCE	TCE	cDCE	VC
Ρυπασμένη έκταση στην πόλη Εσπανιόλα Νέο Μείζικο, Η.Π.Α.	Ρηχή	EWMW-4B	7	18	Πρόοδος	0.53	0.65	0.71	1.66
		SMW-6D	7	17	Πρόοδος	1.25	1.61	1.88	2.09
		R-24	7	16	Πρόοδος	0.47	0.49	0.5	0.66
		HSE-10	6	15	Πρόοδος	0.22	0.25	0.25	0.33
		BC-4	8	18	Πρόοδος	0.65	0.72	1.57	1.7
	Βαθεία στρώση 1	DM2-D1	5	16	Στασιμότητα	4.07	4.81	25.11	30.4
		D11-D1	5	9	Πρόοδος	1.54	1.6	1.7	2.36
	Βαθεία στρώση 2	R-21-D2	5	28	Πρόοδος	0.72	1.17	1.43	2.07

Για τον υπολογισμό των χρόνων ημιζωής των χλωριωμένων αιθυλενίων στην πρώην εγκατάσταση 87 της Πρώην Αεροπορικής Βάσης Νιούαρκ αξιοποιήθηκαν οι μετρήσεις δύο πηγαδιών παρακολούθησης, Στα Σχήματα Β.27 και Β.28 παρουσιάζονται οι γραμμικές προσεγγίσεις των δύο χρονοσειρών αντίστοιχα και στον Πίνακα Β.5 παρατίθενται οι τιμές των χρόνων ημιζωής που υπολογίστηκαν μέσω αυτών.



Σχήμα Β.27 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW-87-1 της πρώην Εγκατάστασης 87 στην πρώην Αεροπορική Βάση Νιούαρκ (Parsons, 2007; 2009)



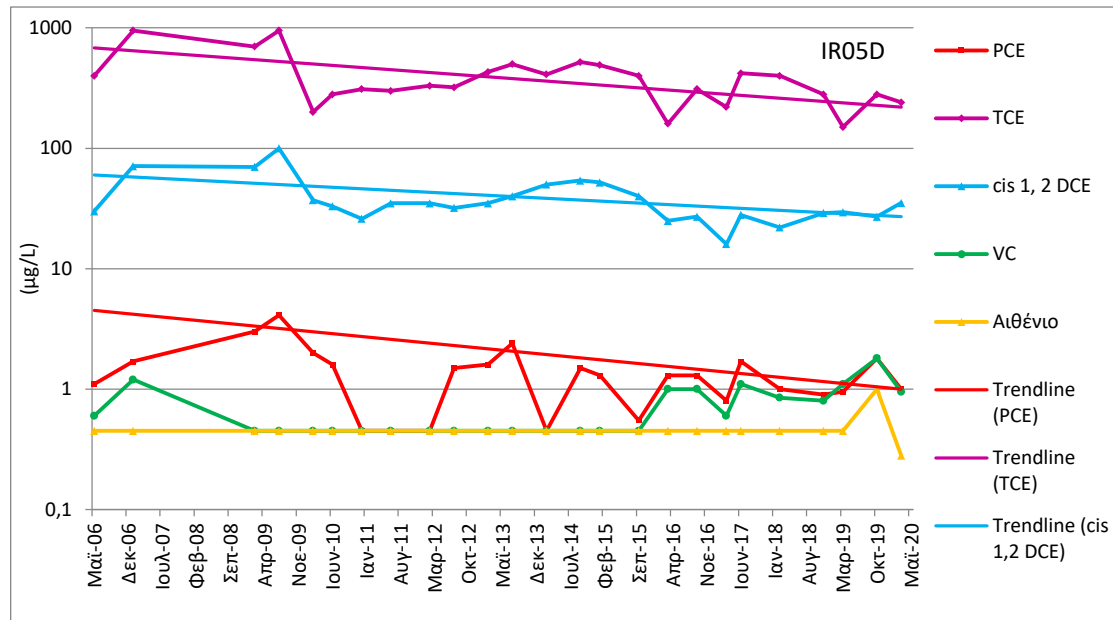
Σχήμα Β.28 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW-87-1A της πρώην Εγκατάστασης 87 στην πρώην Αεροπορική Βάση Νιούαρκ (Parsons, 2007; 2009)

Πίνακας Β.5 Υπολογισθείσες τιμές χρόνων ημιζωής ανά πηγάδι παρακολούθησης στην πρώην εγκατάσταση 87 της πρώην Αεροπορικής Βάσης Νιούαρκ

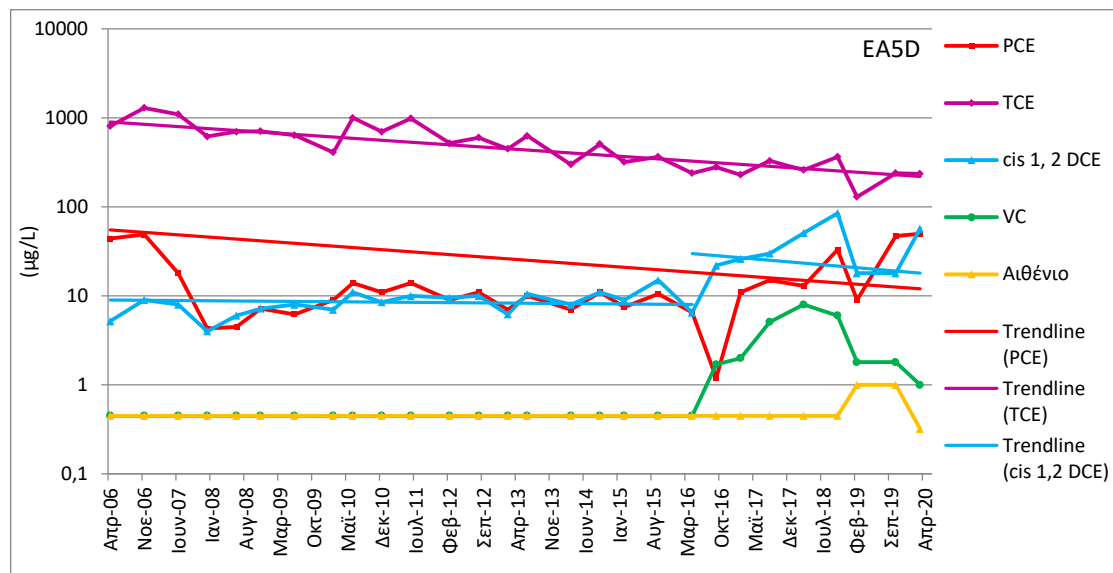
Ρυπασμένος χώρος	Πηγάδι παρακολούθησης	Πλήθος χορηγήσεων δότη	Πλήθος δειγματοληψιών	Τάση συμπεριφοράς	Χρόνοι ημιζωής - $T_{1/2}$ (έτη)			
					PCE	TCE	cDCE	VC
Πρώην Εγκατάσταση 87, Πρώην Αεροπορική Βάση Νιούαρκ, Οχάιο, Η.Π.Α.	MW-87-1	2	31	Πρόοδος	0.55 (6.6 μήνες)	0.55 (6.6 μήνες)	1.21	1.85
	MW-87-1A	2	31	Στασιμότητα	1.51	2.78	2.95	3.06

Για τον υπολογισμό των χρόνων ημιζωής των χλωριωμένων αιθυλενίων κατά την εφαρμογή της Ενδογενούς Αποχλωρίωσης στο πεδίο αξιοποιήθηκαν οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ και στην ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα. Στα Σχήματα Β.29 έως Β.31 παρουσιάζονται οι γραμμικές προσεγγίσεις των χρονοσειρών τριών πηγαδιών παρακολούθησης της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ, στις τοποθεσίες των οποίων η εφαρμοζόμενη μέθοδος αποκατάστασης είναι η ενδογενής αποχλωρίωση. Στα Σχήματα Β.32 έως Β.34 παρουσιάζονται οι γραμμικές προσεγγίσεις των χρονοσειρών τριών πηγαδιών παρακολούθησης των ενδιάμεσων στρώσεων και στο Σχήμα Β.35 παρουσιάζονται οι γραμμικές προσεγγίσεις της χρονοσειράς πηγαδιού

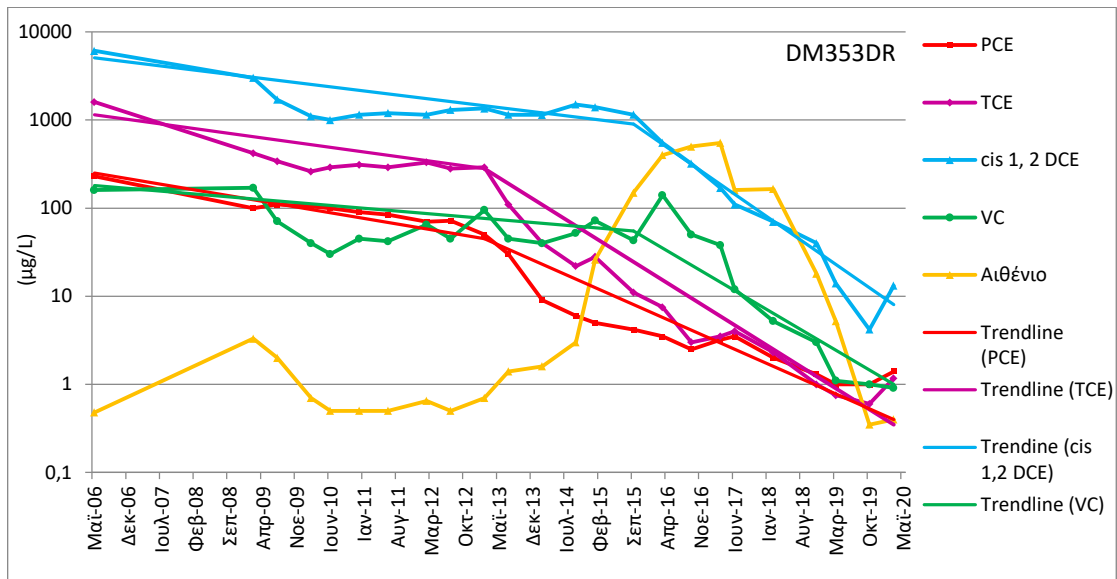
παρακολούθησης της ρηχής στρώσης του υδροφορέα της ρυπασμένης έκτασης στην πόλη Εσπανιόλα αντίστοιχα. Οι υπολογισθείσες τιμές των χρόνων ημιζωής ανά πηγάδι για κάθε χλωροαιθένιο παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5 (Πίνακας 5.3) και για τους δύο ρυπασμένους χώρους.



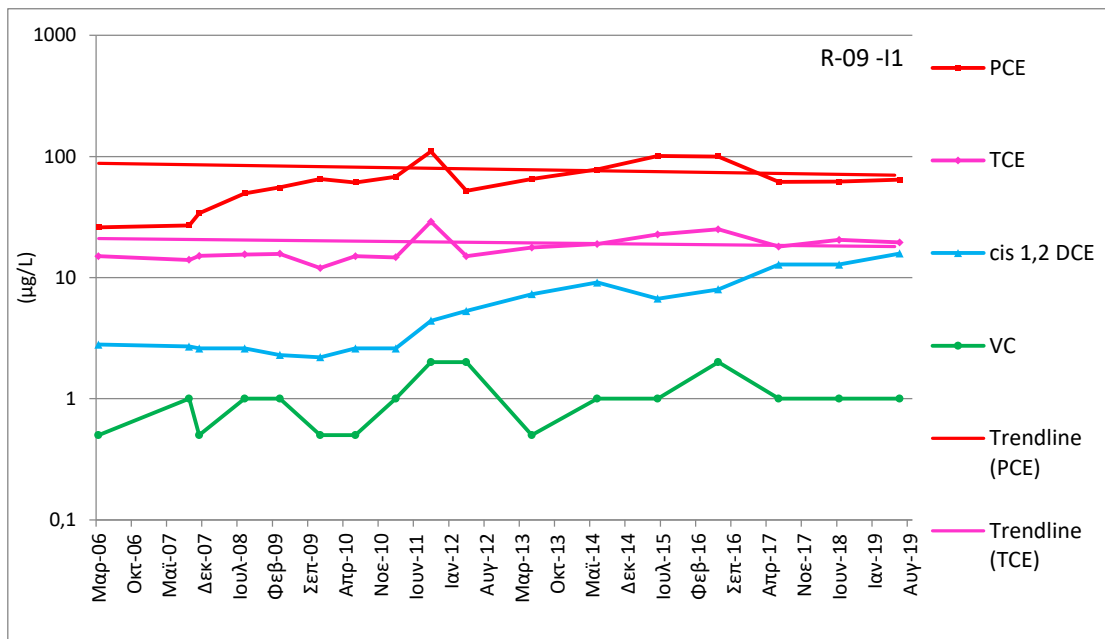
Σχήμα Β.29 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης IRO5D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007b; 2007c; 2008b; 2008c; 2008d; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2011b; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM, 2016c; 2018a;2020c; 2020d)



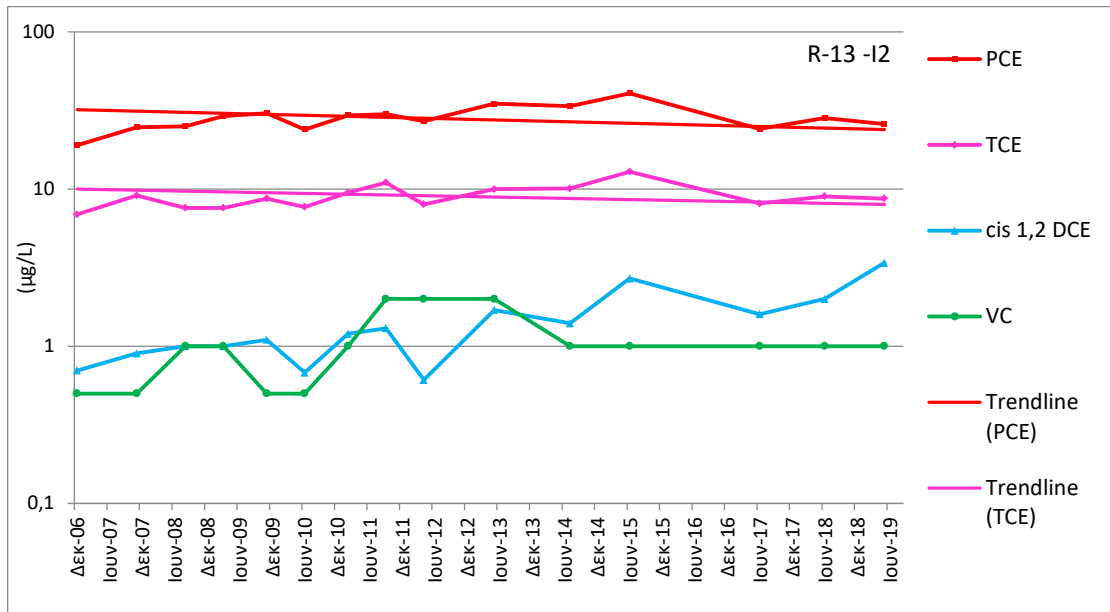
Σχήμα Β.30 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης EA5D της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007b; 2007c; 2008b; 2008c; 2008d; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2011b; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM, 2016c; 2018a;2020c; 2020d)



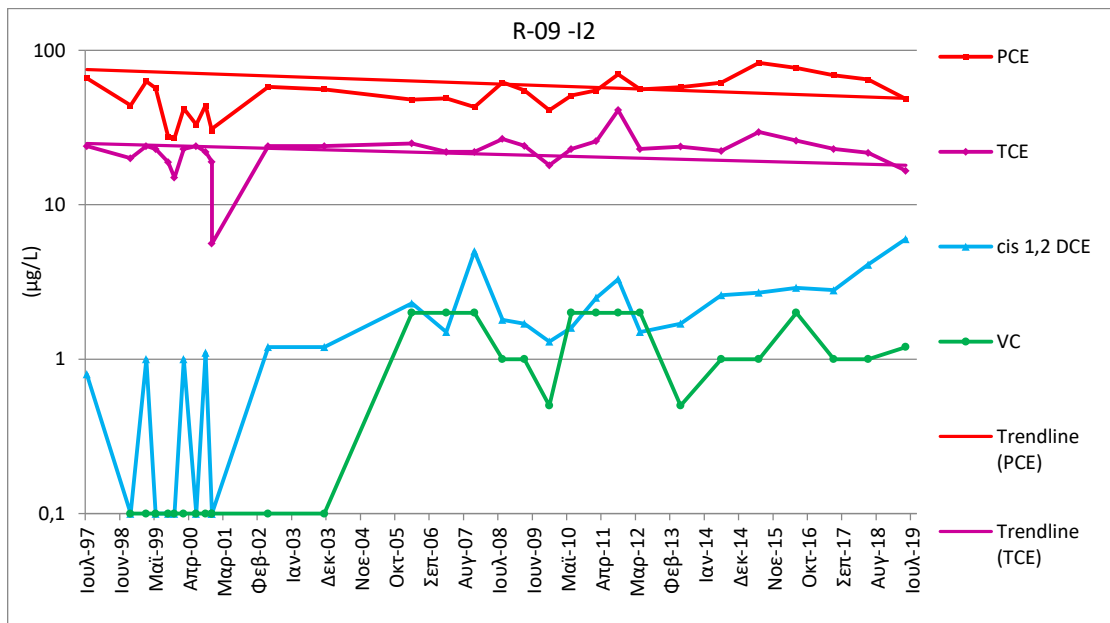
Σχήμα Β.31 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης DM353DR της βαθιάς στρώσης στην Περιοχή 6 της Βάσης Ντόβερ (ORNL, 2007b; 2007c; 2008b; 2008c; 2008d; 2009b; 2009d; 2010a; 2010b; 2011c; 2011b; 2012d; 2013b; 2013c; 2013d; 2013e; 2014c; 2014d; 2015b; 2015c; 2018a; 2018b; 2019; 2020); AECOM, 2016c; 2018a; 2020c; 2020d)



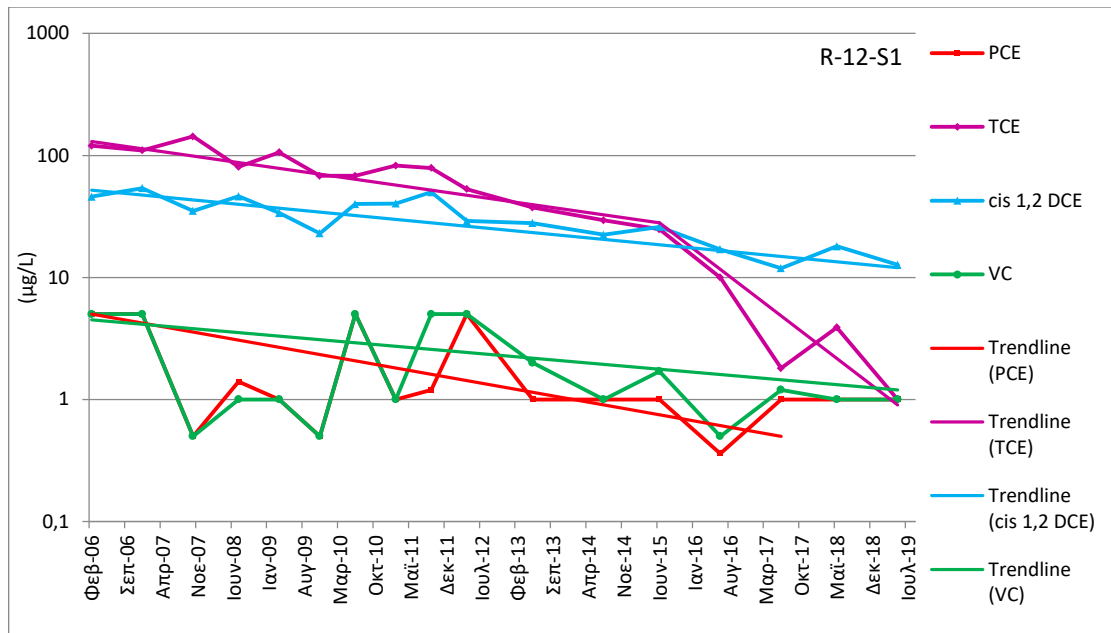
Σχήμα Β.32 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης R-09-11 της ενδιάμεσης στρώσης 1 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)



Σχήμα Β.33 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης R-13-I2 της ενδιάμεσης στρώσης 2 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)

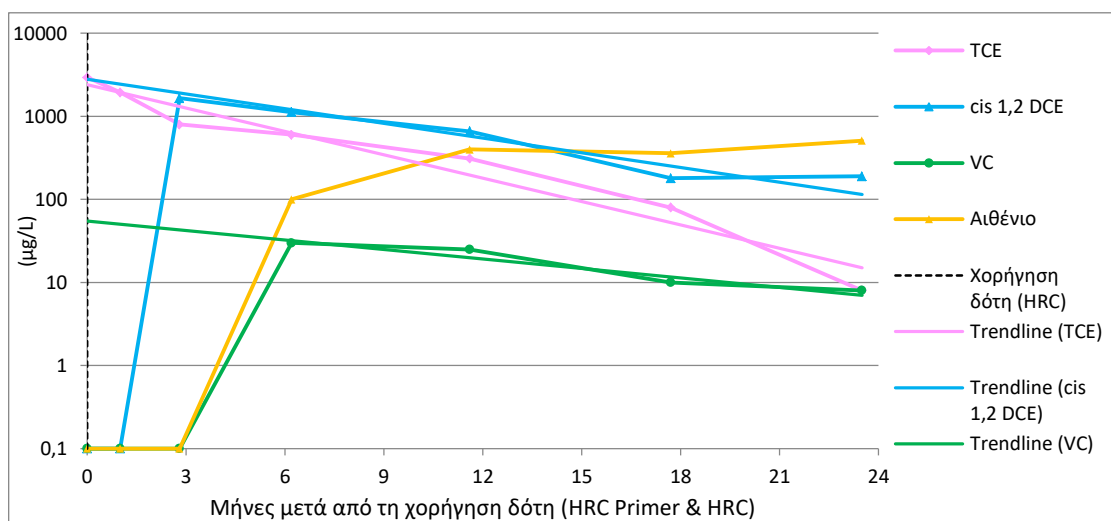


Σχήμα Β.34 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης R-09-I2 της ενδιάμεσης στρώσης 2 στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)

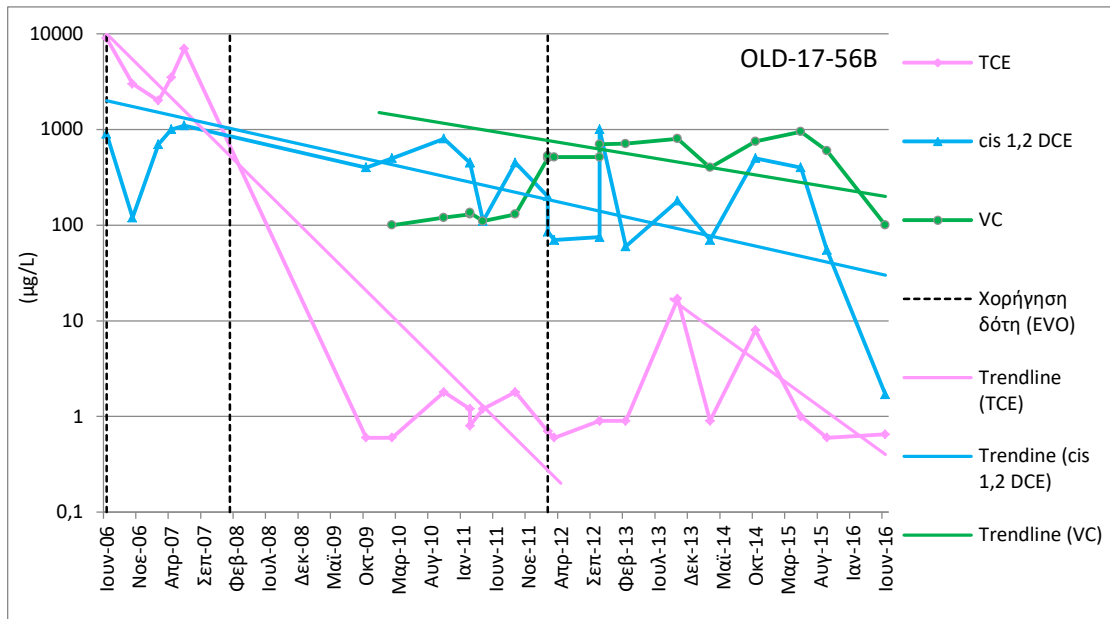


Σχήμα B.35 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης R-12-S1 της ρηχής στρώσης στη ρυπασμένη έκταση της πόλης Εσπανιόλα (USEPA, 2015; 2020)

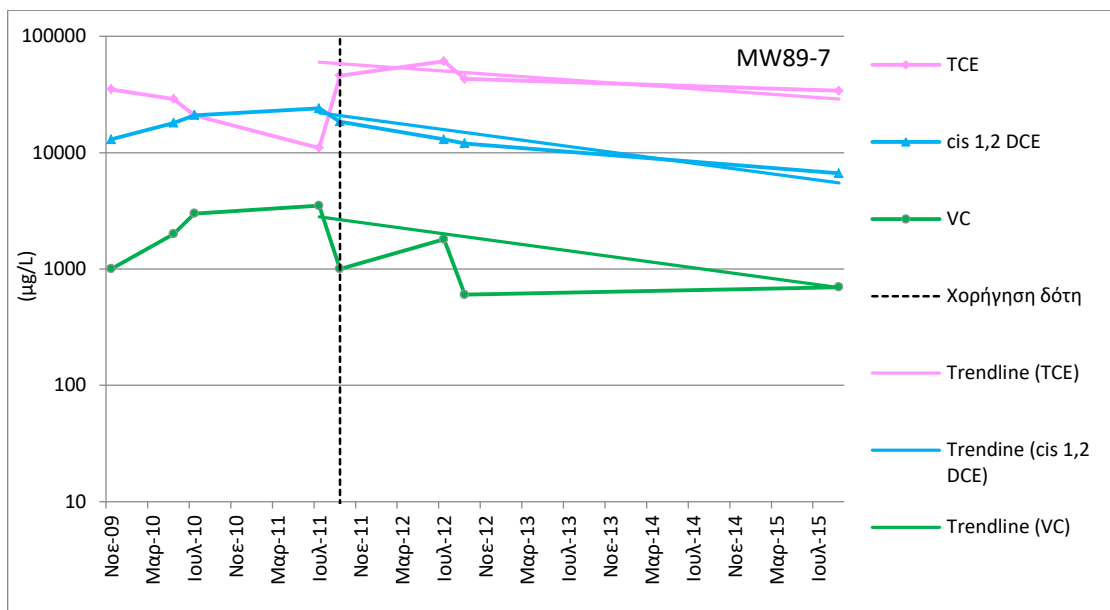
Στα Σχήματα B.36 έως B.44 παρουσιάζονται οι γραμμικές προσεγγίσεις των χρονοσειρών των οποίων οι μετρήσεις στο πεδίο αντήθηκαν από ερευνητικές μελέτες και εν συνεχεία (α) αξιοποιήθηκαν με σκοπό τον υπολογισμό των χρόνων ημιζωής των χλωριωμένων αιθυλενίων του Πίνακα 5.4 και (β) τη σύγκρισή τους με τους αντίστοιχους του Πίνακα 5.2.



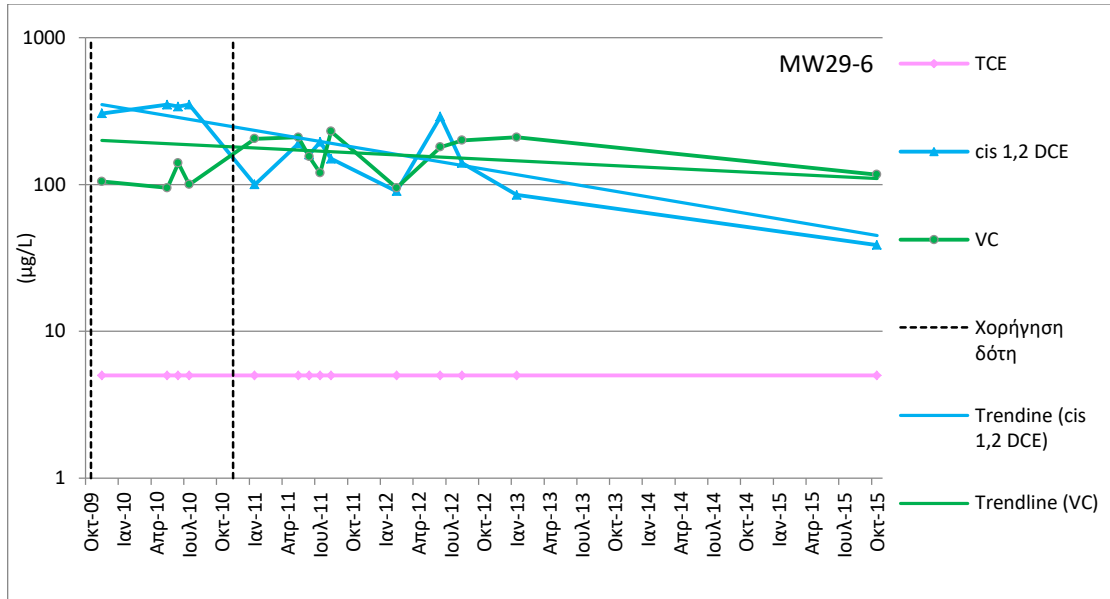
Σχήμα B.36 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων πηγαδιού παρακολούθησης σε ενεργή εγκατάσταση στις Η.Π.Α. (Regenesis)



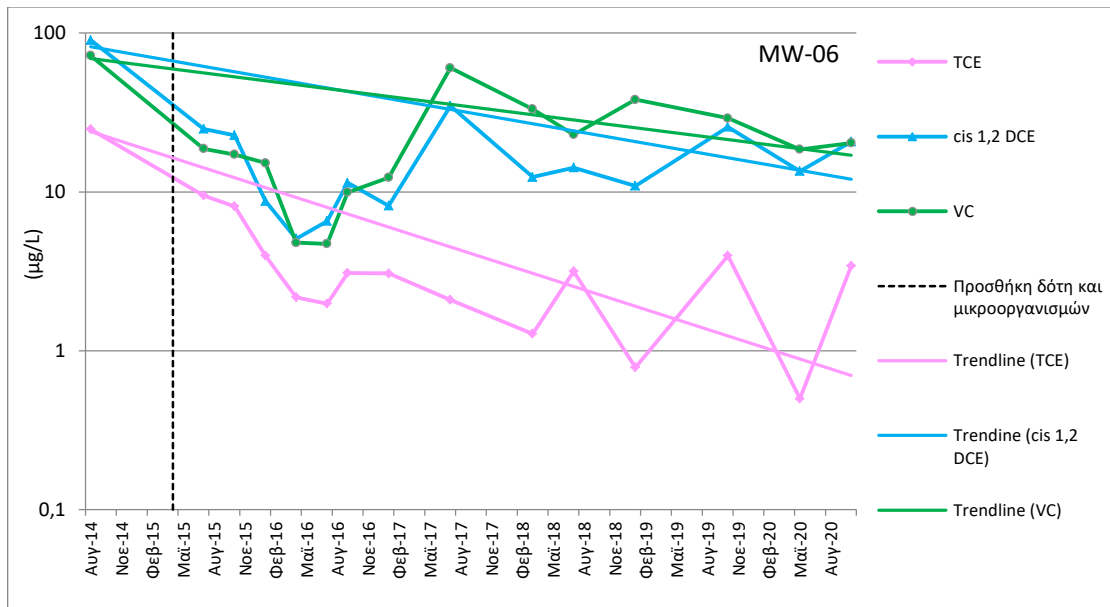
Σχήμα Β.37 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης OLD-17-56B της Περιοχής SA17 στο πρώην Κέντρο Εκπαίδευσης Πολεμικού Ναυτικού στο Ορλάντο των Η.Π.Α. (ESTCP, 2017)



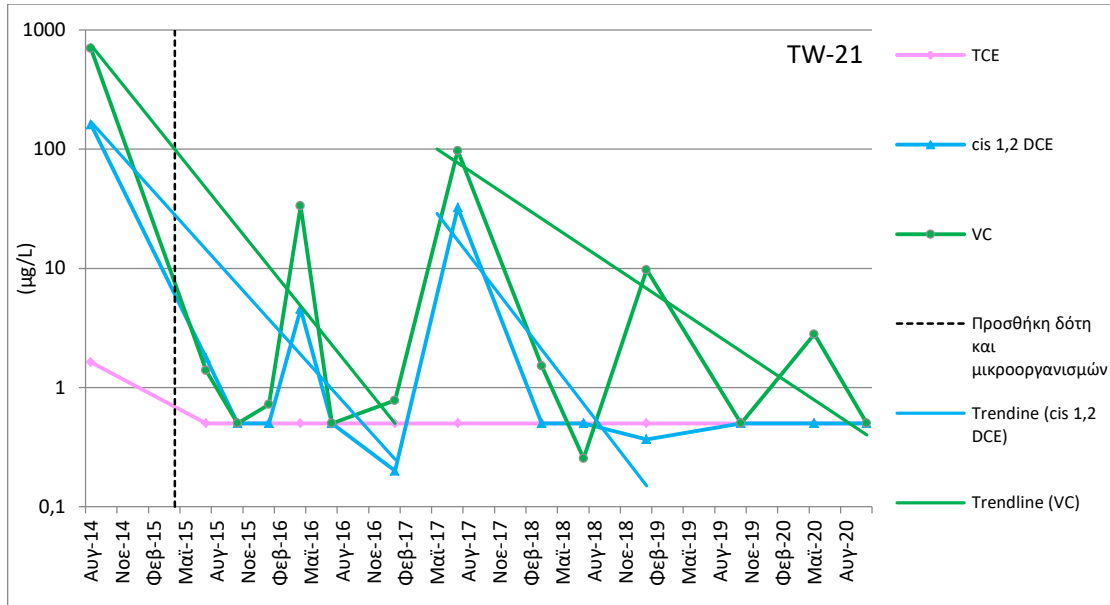
Σχήμα Β.38 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW89-7 της Ζώνης 4 στην Πρώην Αεροπορική Βάση Τσάρλεστον (ESTCP, 2020)



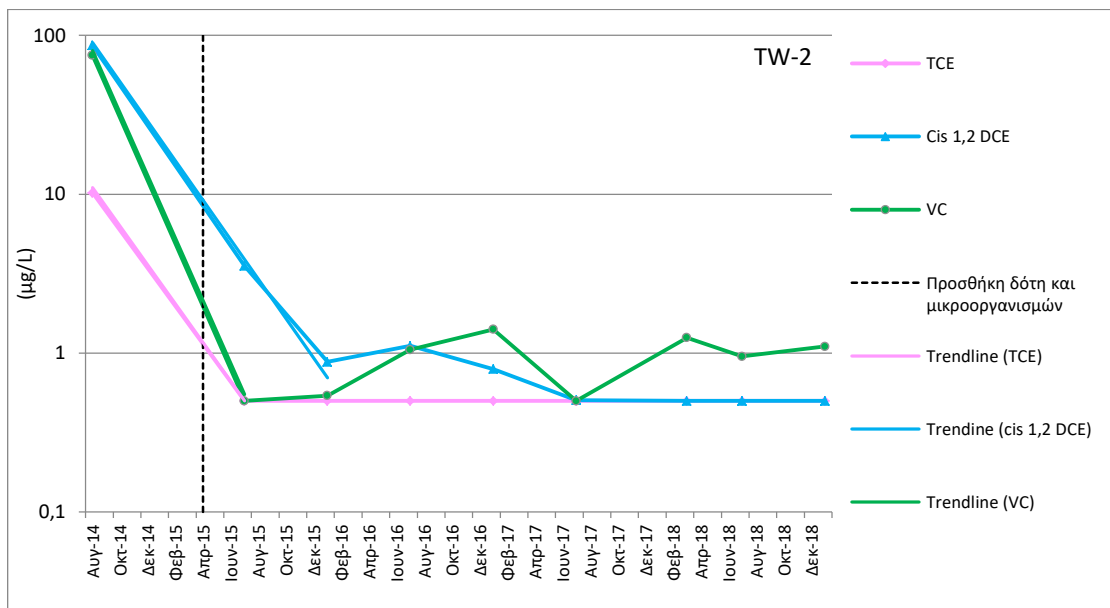
Σχήμα Β.39 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW29-6 της Ζώνης 4 στην Πρώην Αεροπορική Βάση Τσάρλεστον (ESTCP, 2020)



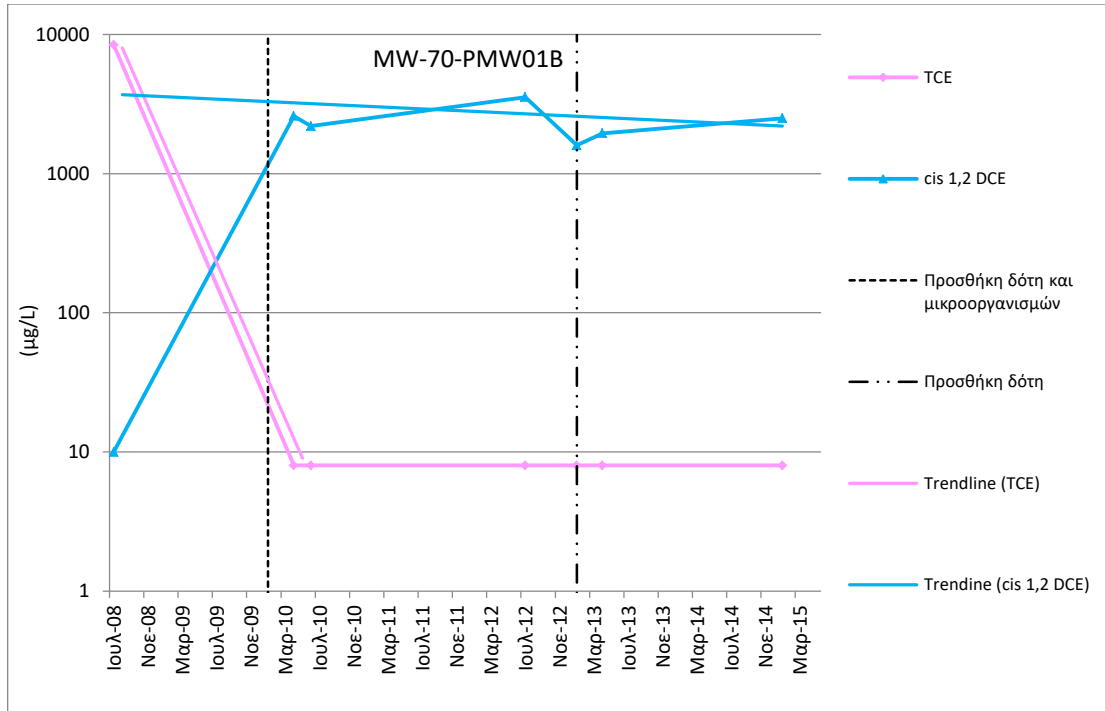
Σχήμα Β.40 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW-06 της Περιοχής SS032 στην Αεροπορική Βάση Κολόμπους (USACE, 2021)



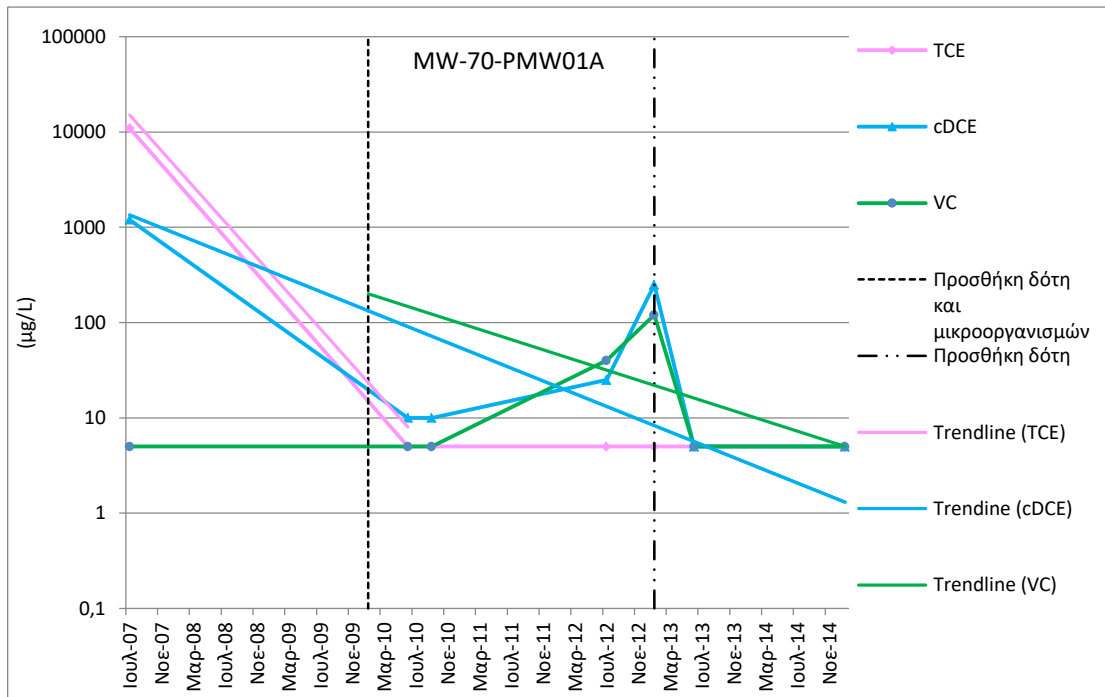
Σχήμα Β.41 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης TW-21 της Περιοχής SS032 στην Αεροπορική Βάση Κολόμπους (USACE, 2021)



Σχήμα Β.42 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης TW-2 της Περιοχής SS032 στην Αεροπορική Βάση Κολόμπους (USACE, 2021)



Σχήμα Β.43 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW-70-PMW01B της Περιοχής 70 στο Σιλ Μπις (ESTCP, 2020)



Σχήμα Β.44 Γραμμική προσέγγιση της χρονοσειράς μετρήσεων του πηγαδιού παρακολούθησης MW-70-PMW01A της Περιοχής 70 στο Σιλ Μπις (ESTCP, 2020)

Παράρτημα Γ: Γλωσσάρι ορολογίας

A

Αποχλωριωτική διαδικασία: dechlorinating process

Αποχλωρίωση: dechlorination

B

Βιοαποκατάσταση: bioremediation

Βιοδιέγερση: biostimulation

Βιοεπαύξηση: bioaugmentation

Βινυλοχλωρίδιο: vinyl chloride

Γ

Γαλακτικό ανιόν: lactate

Γαλακτοποιημένο φυτικό λάδι: emulsified vegetable oil

Γαλάκτωμα: oil emulsions

Δ

Διχλωροαιθέριο: dichloroethene

E

Ενδογενής βιολογική αποκατάσταση: Intrinsic Bioremediation

Ενισχυμένη αποχλωρίωση: Enhanced Bioremediation

Ένωση απελευθέρωσης υδρογόνου: hydrogen release compound

Εξασθένηση: Attenuation

Επιτόπου βιοαποκατάσταση: in situ Bioremediation

Εφαρμογές πεδίου: field applications

Εφαρμογή πλήρους κλίμακας: full-scale application

Z

H

Θ

I

K

Λ

M

Μέθοδος αντλησης & επεξεργασίας: Pump & Treat

Μελάσες: molasses

Μη υδατική φάση (ρύπου): Non aqueous phase

Μικρογαλακτώματα: micro-emulsions

Μόνιμα πηγάδια ένεσης: permanent injection wells

Ν

Νεκρή φυτική ύλη: mulch

Ξ

Ο

Π

Παρακολούθηση: monitoring

Περατό διάφραγμα: permeable reactive barrier

Περιβαλλοντική αποκατάσταση: remediation

Πιλοτική δοκιμή: pilot test

Προϊόντα κομποστοποίησης: compost

Προσθήκη δότη: donor addition

Ρ

Σ

Σημεία απευθείας εισπίεσης δότη: direct push probes

Συμμεταβολισμός: cometabolism

Συνεργός παράγοντας: co-factor

Σύστημα επανακυκλοφορίας νερού: recirculation system

Τ

Τετραχλωροαιθέριο: tetrachloroethene

Τριχλωροαιθέριο: trichloroethene

Υ

Υπέδαφος: subsurface

Υπόγειο νερό: groundwater

Φ

Φυτικά λάδια: vegetable oils

Χ

Χημική επεξεργασία: Chemical Treatment

Χρόνος ημιζωής: half life value

Ψ

Ω

Παράρτημα Δ: Πίνακας συντμήσεων και αρκτικόλεξων

AFCEC: Air Force Civil Engineer Center

ATSDR: Agency for Toxic Substances and Disease Registry

cDCE: cis 1,2 dichloroethene

CERCLA: Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act

DAFB: Dover Air Force Base

DNAPL: Dense Non-Aqueous Phase Liquid

DPITs: Direct Push Injection Transects

ESTCP: Environmental Security Technology Certification Program

EVO: Emulsified Vegetable Oil

FYR: Five-year Review

GRFL: Groundwater Remediation Field Laboratory

HRC: Hydrogen Release Compound

IT: International Technology Corporation

NPL: National Priorities List

OU: Operable Unit

ORNL: Oak Ridge National Laboratory

Parsons: Parsons Corporation

PCE: tetrachloroethene

PICTs: Plume Injection Circulation Transects

RD: Remedial Design

RA: Remedial Action

Regenesis: Regenesis Corporation

ROD: Record of Decision

TCE: trichloroethene

USACE: United States Army Corps of Engineers

USEPA: United States Environmental Protection Agency

VOCs: Volatile Organic Compounds

VC: vinyl chloride