



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**‘ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΕΙΟΥ ΡΑΝΤΑΡ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ
ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ’**

ΚΟΥΚΑΔΑΚΗ ΜΑΡΙΑ

ΤΖΙΜΟΥΡΤΟΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

Εξεταστική επιτροπή

Βαφείδης Αντώνιος, Αναπληρωτής Καθηγητής Π.Κ. (επιβλέπων)

Μαρκόπουλος Θεόδωρος, Καθηγητής Π.Κ.

Τσόκας Γρηγόριος, Καθηγητής Α.Π.Θ., Τμήμα Γεωλογίας

ΧΑΝΙΑ

Οκτώβριος 2002

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μετά την περάτωση της διπλωματικής εργασίας θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε:

Τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Αντώνιο Βαφείδη για την ανάθεση της εργασίας και τη συνεχή επιστημονική υποστήριξη.

Τον κ. Θεόδωρο Μαρκόπουλο Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και τον κ. Γρηγόριο Τσόκα Καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και την επιστημονική συνεργασία.

Τον κ. Píran M. Καθηγητή του Πανεπιστημίου της Τεργέστης για τη διάθεση των απαραίτητων στοιχείων.

Τον κ. Σπανουδάκη Ν. Μηχανικό Ορυκτών Πόρων για το χρόνο, την υπομονή και την πολύτιμη βοήθεια που μας προσέφερε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Τους Καθηγητές του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Μανούτσογλου Ε. και κ. Καρατζά Γ. για τη βοήθειά τους πάνω σε γεωλογικά και περιβαλλοντικά θέματα.

Την κ. Ιερωνυμίδα Ε. απόφοιτη Γεωλογίας του Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών για την πολύτιμη βοήθεια της πάνω σε θέματα μετάφρασης.

Τους κ. Κρητικάκη Γ. και κ. Hamdan H. Μηχανικούς Ορυκτών Πόρων για την υποστήριξή τους.

Τον κ. Ταμβάκη Δ. υποψήφιο Μηχανικό Παραγωγής και Διοίκησης του Π.Κ για τη βοήθεια και ηθική υποστήριξη κατά την περάτωση της διπλωματικής εργασίας. ☺

Τις οικογένειές μας για την ηθική και υλική υποστήριξη που μας παρείχαν τόσο κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας όσο και των σπουδών μας γενικότερα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη της εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων πάνω σε περιβαλλοντικά προβλήματα. Ειδικότερα, εξετάζεται η συνεισφορά της τεχνικής του υπεδάφειου ραντάρ στην προσπάθεια για εντοπισμό και οριοθέτηση της ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών.

Περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο μεταδίδεται η ρύπανση μέσα στο υπέδαφος, προκειμένου να γίνει κατανοητή η εφαρμογή των γεωφυσικών τεχνικών στην ανίχνευσή της χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες γεωλογικές παραμέτρους.

Ως εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων πάνω σε περιβαλλοντικά προβλήματα, εξετάζεται η περίπτωση ρύπανσης στην περιοχή *Monfalcone* της βόρειας Ιταλίας, όπου πραγματοποιήθηκε γεωφυσική έρευνα με υπεδάφειο ραντάρ. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που ελήφθησαν κατά τη συγκεκριμένη διασκόπηση και σε αυτά εφαρμόζονται τεχνικές μαθηματικής επεξεργασίας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, αξιολογούνται και χρησιμοποιούνται για περαιτέρω ερμηνεία και συσχέτιση με στοιχεία προηγούμενων ερευνών στην εν λόγω περιοχή μελέτης. Επιδιώκεται η ανάδειξη επιμέρους ανωμαλιών και η συσχέτισή τους με πιθανούς ρυπογόνους παράγοντες.

Συμπεράσματα εξάγονται σχετικά με την εφαρμογή της τεχνικής του υπεδάφειου ραντάρ στη μελέτη ρύπανσης των εδαφών και υπογείων νερών και την ανάδειξη περιβαλλοντικών προβλημάτων μέσω μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης. Παράλληλα, αξιολογείται η αποτελεσματικότητα των μαθηματικών αλγορίθμων επεξεργασίας, ως προς τη βελτίωση της ποιότητας απεικόνισης των σημάτων γεωραντάρ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ	1
1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΟΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΤΟΜΕΑ	2
1.3 ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ....	2
1.4 ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΕΙΟΥ ΡΑΝΤΑΡ	3
1.5 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	4
1.6 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ	6
2.1 ΟΡΓΑΝΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ ΣΤΟ ΝΕΡΟ	6
2.2 ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	7
2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ.....	8
2.3.1 Μέθοδος Παροδικών Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων.....	9
2.3.2 Σεισμική Ανάκλαση	9
2.3.3 Σεισμική Διάθλαση	9
2.3.4 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης	10
2.3.5 Μαγνητομετρία	10
2.3.6 Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού.....	10
2.3.7 Μέθοδος Επαγόμενης Πολικότητας	11
2.3.8 Μέθοδος Γωνίας Κλίσης Χαμηλών Συχνοτήτων.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ	12
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
3.1.1 Δημοσιεύσεις μελετών περιβαλλοντικής γεωφυσικής	12
3.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ - ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΕΙΟΥ ΡΑΝΤΑΡ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ ΑΠΟΒΑΝΤΩΝ	16
3.2.1 Ηλεκτρικές έρευνες Ειδικής Αντίστασης διπόλου-διπόλου σε περιοχές απόρριψης αποβλήτων στη βόρεια Utah, Η.Π.Α.....	16
3.2.2 Απεικόνιση βιομηχανικών πλουμίων παραγόντων ρύπανσης με τεχνικές Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης.....	18

3.2.3 Η τεχνική του Υπεδάφειου Ραντάρ ως εργαλείο ανίχνευσης και αξιολόγησης περιοχών απόρριψης αποβλήτων	21
3.2.4 Χρήση συνδυασμένων γεωφυσικών μεθόδων για την εκτίμηση της αγωγιμότητας και του βαθμού κορεσμού σε νερό σχηματισμών κοντά στην επιφάνεια.....	28
3.2.5 Ανίχνευση ρύπανσης υπογείου νερού με ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους.....	31
3.3 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΓΩΓΙΜΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ ΣΥΣΧΕΤΙΖΟΜΕΝΕΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΡΥΠΑΝΣΗΣ.....	38
3.3.1 Γεωηλεκτρικές έρευνες σε περιοχή μελέτης η οποία έχει υποστεί ρύπανση από υδρογονάνθρακες.....	38
3.3.2 Υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας που σχετίζονται με πλούσιο ρύπων LNAPL και απεικονίζονται με ενσωματωμένες γεωφυσικές τεχνικές	43
3.4 ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗΣ ΡΥΠΩΝ NAPL.....	47
3.4.1 Παρατήρηση μετανάστευσης ρύπων DNAPL σε ελεγχόμενη διαρροή με τη βοήθεια γεωφυσικών μεθόδων	47
3.4.2 Έρευνες με Υπεδάφειο Ραντάρ για την ανίχνευση παραγόντων ρύπανσης προϊόντων πετρελαίου.....	54
3.4.3 Πειράματα για την ανίχνευση οργανικών παραγόντων ρύπανσης στην ακόρεστη ζώνη «vadose zone»	56
3.4.4 Ανίχνευση και ανάλυση ρύπανσης LNAPL μέσω του Υπεδάφειου Ραντάρ, χρησιμοποιώντας τα μεγέθη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων «στιγμιαίο πλάτος, φάση και συχνότητα»	58
3.5 ΆΛΛΕΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ.....	62
3.5.1 Τομογραφία Διάθλασης πάνω από μία θαμμένη περιοχή απόρριψης αποβλήτων .	62
3.5.2 Μελέτες προσδιορισμού των παραμέτρων σε απορρίψεις αστικών αποβλήτων	65
3.5.3 Χαρτογράφηση ρύπανσης εδαφικού νερού με χρήση των γεωφυσικών μεθόδων Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης και μέτρησης Γωνίας Κλίσης	67
3.5.4 Από αέρα γεωφυσική έρευνα για το χαρακτηρισμό «επικίνδυνων» περιοχών αποβλήτων.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΠΕΔΑΦΕΙΟ ΡΑΝΤΑΡ.....	72
4.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΕΙΟΥ ΡΑΝΤΑΡ.....	72
4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	73
4.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΕΙΟΥ ΡΑΝΤΑΡ.....	75

4.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ	77
4.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	78
4.5.1 Βάθος διείσδυσης ακτινοβολίας και βάθος στόχου	78
4.5.2 Γεωμετρία στόχου.....	79
4.5.3 Ηλεκτρικές ιδιότητες στόχου και μέσου διάδοσης.....	80
4.5.4 Περιβάλλον διασκόπησης	81
4.6 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ.....	81
4.7 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ	84
4.7.1 Συχνότητα εκπομπής.....	84
4.7.2 Ολικός χρόνος καταγραφής	85
4.7.3 Διάστημα δειγματοληψίας.....	86
4.7.4 Βήμα διασκόπησης.....	87
4.7.5 Απόσταση κεραιών.....	87
4.7.6 Προσανατολισμός κεραιών.....	88
4.7.7 Κατακόρυφη υπέρθεση.....	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ	90
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	90
5.2 ΦΙΛΤΡΑ	90
5.2.1 Φίλτρα διόρθωσης	91
5.2.2 Φίλτρο μέσου σημείου ή κινητού μέσου όρου	91
5.2.3 Φίλτρο μέσου ίχνους.....	92
5.2.4 Φίλτρο διαφοράς ιχνών	93
5.2.5 Φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων.....	93
5.3 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	93
5.3.1 Αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης	94
5.3.2 Εκθετική ενίσχυση σήματος λόγω απωλειών διασποράς.....	95
5.3.3 Σταθερή ενίσχυση	95
5.4 ΣΤΙΓΜΙΑΙΑ ΜΙΓΑΔΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ.....	96
5.4.1 Στιγμιαίο πλάτος.....	96
5.4.2 Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα ‘decibel’	96
5.4.3 Ρυθμός μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους	97
5.4.4 Στιγμιαίο φασματικό εύρος.....	97
5.4.5 Στιγμιαία φάση	97
5.4.6 Κανονικοποιημένο πλάτος.....	98

5.4.7 Γινόμενο του πλάτους και του συνημιτόνου της στιγμιαίας φάσης	98
5.4.8 Γινόμενο του φιλτραρισμένου στιγμιαίου πλάτους και του συνημιτόνου της στιγμιαίας φάσης	98
5.4.9 Στιγμιαία συχνότητα	99
5.4.10 Σταθμισμένη μέση συχνότητα	99
5.4.11 Δείκτης λεπτών στρωμάτων	99
5.4.12 Επιτάχυνση της φάσης	100
5.4.13 Στιγμιαίος δείκτης ποιότητας	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΑΠΟ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ 'MONFALCONE' ΤΗΣ ΒΟΡΕΙΑΣ ΙΤΑΛΙΑΣ.....	101
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	101
6.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	101
6.3 ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ	103
6.4 ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΥΠΕΛΑΦΕΙΟ ΡΑΝΤΑΡ	106
6.4.1 Γεωλογία της υπό μελέτη περιοχής	107
6.4.2 Διεξαγωγή μετρήσεων και συλλογή δεδομένων γεωραντάρ	110
6.5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΥΠΕΛΑΦΕΙΟΥ ΡΑΝΤΑΡ	113
6.5.1 Μαθηματική επεξεργασία δεδομένων τομών ανάκλασης	113
6.5.2 Επεξεργασία δεδομένων για τον υπολογισμό ταχυτήτων	130
6.6 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ	134
6.6.1 Αποτελέσματα γεωραντάρ	134
6.6.2 Αποτελέσματα άλλων ερευνών	137
6.6.3 Συσχέτιση και ερμηνεία αποτελεσμάτων	137
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	141
7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	141
7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	143
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΟΡΓΑΝΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ ΣΤΟ ΝΕΡΟ	145
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ FOURIER - HILBERT	152
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	154
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανάπτυξη γεωφυσικής τεχνολογίας

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 παρατηρήθηκε αξιόλογη ανάπτυξη στις ήδη υπάρχουσες τεχνικές που εφαρμόζονταν για τη μελέτη και περιγραφή των γεωλογικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους. Αρχικά χρησιμοποιούνταν ένας περιορισμένος αριθμός συστημάτων απεικόνισης του εδάφους, χαμηλής μάλιστα ποιότητας, τα οποία δεν προσέδιδαν επαρκείς πληροφορίες για μελέτη του υπεδάφους. Το υψηλό κόστος και τα μακροχρόνια προγράμματα οδήγησαν στην ανάπτυξη πρωτοποριακών μεθόδων στη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων.

Οι γεωφυσικές τεχνικές τα τελευταία χρόνια παρουσίασαν σημαντική τεχνολογική άνθιση με αποτέλεσμα να εφαρμοστούν στην απεικόνιση των χαρακτηριστικών του υπεδάφους. Το μειωμένο κόστος που χαρακτηρίζει τις μεθόδους αυτές, αλλά και το ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον των εταιρειών για μελέτη των υπεδάφειων γεωλογικών δομών, κατέστησαν τις έρευνες γεωφυσικής διασκόπησης αναπόσπαστο τμήμα μεγάλων ερευνητικών προγραμμάτων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι παραδοσιακές γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόζονταν στην ανίχνευση μεταλλευμάτων και πετρελαίου, βρίσκουν πλέον πρόσφορο έδαφος στον εντοπισμό της υπεδάφειας ρύπανσης. Έτσι, τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται ένας καινούργιος κλάδος της εφαρμοσμένης γεωφυσικής, ο οποίος πραγματεύεται κατά κύριο λόγο περιβαλλοντικά προβλήματα που αφορούν την ανίχνευση και χαρτογράφηση ρύπανσης σε εδάφη και υπόγεια νερά.

1.2 Αποτελεσματικότητα γεωφυσικών μεθόδων στον περιβαλλοντικό τομέα

Οι ρυπογόνες ουσίες του υπεδάφους συνήθως κατεισδύουν μέσω των γεωλογικών στρωμάτων και της επικοινωνίας που αυτά έχουν με το υπόγειο νερό. Από τη στιγμή που θα ξεκινήσει η αποκατάσταση του εδάφους και αρχίσει σταδιακά η απορρύπανση από την περιοχή μελέτης, ο βαθμός και η αποτελεσματικότητα του καθαρισμού πρέπει να ελέγχονται σε τακτά διαστήματα. Οι γεωφυσικές τεχνικές επιτρέπουν την παρακολούθηση των συνθηκών του υπεδάφους, προκειμένου να διαπιστώσουν την περαιτέρω ρύπανση. Με τις πληροφορίες παράλληλα που προσδίδουν, μειώνουν αισθητά το κόστος των γεωτρήσεων, καθώς με τη διεξαγωγή τους στο αρχικό στάδιο της μελέτης διαφωτίζουν τόσο την κατάσταση της υπεδάφειας ρύπανσης, όσο και το χαρακτήρα στρωμάτωσης του υπεδάφους.

Περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως ο εντοπισμός διαρροών καυσίμου από υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης, η ανίχνευση και οριοθέτηση εγκαταλελειμμένων χωματερών, η εύρεση θαμμένων απορριμμάτων, η μελέτη και κατανομή ρύπανσης (*contaminant plumes*) στο υπόγειο νερό, η χαρτογράφηση ρυπογόνων περιοχών και η παρακολούθηση μέτρων «θεραπείας» για την αποκατάσταση του προβλήματος, αντιμετωπίζονται πλέον με μεγαλύτερη ευκολία, μειωμένο κόστος και ασφαλή αποτελέσματα με τη βοήθεια της εφαρμοσμένης γεωφυσικής.

1.3 Εφαρμοσμένη γεωφυσική στη μελέτη της ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών

Οι γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόζονται στην ανίχνευση της υπεδάφειας ρύπανσης και τον έλεγχο της ποιότητας των υπογείων υδάτων ποικίλουν. Η επιλογή τους εξαρτάται κάθε φορά από τον επιθυμητό στόχο και τη φύση του προβλήματος που μελετάται.

Ειδικότερα, οι μέθοδοι της ηλεκτρικής αντίστασης και του υπεδάφειου ραντάρ είναι σε θέση να ανιχνεύσουν άμεσα την παρουσία ρύπανσης στο υπέδαφος, μετρώντας τη μεταβολή στην αγωγιμότητα του εδάφους, η οποία προκαλείται από τους ρυπογόνους παράγοντες. Αντίθετα, άλλες γεωφυσικές τεχνικές, όπως η σεισμική ανάκλαση και διάθλαση, η μαγνητομετρία και οι ακτίνες-γ, δεν είναι κατάλληλα εργαλεία για την “άμεση” ανίχνευση της ρύπανσης. Εντούτοις, προσδίδουν πληροφορίες στην αναγνώριση των λιθολογικών χαρακτηριστικών και συνθηκών του υπεδάφους, οι οποίες με τη σειρά τους συμβάλλουν στη εξάπλωση της ρύπανσης.

Στις περιπτώσεις αυτές, η γεωφυσική χρησιμοποιείται ως εργαλείο “έμμεσης” ανίχνευσης υπεδάφειας ρύπανσης. Ενδεικτικά αναφέρονται αρκετές περιπτώσεις στις οποίες η ρύπανση υπογείου νερού είτε ανιχνεύεται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις, ώστε να μη μπορεί να επηρεάσει την ηλεκτρική αντίσταση ή αγωγιμότητα του νερού, είτε δεν επηρεάζει αισθητά καμία από τις φυσικές ιδιότητες του υγιούς πετρώματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η οργανική ρύπανση υπό μορφή διαλυμένης φάσης (π.χ. υγρό πετρέλαιο, βενζίνη, τετραχλωράνθρακας). Σε αυτές τις περιπτώσεις η γεωφυσική χρησιμοποιείται κυρίως για τον προσδιορισμό των υδρογεωλογικών παραμέτρων του υπεδάφους. Η συγκεκριμένη εφαρμογή επιτυγχάνει τη σκιαγράφηση της ρύπανσης υπογείου νερού με έναν πιο έμμεσο τρόπο ή τουλάχιστον εξασφαλίζει καλύτερη καθοδήγηση ως προς τη τοποθεσία εγκατάστασης των γεωτρήσεων παρακολούθησης.

1.4 Συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ

Το υπεδάφειο ραντάρ κατατάσσεται στις σύγχρονες μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης. Αποτελεί μία από τις πλέον εύχρηστες, χαμηλού κόστους και υψηλής αποτελεσματικότητας τεχνικές συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων.

Η υψηλή διακριτική ικανότητα και ακρίβεια με την οποία περιγράφει την κατανομή των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων στο υπέδαφος, προσφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα στην προσπάθεια για αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προβλημάτων. Ο καθορισμός του πάχους γεωλογικών στρωμάτων και του βάθους υδροφόρων οριζόντων, η ανίχνευση και οριοθέτηση ρύπανσης σε εδάφη και υπόγεια νερά, η χαρτογράφηση της κατανομής των πλουμίων ρυπογόνων ουσιών σε υπεδάφειες περιοχές, αποτελούν βασικά αντικείμενα ενασχόλησης της τεχνικής του υπεδάφειου ραντάρ στον περιβαλλοντικό τομέα.

Θα πρέπει, τέλος, να τονισθεί ότι η αποτελεσματικότητα εφαρμογής της μεθόδου του γεωραντάρ εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την αποτελεσματικότητα της τεχνικής επεξεργασίας του σήματος καταγραφής. Συνεπώς, με τη ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη της ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, καθίσταται χρήσιμο εργαλείο συλλογής και ερμηνείας δεδομένων, διαρκώς εξελισσόμενο και με συνεχώς αυξανόμενο πλήθος εφαρμογών και δυνατοτήτων.

1.5 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενα που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία είναι:

- ⇒ Η παρουσίαση αποτελεσμάτων γεωφυσικών μελετών που σχετίζονται με τον εντοπισμό και την οριοθέτηση της ρύπανσης των εδαφών και υπογείων νερών.
- ⇒ Η εφαρμογή τεχνικών μαθηματικής επεξεργασίας στις αρχικές καταγραφές του υπεδάφειου ραντάρ από διασκόπηση σε περιοχή ρύπανσης στο ‘*Monfalcone*’ της βόρειας Ιταλίας.

Επιδιώκονται:

- Η περιγραφή της μετανάστευσης των οργανικών ρύπων ‘*NAPL*’ μέσα στο υπέδαφος.
- Η κατανόηση και ανάδειξη της εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων πάνω σε περιβαλλοντικά προβλήματα.
- Η βελτίωση της απεικόνισης των αρχικών καταγραφών του γεωραντάρ.
- Η ερμηνεία των καταγραφών για την οριοθέτηση περιοχών ισχυρών ανακλάσεων.
- Ο προσδιορισμός των γεωλογικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους, όπως στρωμάτωση και βάθος υδροφόρου ορίζοντα.
- Η ανάδειξη επιμέρους ανωμαλιών και η συσχέτισή τους με πιθανούς ρυπογόνους παράγοντες.
- Η συσχέτιση των συμπερασμάτων που απορρέουν από την παρούσα γεωφυσική έρευνα με στοιχεία που προκύπτουν από άλλες έρευνες και πραγματοποιήθηκαν στον ίδιο χώρο μελέτης.
- Ερμηνεία των αποτελεσμάτων και αξιολόγηση της μεθόδου του υπεδάφειου ραντάρ στην ανάδειξη περιβαλλοντικών προβλημάτων.

1.6 Δομή διπλωματικής εργασίας

Κεφάλαιο 1: Το πρώτο κεφάλαιο πραγματεύεται την αποτελεσματικότητα των γεωφυσικών μεθόδων στον περιβαλλοντικό τομέα. Αναφέρεται η συνεισφορά παραδοσιακών γεωφυσικών τεχνικών στη χαρτογράφηση γεωλογικών στρωμάτων και στην ανίχνευση ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 2: Αναφέρονται στοιχεία για την οργανική ρύπανση του υπεδάφους και περιγράφονται συνοπτικά οι γεωφυσικές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανίχνευση περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Κεφάλαιο 3: Παρατίθενται τα αποτελέσματα γεωφυσικών μελετών που έχουν παρουσιαστεί σε συνέδρια και επιστημονικά περιοδικά και σχετίζονται με προβλήματα υπόγειας ρύπανσης. Ανάλογα με τη γεωφυσική τεχνική που εφαρμόζεται και το σκοπό της εκάστοτε έρευνας, τα άρθρα ταξινομούνται σε κατηγορίες.

Κεφάλαιο 4: Περιγράφονται η αρχή λειτουργίας του υπεδάφειου ραντάρ, οι κυριότερες εφαρμογές της μεθόδου και οι παράμετροι που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό μίας διασκόπησης.

Κεφάλαιο 5: Αναλύονται οι τεχνικές μαθηματικής επεξεργασίας που εφαρμόζονται στις καταγραφές γεωραντάρ (φίλτρα, τύποι ενίσχυσης, στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά). Περιγράφεται η συμβολή τους στη βελτίωση της ποιότητας απεικόνισης των δεδομένων.

Κεφάλαιο 6: Παρατίθενται στοιχεία για το χώρο ρύπανσης στην περιοχή ‘*Monfalcone*’ της βόρειας Ιταλίας. Περιγράφεται η γεωφυσική διασκόπηση που διεξήχθη με τη μέθοδο του υπεδάφειου ραντάρ, καθώς και ο τρόπος συλλογής των δεδομένων στην εν λόγω περιοχή μελέτης. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από εφαρμογή τεχνικών μαθηματικής επεξεργασίας στις μετρήσεις γεωραντάρ, αξιολογούνται και χρησιμοποιούνται για περαιτέρω ερμηνεία και συσχέτιση με αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών.

Κεφάλαιο 7: Το τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που απορρέουν για τη συμβολή της τεχνικής του υπεδάφειου ραντάρ στην ανάδειξη περιβαλλοντικών προβλημάτων εδαφών και υπογείων νερών, αλλά και από την εφαρμογή της μεθόδου σε χώρο ρύπανσης στην Ιταλία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ

2.1 Οργανικοί ρύποι στο νερό

Το νερό που βρίσκεται στο υπέδαφος αποτελεί μία πολύτιμη φυσική πηγή πλούτου. Ο έλεγχος τόσο της ποιότητας, όσο και της ποσότητάς του μέσα στους υπόγειους ταμιευτήρες είναι πολύ σημαντικός.

Η λειτουργία βαριάς βιομηχανίας, στρατιωτικών βάσεων και διυλιστηρίων πετρελαίου συχνά οδηγεί σε απορρίψεις αποβλήτων και συσσώρευση υδρογονανθράκων στο υπέδαφος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη ρύπανση υπεδάφειων περιοχών, καθώς και την «υποβάθμιση» της αξίας του υπογείου νερού. Για το λόγο αυτό, καθίσταται ζωτικής σημασίας η συνέχεια της θεμελιώδους έρευνας των υπογείων υδάτων και του ρόλου τους στις γεωλογικές διαδικασίες (Meju, 2000).

Αποτελέσματα ερευνών αναφέρουν ότι οι κύριοι τύποι ρύπανσης του υπεδάφους είναι οι ακόλουθοι (Bedient et al., 1994):

- *LNAPL* (Light Non-Aqueous Phase Liquids), δηλαδή οργανικοί ρύποι με πυκνότητα μικρότερη από αυτή του νερού, όπως είναι η βενζίνη που βασίζεται σε βενζόλιο, τολουόλιο ή ξυλόλιο.
- *DNAPL* (Dense Non-Aqueous Phase Liquids), δηλαδή οργανικοί ρύποι με πυκνότητα μεγαλύτερη από αυτή του νερού, όπως το τριχλωροαιθυλένιο ή τα βαριά πετρώλαια.
- Άλλοι ανόργανοι ρύποι, όπως λευκόχρυσος ή νικέλιο προστιθέμενο στη βενζίνη.

Αν και αυτό το απλό σύστημα ταξινόμησης βασίζεται αποκλειστικά στην πυκνότητα του ρυπαντή, αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο όσον αφορά την εκτίμηση της μετανάστευσης των υδρογονανθράκων (βλ. Παράρτημα Α).

2.2 Γεωφυσική και περιβάλλον

Ατυχήματα ή ανεξέλεγκτη απόρριψη των αποβλήτων μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές συγκεντρώσεις ρύπανσης στο υπέδαφος. Το γεγονός αυτό θέτει μία αυστηρή απειλή για τους υπόγειους υδροφορείς. Η ρύπανση *LNAPL* και *DNAPL* εμφανίζεται στο υπέδαφος ως καθαρά υγρή οργανική φάση (*pure-phase organic liquid*), ως φάση ατμών (*vapor phase*) στην ακόρεστη ζώνη (*vadose zone*), καθώς και σε μικρές συγκεντρώσεις υπό μορφή διαλυμένης φάσης (*dissolved phase*) (Meju, 2000). Η παρουσία διαλυμένων οργανικών φάσεων στο πόσιμο νερό, ακόμα και σε πολύ χαμηλά επίπεδα (ppb), είναι εξαιρετικά επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι έχουν καθιερωθεί πλέον τόσο στην έρευνα και τον έλεγχο ποιότητας του υπογείου νερού, όσο και σε εφαρμογές στην εφαρμοσμένη μηχανική και τη μεταλλεία. Η περιβαλλοντική γεωφυσική εμφανίζει τεράστια δυνατότητα στη γρήγορη, μη-καταστρεπτική αξιολόγηση των πλευρικών και κάθετων ορίων μίας ρυπογόνου περιοχής, καθώς επίσης και στη χαρτογράφηση της γεωλογικής δομής του υπεδάφους.

Καινούργια επιτεύγματα στην ψηφιακή τεχνολογία και τη μαθηματική μοντελοποίηση έχουν οδηγήσει σε βελτιωμένες τεχνικές απόκτησης δεδομένων και στην άριστη ερμηνεία τους. Συγκεκριμένα, καινούργιες εφαρμοζόμενες τεχνικές στις μεθόδους του υπεδάφειου ραντάρ, της ρηχής σεισμικής ανάκλασης, της επαγόμενης πολικότητας, της ηλεκτρικής αντίστασης και των παροδικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων κατάφεραν να ενισχύσουν τη διακριτική τους ικανότητα στην ανίχνευση υπόγειων στόχων βελτιώνοντας, έτσι, θεαματικά τα αποτελέσματα (Meju, 2000).

Εντούτοις, παρά το μεγάλο αριθμό προσφάτων δημοσιεύσεων και παρουσιάσεων σε συνέδρια και επιστημονικά περιοδικά, είναι δύσκολο να αποτυπωθούν σαφή μοντέλα τα οποία να περιγράφουν με ακρίβεια τις κατά τόπου διακυμάνσεις των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους. Για μία βελτιωμένη λύση του προβλήματος κρίνεται αναγκαία μία διεπιστημονική έρευνα με γεωφυσικές, υδρογεωλογικές και γεωχημικές μελέτες πάνω σε υπόγειους ταμιευτήρες, οι οποίες θα βοηθήσουν στην βελτίωση των ήδη υπάρχοντων γεωφυσικών μοντέλων.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν να απεικονίσουν ακόμα και τις περιοχές εκείνες οι οποίες είναι απρόσιτες με γεωτρήσεις παρακολούθησης και να προσθέσουν πολύτιμες στρωματογραφικές πληροφορίες πάνω σε οποιοδήποτε γεωλογικό μοντέλο της ρυπογόνου περιοχής. Σε συνδυασμό δε με γεωχημικές μετρήσεις, υπάρχει άριστη δυνατότητα για τη βελτιστοποίηση της θέσης των γεωτρήσεων και των συνθηκών πραγματοποίησής τους. Οι γεωφυσικές μέθοδοι αποτελούν πλέον αυτοτελή τμήματα των προγραμμάτων αποκατάστασης του περιβάλλοντος και πολύτιμα εργαλεία γι' αυτήν.

2.3 Περιγραφή γεωφυσικής τεχνολογίας

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόζονται για την ανίχνευση και οριοθέτηση υπεδάφειων περιοχών ρύπανσης. Αυτές περιλαμβάνουν:

- ✓ Μέθοδος Παροδικών Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων (*Electromagnetometry*)
- ✓ Σεισμική Ανάκλαση (*Seismic Reflection*)
- ✓ Σεισμική Διάθλαση (*Seismic Refraction*)
- ✓ Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (*Electrical Resistivity*)
- ✓ Μαγνητομετρία (*Magnetometry*)
- ✓ Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού (*Self Potential*)
- ✓ Μέθοδος Επαγόμενης Πολικότητας (*Induced Polarization*)
- ✓ Μέθοδος Γωνίας Κλίσης Χαμηλών Συχνοτήτων (*Very Low Frequency*)
- ✓ Υπεδάφειο Ραντάρ (*Ground Penetrating Radar*)

Θα πρέπει να σημειωθεί, βέβαια, ότι σκοπός της παρούσας αναφοράς δεν είναι η εκτενής παρουσίαση των γεωφυσικών μεθόδων, αλλά μία συνοπτική περιγραφή τους προκειμένου ο αναγνώστης να κατανοήσει τις βασικές αρχές λειτουργίας τους. Η τεχνική του Υπεδάφειου Ραντάρ παρουσιάζεται αναλυτικά σε επόμενα κεφάλαια, αφού αποτελεί και τη μέθοδο με την οποία πραγματοποιήθηκε το πειραματικό στάδιο της διπλωματικής αυτής εργασίας (βλ. Κεφάλαιο 4).

2.3.1 Μέθοδος Παροδικών Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων (*electromagnetometry*)

Η μέθοδος Παροδικών Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων βασίζεται στη μέτρηση της απόκρισης ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου το οποίο προκαλείται μέσα στη γη. Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής (κατανομή της ειδικής αγωγιμότητας) στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο χαμηλών συχνοτήτων που παράγεται από έναν πομπό προκαλεί τη ροή ρεύματος μέσα σε ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά του εδάφους. Το παραγόμενο αυτό ρεύμα προκαλεί με τη σειρά του ένα δευτερεύον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο επιστρέφει στην επιφάνεια. Τελικά, ένας δέκτης ανιχνεύει το δευτερεύον πεδίο όταν το πρωτεύον είναι μηδενικό και μετράει τη χρονική μεταβολή της έντασής του (Σπανουδάκης, 2001).

2.3.2 Σεισμική Ανάκλαση (*seismic reflection*)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στους νόμους διάδοσης των ελαστικών κυμάτων, τα οποία παράγονται τεχνητά στην επιφάνεια της γης. Τα κύματα κατά τη διαδρομή τους μέσα στο υπέδαφος ανακλώνται πάνω σε ασυνέχειες που βρίσκονται μέσα στο φλοιό της γης και κυρίως πάνω στα επιφανειακά στρώματά του. Τα απευθείας και τα ανακλώμενα κύματα καταγράφονται από γεώφωνα που τοποθετούνται σε σχετικά μικρές αποστάσεις από το σημείο παραγωγής των ελαστικών κυμάτων. Η μέθοδος της Σεισμικής Ανάκλασης συμβάλλει στη χαρτογράφηση δομών που βρίσκονται σε σημαντικά βάθη, με την ίδια σχεδόν ακρίβεια με την οποία χαρτογραφούνται επιφανειακές δομές (Κρητικάκης, 2001).

2.3.3 Σεισμική Διάθλαση (*seismic refraction*)

Η αρχή της Σεισμικής Διάθλασης βασίζεται στον πειραματικό προσδιορισμό των χρόνων διαδρομής των απευθείας κυμάτων και των κυμάτων διάθλασης. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται καμπύλες που προκύπτουν από τους χρόνους διαδρομής των κυμάτων, προκειμένου να καθοριστούν με θεωρητικές σχέσεις οι ταχύτητές τους στα επιφανειακά στρώματα του υπεδάφους. Η μέθοδος της διάθλασης δεν είναι τόσο ακριβής όσο αυτή της ανάκλασης και παρουσιάζει μεγαλύτερες δυσκολίες κατά την ερμηνεία των μετρήσεων. Παρόλα αυτά, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη γιατί μπορεί να

προσφέρει σημαντικές πληροφορίες σε περιοχές μορφολογικών ανωμαλιών, όπου δεν εφαρμόζονται εύκολα άλλες μέθοδοι (Κρητικάκης, 2001).

2.3.4 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (*electrical resistivity*)

Η μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης είναι η πιο διαδεδομένη από τις ηλεκτρικές μεθόδους. Το μέγεθος που μελετάται είναι η ηλεκτρική τάση, από την οποία επιδιώκεται ο καθορισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η κατανομή των τιμών της μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης (γεωηλεκτρική δομή). Η ανάλυση αυτή επιτυγχάνεται με τη δημιουργία τεχνητών ηλεκτρικών πεδίων. Το ρεύμα διεισδύει μέσα στο υπέδαφος μέσω ηλεκτροδίων και στη συνέχεια μετράται η διαφορά δυναμικού μεταξύ αυτών. Το ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζεται από τη δομή του υπεδάφους και επομένως από τις μετρήσεις του δυναμικού είναι δυνατός ο καθορισμός της δομής. Οι πιο συνηθισμένες διατάξεις ηλεκτροδίων που εφαρμόζονται είναι αυτές των ‘διπόλου-διπόλου’, ‘Schlumberger’ και ‘Wenner’ (Hamdan, 2002).

2.3.5 Μαγνητομετρία (*magnetometry*)

Η Μαγνητομετρία βασίζεται στη μέτρηση μεταβολών του μαγνητικού πεδίου της γης, οι οποίες οφείλονται στην παρουσία μαγνητικών σωμάτων στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της. Οι μεταβολές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον σχετίζονται με μαγνητικές ανωμαλίες μικρής κλίμακας στην επιφάνεια της γης (τοπικές μεταβολές της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου). Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής μπορεί να μειωθεί από παρεμβολές (θόρυβος), οι οποίες οφείλονται σε διακυμάνσεις που προκαλούνται από κτίρια, σιδερένιες κατασκευές, οχήματα κτλ (Σπανουδάκης, 2001).

2.3.6 Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού (*self potential*)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε μετρήσεις του δυναμικού, το οποίο προέρχεται από φυσικά ηλεκτρικά ρεύματα τοπικού χαρακτήρα. Τα ρεύματα αυτά είτε έχουν ηλεκτροκινητική προέλευση είτε παράγονται με ηλεκτροχημική δράση. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων της τάσης χρησιμοποιούνται κατάλληλα βολτόμετρα ή γαλβανόμετρα.

Οι μετρήσεις της τάσης πραγματοποιούνται με δύο βασικούς τρόπους. Σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο, η τάση υπολογίζεται σε διάφορα μέρη οριζόντιας γραμμής η οποία διασχίζει την περιοχή μελέτης. Οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων διατηρούνται σταθερές και στο τέλος υπολογίζεται η βαθμίδα του δυναμικού. Κατά το δεύτερο τρόπο, το ένα ηλεκτρόδιο παραμένει σε σταθερή θέση, ενώ με το άλλο εντοπίζονται σημεία που εμφανίζουν το ίδιο δυναμικό με αυτό του ακίνητου ηλεκτροδίου (Παπαζάχος, 1986).

2.3.7 Μέθοδος Επαγόμενης Πολικότητας (induced polarization)

Όταν το συνεχές ρεύμα που διαβιβάζεται στη γη μέσω δύο ηλεκτροδίων διακοπεί απότομα, η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων δε μηδενίζεται αμέσως. Αντίθετα, αρχίζει να ελαττώνεται εκθετικά με το χρόνο και περνούν αρκετά δευτερόλεπτα έως ότου αυτή μηδενιστεί. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ικανότητα του υπεδάφους να λειτουργεί ως πυκνωτής και να συσσωρεύει ηλεκτρικά φορτία. Η επαγόμενη πολικότητα οφείλεται σε ηλεκτροχημικές αντιδράσεις και μπορεί να δημιουργηθεί από κόκκους μεταλλικών ορυκτών που βρίσκονται σε πορώδη πετρώματα ή από την τάση που αναπτύσσεται ανάμεσα στις επιφάνειες επαφής ορισμένων πετρωμάτων με ηλεκτρολύτες. Με τις μετρήσεις επαγόμενης πολικότητας δύο είναι οι ποσότητες που υπολογίζονται: η φορτιστικότητα και η πολικότητα (Παπαζάχος, 1986).

2.3.8 Μέθοδος Γωνίας Κλίσης Χαμηλών Συχνοτήτων (very low frequency)

Οργανισμοί επικοινωνιών και ναυσιπλοΐας χρησιμοποιούν ισχυρούς πομπούς, οι οποίοι εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην περιοχή των 15-25KHz, δηλαδή στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων. Σε μεγάλες αποστάσεις από το δέκτη το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι οριζόντιο, ενώ η ένταση του μαγνητικού πεδίου βρίσκεται στο επίπεδο αυτό και είναι κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Παράλληλα, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι κατακόρυφη. Ο δέκτης VLF είναι ένα εύχρηστο όργανο μικρών διαστάσεων. Αποτελείται από δύο πηνία κάθετα μεταξύ τους, τα οποία συντονίζονται στις συχνότητες των πομπών και υπολογίζουν τη γωνία που σχηματίζει ο μέγιστος άξονας της έλλειψης πόλωσης με τη συνιστώσα του πρωτεύοντος μαγνητικού πεδίου H_p (Παπαζάχος, 1986).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Συνολικά οι γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ρύπανσης (πετρέλαιο, αστικά και βιομηχανικά απόβλητα, μεταλλικά συντρίμια, χώροι υγειονομικής ταφής κ.α), εφαρμόζονται με μεγάλη επιτυχία και είναι σε θέση να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες. Παράλληλα, πρόσφατες δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια, που πραγματοποιήθηκαν την τελευταία δεκαετία πάνω σε μελέτες Περιβαλλοντικής Γεωφυσικής, παρουσιάζουν βελτιωμένες τεχνικές απόκτησης και επεξεργασίας δεδομένων, που οδηγούν στην άριστη ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

3.1.1 Δημοσιεύσεις μελετών περιβαλλοντικής γεωφυσικής

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται περιλήψεις δημοσιεύσεων (1990-2002) πάνω σε μελέτες που αφορούν εφαρμογές της γεωφυσικής τεχνολογίας για την ανίχνευση, χαρτογράφηση και οριοθέτηση περιοχών διαφορετικών τύπων ρύπανσης στο υπέδαφος. Προκειμένου να διευκολυνθεί ο αναγνώστης, ώστε να γίνει κατανοητή η εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων, οι δημοσιεύσεις παρατίθενται σε ενότητες βάσει ομαδοποίησης που πραγματοποιείται ως προς το αντικείμενο της μελέτης και την εκάστοτε μεθοδολογία εφαρμογής της γεωφυσικής τεχνικής:

- i) Ηλεκτρικές - Ηλεκτρομαγνητικές γεωφυσικές διασκοπήσεις και τεχνική του Υπεδάφειου Ραντάρ σε «επικίνδυνες» περιοχές ρύπανσης και απόρριψης αποβλήτων.*

- ii) Ανίχνευση και οριοθέτηση ηλεκτρικά αγώγιμων περιοχών του υπεδάφους συσχετιζόμενες με την παρουσία παραγόντων ρύπανσης.
- iii) Ελεγχόμενες πειραματικές μελέτες και συνεισφορά τους στην περιγραφή μετανάστευσης ρύπων NAPL (βλ. Παράρτημα Α).
- iv) Άλλες γεωφυσικές τεχνικές.

Στον πίνακα 3.1 συνοψίζονται οι δημοσιεύσεις που αφορούν την Περιβαλλοντική Γεωφυσική, ανάλογα με το αντικείμενο της μελέτης και την εκάστοτε μεθοδολογία εφαρμογής της γεωφυσικής τεχνικής.

Κατηγορία μελέτης περιβαλλοντικής γεωφυσικής	Τοποθεσία διεξαγωγής έρευνας	Είδος ρύπανσης υπό εξέταση και βασικός σκοπός διασκόπησης	Γεωφυσική τεχνική που εφαρμόζεται
Ηλεκτρικές - Ηλεκτρομαγνητικές γεωφυσικές διασκοπήσεις και τεχνική του Υπεδάφειου Ραντάρ σε «επικίνδυνες» περιοχές ρύπανσης και απόρριψης αποβλήτων	Αεροπορική βάση Ogden, Utah, Η.Π.Α. Απόρριψη αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής.	Τριχλωροαιθυλένιο / υγρά απόβλητα πετρελαίου. Καθορισμός ορίων περιοχής ρύπανσης.	Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση Φυσικού Δυναμικού Μαγνητικές Διασκοπήσεις
	Bahia, Βραζιλία. Ρύπανση υδροφόρου ορίζοντα.	Ακατέργαστα υλικά / υγρά απόβλητα από πετροχημικό συγκρότημα. Ανίχνευση ρύπανσης σε υδροφόρο ορίζοντα.	Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση
	Ponte Malnome / Regione Lazio, Ρώμη, Ιταλία. Εγκαταλελειμμένα μεταλλεία ως χώροι αποθήκευσης απορριμμάτων.	Οικιακά / βιομηχανικά απορρίμματα, χαλάσματα κτιρίων. Καθορισμός ορίων και είδους ρύπανσης.	Υπεδάφειο Ραντάρ Ηλεκτρικές Βυθοσκοπήσεις Ηλεκτρική Τομογραφία Σεισμική Ανάκλαση
	Pau, Γαλλία. (αναφέρεται στο νόμο Archie).	Ποσοτικός προσδιορισμός εδαφικής υγρασίας και πορώδους.	Υπεδάφειο Ραντάρ Σεισμική Ανάκλαση Σεισμική Διάθλαση Ηλεκτρικές Μέθοδοι
	Ορυχείο Ranger, Αυστραλία. Περιβαλλοντικά προβλήματα κατά τη λειτουργία του ορυχείου.	Ανίχνευση διαρροής σε χώρους αποθήκευσης νερού, το οποίο προέρχεται από εργοστάσιο επεξεργασίας ουρανίου.	Ηλεκτρική Ειδική Αντίσταση Ηλεκτρομαγνητικές Διασκοπήσεις Φυσικού Δυναμικού Επαγόμενης Πολικότητας

Ανίχνευση και οριοθέτηση ηλεκτρικά αγώγιμων περιοχών του υπεδάφους συσχετιζόμενες με την παρουσία παραγόντων ρύπανσης	Carson City, Michigan, Η.Π.Α. Ρύπανση ποταμού.	Διέλευση υδρογονανθράκων από εγκαταστάσεις καθαρισμού. Κατανομή ρύπανσης / εντοπισμός περιοχής υψηλής αγωγιμότητας επάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα.	Υπεδάφειο Ραντάρ Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση Ηλεκτρικές Βυθοσκοπήσεις Ηλεκτρομαγνητικές Διασκοπήσεις
	Αεροπορική βάση Wurtsmith, Michigan, Η.Π.Α. Μακροχρόνια ρύπανση.	Αυξημένα ποσά βενζολίου / τολουολίου. Αξιολόγηση της αιτίας εξασθένησης σημάτων του υπεδάφειου ραντάρ.	Υπεδάφειο Ραντάρ Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση Ηλεκτρικές Βυθοσκοπήσεις Φυσικού Δυναμικού
Ελεγχόμενες πειραματικές μελέτες και συνεισφορά τους στην περιγραφή μετανάστευσης ρύπων NAPL	Βάση ενόπλων δυνάμεων, Toronto, Καναδάς.	Ελεγχόμενη έγχυση τετραχλωροαιθυλενίου. Ανίχνευση και περιγραφή μετανάστευσης ρύπων DNAPL.	Υπεδάφειο Ραντάρ Ηλεκτρική Ειδική Αντίσταση Τεχνική Ανάκλασης Διαγραφίες Νετρονίου Διαγραφίες Πυκνότητας
	Πανεπιστήμιο Ohio / εργοστάσιο αποθήκευσης βενζίνης, Indiana, Η.Π.Α.	Πλαστικά δοχεία με κηροζίνη / διαρροή βενζίνης. Χρήση του υπεδάφειου ραντάρ για ανίχνευση ρύπανσης LNAPL.	Υπεδάφειο Ραντάρ
	Διαρροή από πρατήρια βενζίνης σε Cleveland, Ohio, Indiana (Η.Π.Α).	Ρύπανση από υδρογονάνθρακες. Ικανότητα γεωραντάρ στην ανίχνευση ρύπανσης με τη μορφή ελεύθερης φάσης (<i>free phase</i>) και φάσης ατμού (<i>vapor phase</i>).	Υπεδάφειο Ραντάρ
	Βόρεια Ιταλία. Διαρροή σε αγωγό πετρελαίου.	Ρύπανση από βενζίνη / πετρέλαιο. Συνεισφορά μεθόδου του γεωραντάρ στην ανίχνευση ρύπανσης LNAPL.	Υπεδάφειο Ραντάρ

Άλλες γεωφυσικές τεχνικές	Αλπικό συγκρότημα Ελβετίας. Αποκατάσταση χώρων υγειονομικής ταφής.	Βιομηχανικά απορρίμματα / απόβλητα πετρελαίου. Προσδιορισμός βάθους και γεωμετρίας σε δύο χώρους υγειονομικής ταφής.	Τομογραφία Διάθλασης Υπεδάφειο Ραντάρ Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή
	Caprarola / Pisana, Ιταλία. Χώροι απόρριψης αστικών αποβλήτων.	Απόρριψη αστικών απόβλητων σε διαφορετικούς γεωλογικούς σηματισμούς. Καθορισμός γεωμετρικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν χώρους υγειονομικής ταφής.	Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση Σεισμική Διάθλαση
	Utah, Η.Π.Α. Διαρροή από υπόγεια δεξαμενή βενζίνης.	Ρύπανση από βενζίνη. Χαρτογράφηση περιοχής ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών.	Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση Μετρήσεις Γωνίας Κλίσης Ηλεκτρομαγνητικές Διασκοπήσεις
	Oak Ridge Reservation, Tennessee, Η.Π.Α.	Πυρηνικά υλικά / μεταλλικά συντρίμια. Χαρακτηρισμός των γεωλογικών και υδρογεωλογικών παραμέτρων σε περιοχές απόρριψης αποβλήτων.	Αερομαγνητικές Μετρήσεις Ραδιομετρήσεις Ηλεκτρομαγνητικές Διασκοπήσεις

Πίνακας 3.1: Σύνοψη μελετών περιβαλλοντικής γεωφυσικής.

3.2 Ηλεκτρικές - Ηλεκτρομαγνητικές γεωφυσικές διασκοπήσεις και τεχνική του Υπεδάφειου Ραντάρ σε «επικίνδυνες» περιοχές ρύπανσης και απόρριψης αποβλήτων

Στην ενότητα αυτή, οι γεωφυσικές μέθοδοι που εφαρμόζονται για την ανίχνευση και οριοθέτηση περιοχών ρύπανσης, είναι αυτές των υπεδάφειου ραντάρ, παροδικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Όπως αναφέρουν χαρακτηριστικά οι De Lima et al. σε αντίστοιχη δημοσίευση τους, η μεθοδολογία μελέτης που χρησιμοποιείται σε πολλές περιπτώσεις συνδυάζει ηλεκτρικές μετρήσεις με πολλαπλή χαρτογράφηση σε διάφορες αποστάσεις ηλεκτροδίων. Στη συνέχεια «πλήρεις» και «μερικές» μετρήσεις «αντιστρέφονται» και συσχετίζονται με τη βοήθεια υποθετικών οριζόντιων μοντέλων ειδικής αντίστασης. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως αυτές που περιγράφονται από τους Ross και Buselli, εφαρμόζονται διασκόπηση ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με διάταξη διπόλου-διπόλου και ηλεκτρομαγνητική διασκόπηση, προκειμένου να προσδιοριστούν με σαφήνεια οι ηλεκτρικές ιδιότητες του υπεδάφους.

Όσον αφορά την τεχνική του υπεδάφειου ραντάρ, μελέτη των Garambois et al. τονίζει τη συνεισφορά του ακόμα και στον προσδιορισμό της εδαφικής υγρασίας. Αντίστοιχα, δημοσίευση των Orlando et al. αναφέρει το ρόλο του τόσο στον καθορισμό των ορίων ρυπογόνου περιοχής, όσο και στον προσδιορισμό του είδους της ρύπανσης. Χρησιμοποιώντας μάλιστα διαφορετικές συχνότητες στις κεραίες του γεωραντάρ, προκύπτουν πληροφορίες σχετικά με τη διεισδυτική του ικανότητα σε διάφορα βάθη.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο συνδυασμός και των τριών γεωφυσικών τεχνικών προσφέρει σημαντικές πληροφορίες για την οριοθέτηση περιοχής ρύπανσης.

3.2.1 Ηλεκτρικές έρευνες Ειδικής Αντίστασης διπόλου-διπόλου σε περιοχές απόρριψης αποβλήτων στη βόρεια Utah, Η.Π.Α. (Ross et al., 1990)

Στην ευρύτερη περιοχή της Utah η βιομηχανική και στρατιωτική ανάπτυξη έχει οδηγήσει σε απόρριψη αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής (μεγάλες ποσότητες τριχλωροαιθυλενίου και υγρών αποβλήτων πετρελαίου). Η απόρριψη αυτή έχει προκαλέσει τη μετανάστευση παραγόντων ρύπανσης, με αποτέλεσμα να δημιουργείται πρόβλημα στα νερά επιφανείας που χρησιμοποιούνται για άρδευση. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν έρευνες σε πέντε περιοχές απόρριψης αποβλήτων σε αεροπορική

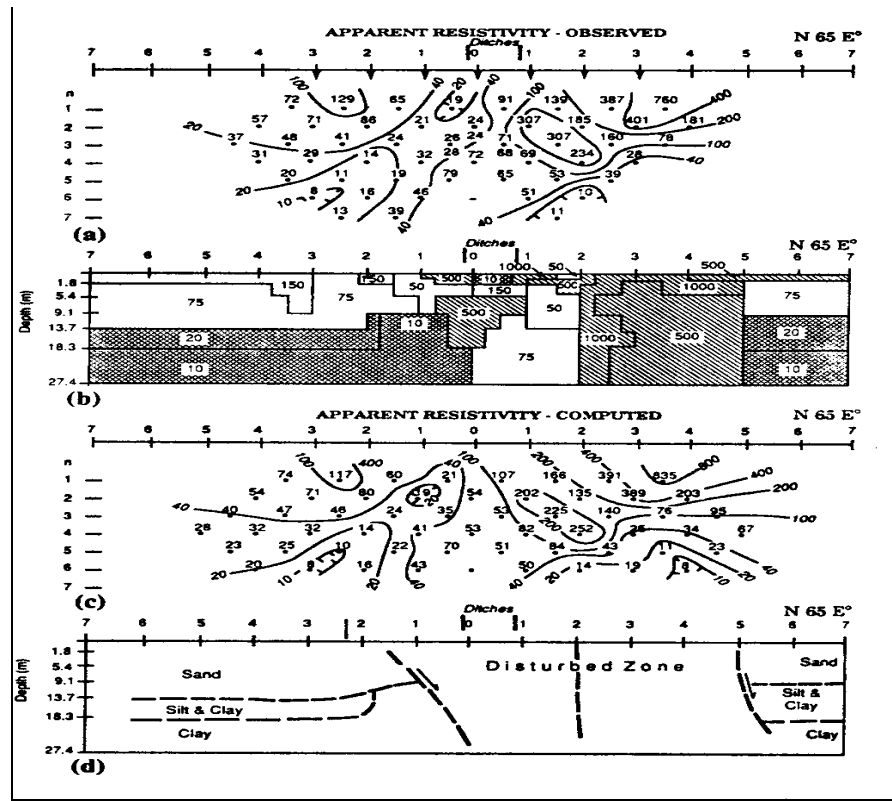
βάση κοντά στο Ogden, αποσκοπώντας στον εντοπισμό πλουμίων παραγόντων ρύπανσης και στον καθορισμό της πλευρικής έκτασης και του πάχους των φακών αργίλου, που συνιστούν τη γεωλογία της περιοχής (αλλούβιες αποθέσεις αποτελούμενες από αργίλους, αμμοχάλικα και άμμους).

Η μεθοδολογία της μελέτης περιελάμβανε τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών δομών του εδάφους από χάρτες και επιθεώρηση πεδίων, κατόπιν οριοθέτηση των γραμμών έρευνας για αποφυγή όσο το δυνατόν περισσότερου θορύβου από τις δομές αυτές και τελικά απόκτηση στοιχείων με ηλεκτρική διασκόπηση διάταξης διπόλου-διπόλου για περαιτέρω επεξεργασία. Γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή βοήθησαν στο χαρακτηρισμό του γεωλογικού υποβάθρου, ενώ παράλληλα άλλες γεωφυσικές μέθοδοι (μαγνητικές, φυσικού δυναμικού) χρησιμοποιήθηκαν για να καθοριστούν τα όρια απόρριψης αποβλήτων.

Κατά την έρευνα χρησιμοποιήθηκε το σύστημα ειδικής αντίστασης Bison Instruments 2390 με διάταξη διπόλου-διπόλου, με διάστημα μεταξύ των διπόλων 9,1m. Όταν το σύστημα αυτό δεν ήταν διαθέσιμο χρησιμοποιήθηκε ως δέκτης ένα ψηφιακό πολύμετρο Fluke 8050 Digital Multimeter σε συνδυασμό με πρότυπη συσκευή παροχής ηλεκτρικού ρεύματος 15A Elliot των 1500W. Τέλος, υπολογίστηκαν αριθμητικά μοντέλα ειδικών αντιστάσεων (εικόνα 3.1).

Κατάλογος τεχνικών αποτελεσμάτων:

- Στην περιοχή απόρριψης στη λίμνη Berman, οι ειδικές αντιστάσεις εμφανίζουν μέτριες τιμές σε μία περιοχή άμμων με υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης.
- Η έρευνα στη χωματερή 3 αποκάλυψε μία σύνθετη γεωλογία με διαρρήξεις σε στρώματα αργίλου. Οι υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης οφείλονται μερικώς στα υπολείμματα υδρογονανθράκων, τα οποία είναι ορατά στα φρεάτια παρακολούθησης.
- Στην περιοχή Golf Course, οι μετρήσεις επιβεβαιώνουν την παρουσία ενός ηλεκτρικά αγωγίμου στρώματος αργίλου που βυθίζεται προς το βορρά και το οποίο μπορεί να παρέχει μία υδρολογική δίοδο για τη μετανάστευση των παραγόντων ρύπανσης.



Εικόνα 3.1: Δεδομένα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που αποκτήθηκαν εφαρμόζοντας τη διάταξη διπόλου-διπόλου κατά μήκος του χώρου χημικής απόθεσης (χωματερή 3). a) Τιμές ηλεκτρικής αντίστασης, όπως παρατηρήθηκαν στην περιοχή μελέτης. b) Λύση που προκύπτει με εφαρμογή αριθμητικού μοντέλου. c) Τιμές φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μετά από την παραπάνω επεξεργασία. d) Απλοποιημένη γεωλογική ερμηνεία (Ross et al., 1990).

3.2.2 Απεικόνιση βιομηχανικών πλουμίων παραγόντων ρύπανσης με τεχνικές Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (De Lima et al., 1995)

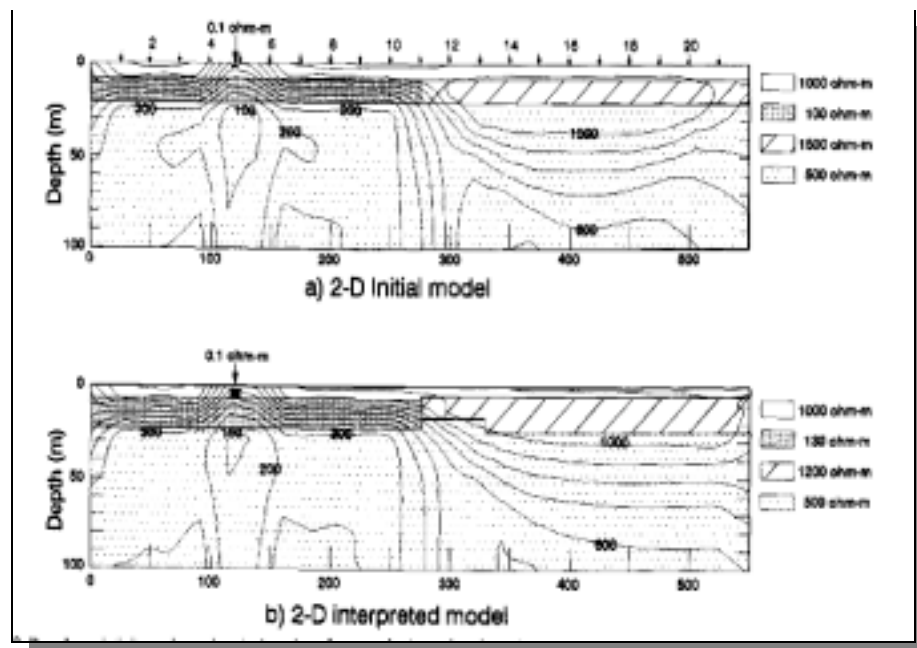
Στην περιοχή Bahia της Βραζιλίας πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές έρευνες για ανίχνευση ρύπανσης σε υδροφόρο ορίζοντα, ο οποίος εφοδιάζει με νερό για εσωτερική αλλά και βιομηχανική χρήση πολλά χωριά και πόλεις της ευρύτερης περιοχής. Η γεωλογία της περιοχής δοκιμών αποτελείται από ιζηματογενή ακολουθία (αλλουβιακές και ποτάμιες αποθέσεις) που επικαλύπτει ένα σχηματισμό ψαμμιτών και σχιστολίθων.

Βασικός στόχος των ερευνών είναι να σκιαγραφηθεί η δομή των γεωλογικών σχηματισμών, να προκύψουν τα πετρολογικά χαρακτηριστικά και η ποιότητα ύδατος των ανωτέρων στρωμάτων του υπεδάφους και τέλος να καταδειχθεί η αποδοτικότητα της τεχνικής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης στη διάκριση είτε αγωγίμων (*conductive*) είτε ανθεκτικών (*resistive*) πλουμίων παραγόντων ρύπανσης.

Ιδιαίτερη σημασία στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων πρέπει να δοθεί στο γεγονός, ότι σε μία βιομηχανική περιοχή υπάρχουν πολλές ανωμαλίες που μπορεί να οφείλονται σε τάφρους και θαμμένους σωλήνες. Παράλληλα, η ρύπανση μπορεί να προέρχεται από τα ακατέργαστα υλικά, τα ενδιάμεσα προϊόντα και τα υπόλοιπα υγρά απόβλητα πετροχημικού συγκροτήματος. Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής πρέπει να είναι γνωστές για να αποτρέπονται οι ανεπανόρθωτες ζημιές στον ανεφοδιασμό του ύδατος.

Η μεθοδολογία μελέτης που χρησιμοποιείται συνδυάζει ηλεκτρικές μετρήσεις με πολλαπλή χαρτογράφηση σε διάφορες αποστάσεις ηλεκτροδίων. Μετρήσεις «αντιστρέφονται» και συσχετίζονται με τη βοήθεια υποθετικών οριζόντιων μοντέλων ειδικής αντίστασης (εικόνα 3.2).

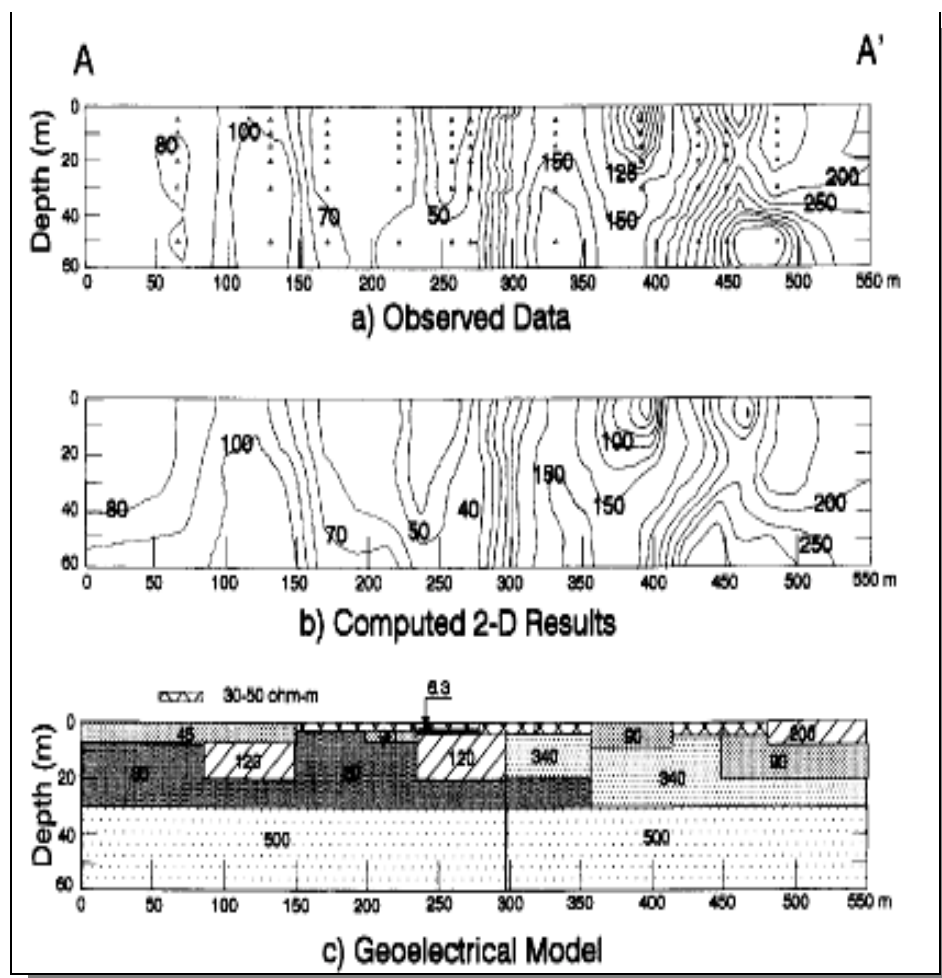
Συγκεκριμένα, έγιναν 45 ηλεκτρικές μετρήσεις με τη διάταξη Schlumberger χρησιμοποιώντας απόσταση ηλεκτροδίων μέχρι 300m, ενώ παρήχθησαν 15 πολλαπλά προφίλ ειδικής αντίστασης από 170 μετρήσεις (*partial soundings*) σε έξι επίπεδα βαθών, που αντιστοιχούν σε διαστήματα “ $AB/2$ ”: 5 έως 50m. Ηλεκτρικές διαγραφίες έγιναν σε 12 γεωτρήσεις νερού. Ένα σύστημα ABEM Terrameter χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ειδικής αντίστασης, ενώ παράλληλα πρόγραμμα λογισμικού αναπτύχθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων (εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.2: Ψευδοτομές (*pseudosections*) φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης για σύνθετο μοντέλο ρύπανσης υδροφόρου ορίζοντα. Τα βέλη στην κορυφή της τομής (a) απεικονίζουν την τοποθεσία των γεωφώνων (De Lima et al., 1995).

Κατάλογος τεχνικών αποτελεσμάτων:

Μερικές αγώγιμες ανωμαλίες, οι οποίες δεν μπορούν να εξηγηθούν από τις αλλαγές στο γεωλογικό σχηματισμό, προσδιορίζονται μέσα στο ανώτερο υδροφόρο στρώμα. Οι ανωμαλίες αυτές προκύπτουν από αύξηση στην αλατότητα των υπογείων νερών, που συνδέεται με τα θερμά και όξινα ύδατα τα οποία χρησιμοποιούνται στις βιομηχανικές διαδικασίες. Ένας βαθύτερος ταμιευτήρας μπορεί να προστατευθεί μερικώς στα ενδιάμεσα βάθη από τους σχιστόλιθους ή από το βασικό συγκρότημα διεργασιών του ανώτερου σχηματισμού.



Εικόνα 3.3: Ψευδογεωηλεκτρικό (pseudogeoelectrical) μοντέλο που προκύπτει από 2-D επεξεργασία της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης, κατά μήκος της γραμμής A-A' στην περιοχή Polialden (De Lima et al., 1995).

3.2.3 Η τεχνική του Υπεδάφειου Ραντάρ ως εργαλείο ανίχνευσης και αξιολόγησης περιοχών απόρριψης αποβλήτων (Orlando et al., 2001)

Στα περίχωρα της Ρώμης αρκετά εγκαταλελειμμένα μεταλλεία χρησιμοποιήθηκαν ως χώροι αποθήκευσης απορριμμάτων κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960. Προκειμένου να καθοριστούν με σαφήνεια τα όρια του χώρου απόθεσης απορριμμάτων καθώς και το είδος της ρύπανσης (οικιακά ή βιομηχανικά απορρίμματα, χαλάσματα κτιρίων κ.α), διεξήχθη έρευνα χρησιμοποιώντας το υπεδάφειο ραντάρ ως κύριο εργαλείο για την επίλυση του προβλήματος. Τα δεδομένα του γεωραντάρ εμφανίζουν περιθλάσεις και ασυνεχείς ανακλάσεις σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από ρύπανση.

Γεωφυσικές διασκοπήσεις πραγματοποιήθηκαν ενδεικτικά σε δύο περιοχές, Ponte Malnome και Regione Lazio. Εκτός από το γεωραντάρ πραγματοποιήθηκαν παράλληλα:

- i) Ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις (*vertical electrical soundings*)
- ii) Ηλεκτρική τομογραφία (*multielectrode measurements*)
- iii) Σεισμική διάθλαση (*seismic refraction*)
- iv) Γεωτρήσεις παρακολούθησης της περιοχής (*boreholes*)

Τα αποτελέσματα από την πρώτη περιοχή συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν από τις έρευνες (i), (ii) και (iv), ενώ της δεύτερης περιοχής μελέτης με τα αποτελέσματα των ερευνών (i) και (iii).

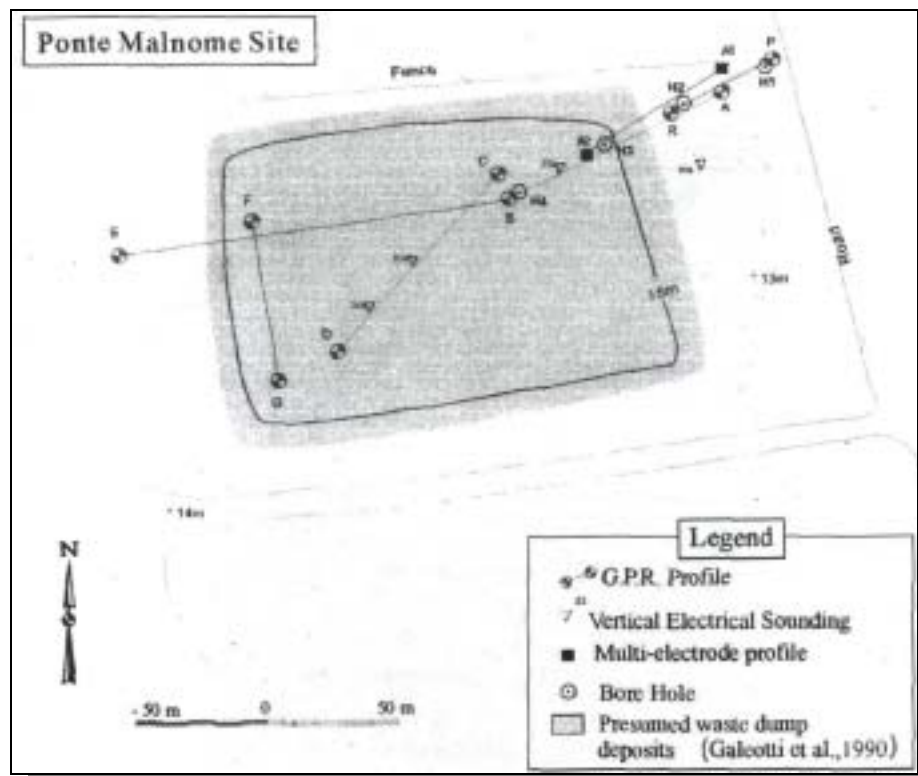
Η περιοχή Ponte Malnome χαρακτηρίζεται ως λόφος, του οποίου η κορυφή καλύπτεται από αλλουβιακά ιζήματα. Το πάχος του χώρου που αποτίθεντο τα απορρίμματα (κυρίως χαλάσματα κτιρίων) εκτιμάται στα 3-4m και καταλαμβάνει μία έκταση 87.000m^2 (γκρίζα περιοχή στην εικόνα 3.4).

Όσον αφορά τη δεύτερη περιοχή μελέτης, αυτή βρίσκεται σε μεταλλείο το οποίο υπόκειται αργιλικού στρώματος. Ο χώρος απόθεσης απορριμμάτων καλύπτει έκταση 60.000m^2 και έχει πάχος 10-15m. Στην περίπτωση αυτή αναφερόμαστε σε οικιακά απορρίμματα.

Η μελέτη με το γεωραντάρ και για τις δύο περιοχές πραγματοποιήθηκε με τη συσκευή PulseEKKO 100, εφοδιασμένο με τρεις διαφορετικές κεραίες των 50, 100 και 200MHz αντίστοιχα. Κεραίες διαφορετικών συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκαν στις ίδιες γραμμές μελέτης, προκειμένου να διαπιστωθεί η διεισδυτική ικανότητα του γεωραντάρ στην περιοχή. Τα δεδομένα που ελήφθησαν υπέστησαν επεξεργασία με ειδικά φίλτρα

(*dewon*, AGC και φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων - βλ. Κεφάλαιο 5), έτσι ώστε να προκύψουν καλύτερα αποτελέσματα και να απαλειφθεί ο θόρυβος.

Στην περιοχή διεξήχθησαν ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις χρησιμοποιώντας τη διάταξη Schlumberger, ενώ παράλληλα πραγματοποιήθηκε ηλεκτρική τομογραφία με τη διάταξη διπόλου-διπόλου (*dipole-dipole*) και 28 ηλεκτρόδια που απέιχαν 1m μεταξύ τους. Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων (Loke και Barker, 1996).

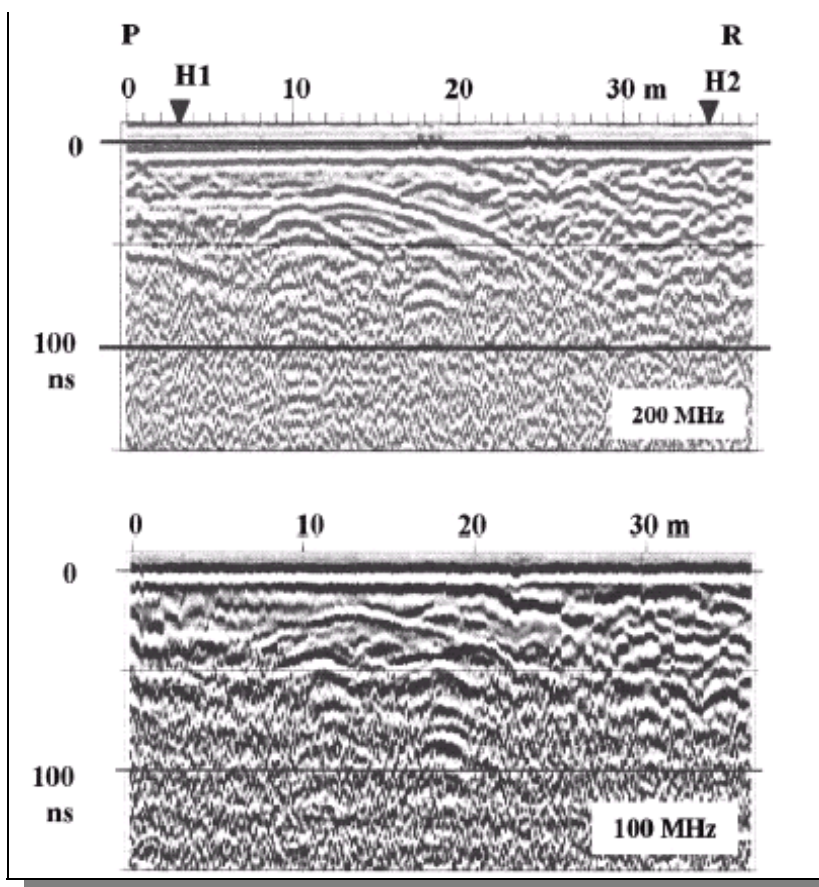


Εικόνα 3.4: Χάρτης της περιοχής μελέτης Ponte Malnome, όπου πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές διασκοπήσεις και γεωτρήσεις. Ο χώρος των απορριμμάτων είναι ένας λόφος (Galeotti, 1990) με επίπεδη κορυφή (γκρι χρώμα) που έχει διαμορφωθεί από αλλουβιακά ιζήματα (ιλύς, άργιλος και χαλίκια) (Orlando et al., 2001).

Κατάλογος τεχνικών αποτελεσμάτων:

Από τη μελέτη της περιοχής Ponte Malnome δεν προέκυψαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των τριών κεραιών (50, 100, 200MHz) σε σχέση με τον καθορισμό του βάθους διασκόπησης. Παρόλα αυτά, η χρησιμοποίηση των κεραιών 100 και 200MHz δίνει αναλυτικότερα αποτελέσματα (καλύτερη κάθετη και πλευρική διακριτική ικανότητα) σε σχέση με αυτά που προκύπτουν από την κεραία των 50MHz.

Στα σχήματα που παρατίθενται παρακάτω (εικόνες 3.5 και 3.6) παρουσιάζονται οι τομές που προέκυψαν από τα δεδομένα του γεωραντάρ για δύο χαρακτηριστικές γραμμές μελέτης (PR-AB). Η γραμμή PR δε βρίσκεται μέσα στον κεντρικό χώρο απόρριψης, σε αντίθεση με τη γραμμή μελέτης AB (εικόνα 3.4). Στα πρώτα δέκα μέτρα της τομής PR και στα πρώτα πέντε μέτρα της τομής AB, είναι εμφανείς κάποιοι υπο-οριζόντιοι ανακλαστήρες πάνω από τα 60nsec. Κάτω από αυτούς τους ανακλαστήρες, το τμήμα που ακολουθεί χαρακτηρίζεται από εξασθένιση των σημάτων γεωραντάρ και από υπερβολές και ασυνεχείς ανακλάσεις.

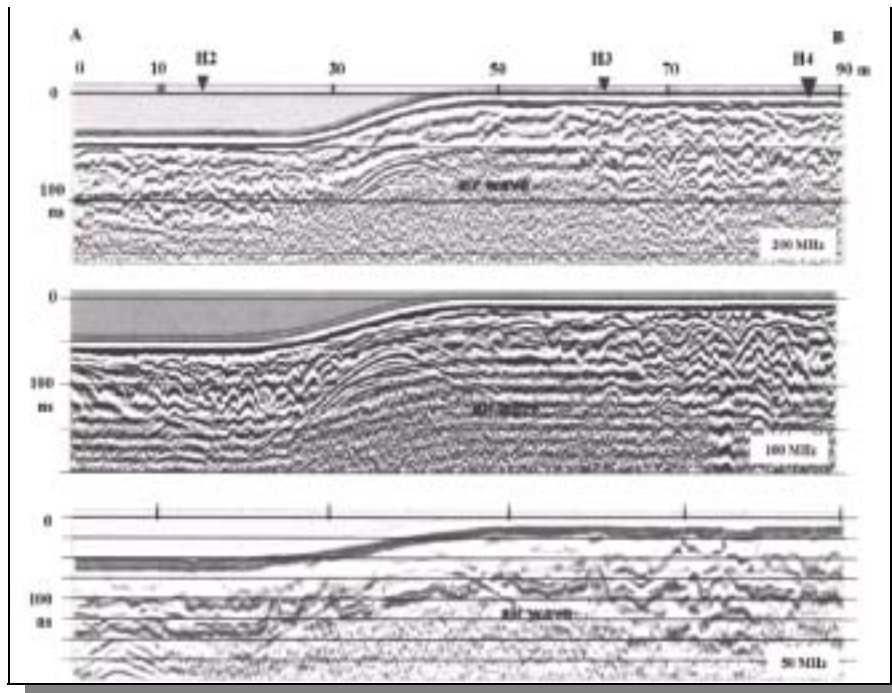


Εικόνα 3.5: Τομές που προέκυψαν από μετρήσεις γεωραντάρ (200-100MHz) στην περιοχή Ponte Malnome. Στα δεδομένα έχουν εφαρμοστεί φίλτρα AGC, dewow και αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων. Στο σχήμα η θέση PR δηλώνει την τοποθεσία των γραμμών μελέτης και τα H1-H2 την τοποθεσία των γεωτρήσεων (βλ. εικόνα 3.4). Σε οριζόντια απόσταση περίπου 10m παρατηρείται η επαφή των στρωματοποιημένων ιζημάτων με το χώρο απόθεσης των απορριμμάτων (Orlando et al., 2001).

Είναι χαρακτηριστικό ότι οι κεραίες των 100 και 200MHz έχουν μικρότερη διεύρυνση σε σχέση με την κεραία των 50MHz, η οποία ανιχνεύει έναν ανακλαστήρα στα 100nsec περίπου (εικόνες 3.5 και 3.6).

Τα πρώτα μέτρα στις τομές PR (0-10 m) και AB (0-5 m) θα μπορούσαν να αντιστοιχούν σε ιζήματα της περιοχής, ενώ το υπόλοιπο τμήμα, το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλές αντιστάσεις και ασυνεχείς ζώνες ανάκλασης, θα μπορούσε να αποδοθεί σε απορρίμματα. Η μορφή των ζωνών ανάκλασης δηλώνει ότι τα απορρίμματα αποτελούνται κυρίως από ανόργανα υλικά, τα οποία πιθανώς να είναι χαλάσματα κτιρίων.

Παράλληλα, οι τομές που προκύπτουν από τις μετρήσεις του γεωραντάρ απεικονίζουν το όριο στο ανατολικό τμήμα της περιοχής που μελετάται. Αυτό το όριο εμφανίζεται να καλύπτει μεγαλύτερη έκταση σε σχέση με παλαιότερη γεωλογική έρευνα. Επομένως, η χρησιμοποίηση της κεραίας των 50MHz δηλώνει τη γεωμετρία της περιοχής ρύπανσης, ενώ οι κεραίες των 100 και 200MHz προσκομίζουν πληροφορίες για το είδος του υλικού που έχει απορριφθεί και τη γεωμετρία του.

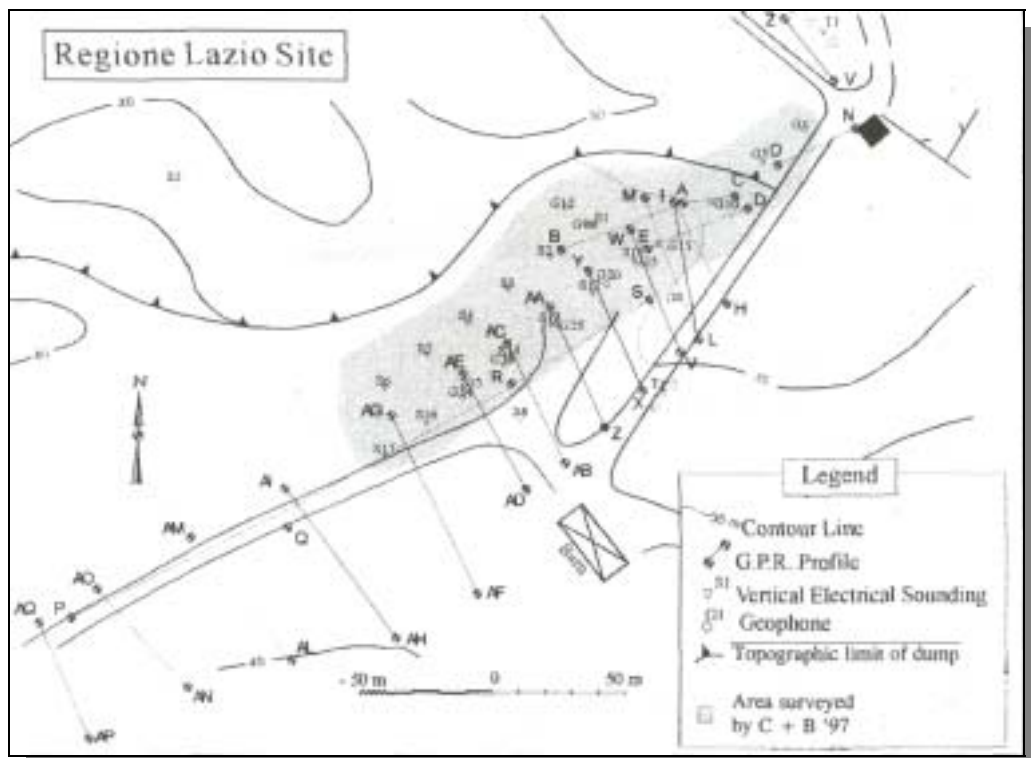


Εικόνα 3.6: Τομές Υπεδάφειου Ραντάρ (200-100-50MHz) στην περιοχή Ponte Malnome. Η γραμμή μελέτης απεικονίζεται από τη θέση AB, ενώ τα H2-H3-H4 δείχνουν την τοποθεσία των γεωτρήσεων (βλ. εικόνα 3.4). Σε όλα τα δεδομένα εμφανίζονται υπερβολές, που προκαλούνται από την περίθλαση του κύματος αέρα, σε οριζόντια απόσταση 38m. Στα 5m περίπου βρίσκονται σε επαφή τα αργιλικά ιζήματα με τα απορρίμματα, τα οποία έχουν πάχος 2-3m και υπέρκεινται των ιζημάτων. Στα 100nsec ανιχνεύεται ένας ανακλαστήρας με την κεραία των 50MHz (Orlando et al., 2001).

Οι παραπάνω διαπιστώσεις συμφωνούν με τα δεδομένα που ελήφθησαν από τη διεξαγωγή ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων, ηλεκτρικής τομογραφίας και γεωτρήσεων παρακολούθησης. Υπάρχει, επομένως, στρώμα που αποτελείται από ετερογενές υλικό πάχους 3-5m, το οποίο ανιχνεύεται από το γεωραντάρ και συνδέεται τελικά με την περιοχή ρύπανσης.

Όσον αφορά τις μελέτες στην περιοχή Regione Lazio, προηγούμενες έρευνες των Cardarelli και Bernabini το 1997 (ηλεκτρικές βυθομετρήσεις και μέθοδος σεισμικής ανάκλασης) αναγνώρισαν δύο ζώνες που ανήκουν στην περιοχή ρύπανσης (σε βάθος 3-5m και 12m αντίστοιχα) και μία τρίτη που αναγνωρίστηκε καθαρά ως ίζημα.

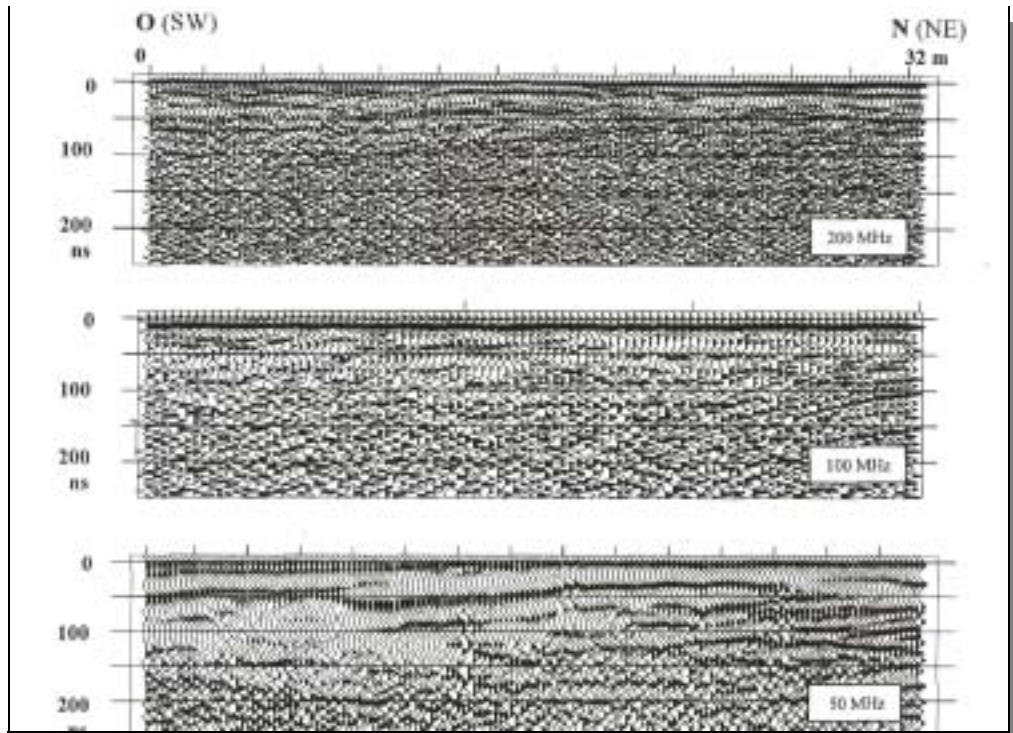
Επειδή οι ηλεκτρικές μετρήσεις δεν προσφέρουν πολλά στην εν λόγω περίπτωση (όλη η περιοχή έχει καλυφτεί με άμμο και είναι αδύνατον να διακριθεί η ρύπανση που προέρχεται από τα σπίτια σε σχέση με αυτή που οφείλεται στα ερείπια του μεταλλείου), διεξήχθη έρευνα με υπεδάφιο ραντάρ (εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7: Χάρτης της περιοχής Regione Lazio. Στο χάρτη απεικονίζονται οι γραμμές μελέτης για τις διάφορες γεωφυσικές μεθόδους (Orlando et al., 2001).

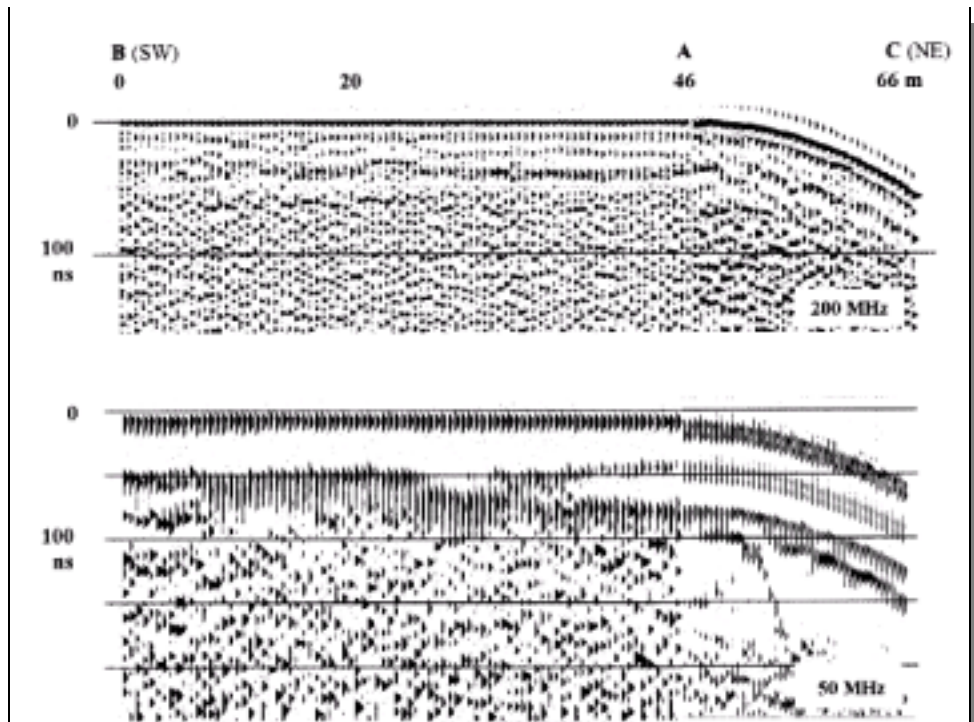
Κατά την παρούσα έρευνα παρουσιάζονται μία τομή ON, κοντά στη ρυπογόνο περιοχή, μία τομή ZV μακριά από την περιοχή μελέτης και τέλος μία τομή AC η οποία βρίσκεται στο κέντρο της ρύπανσης (εικόνα 3.7).

Η ανάλυση των δεδομένων γεωραντάρ έδειξε συνεχείς ανακλάσεις μέχρι τα 200nsec, ιδιαίτερα στο δεξί τμήμα για την τομή ON (εικόνα 3.8). Αντίστοιχα, το αριστερό τμήμα της τομής AC χαρακτηρίζεται από ασθενή διείσδυση του γεωραντάρ, ενώ στο δεξί τμήμα η διείσδυση είναι ισχυρότερη αλλά οι ανακλάσεις είναι ασυνεχείς (εικόνα 3.9). Σύγκριση μεταξύ των τομών ON και AC αποδεικνύει πλευρική μεταβολή στο χαρακτήρα στρωμάτωσης του υπεδάφους (συνεχείς - ασυνεχείς ανακλάσεις).



Εικόνα 3.8: Τομή που προκύπτει από δεδομένα των 200, 100 και 50 MHz κατά μήκος της γραμμής μελέτης ON (Orlando et al., 2001).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του γεωραντάρ με αυτά της προηγούμενης έρευνας, αποδεικνύεται ότι η επιφανειακή ενότητα που ανιχνεύεται από το υπεδάφιο ραντάρ (50-80nsec) μέσα στη ρυπογόνο περιοχή και χαρακτηρίζεται από μεταβολή στα μεγέθη των ανακλάσεων, συνδέεται με το πρώτο στρώμα των Cardarelli και Bernabini (10-100Ωm, 0,3km/s) (βλ. εικόνα 3.38, §3.5.2). Τα μεγέθη της ηλεκτρικής αντίστασης και της ταχύτητας των P-κυμάτων υπονοούν ότι αυτή η ενότητα είναι διαμορφωμένη από ετερογενές υλικό που αποτελείται από οικιακά απορρίμματα.



Εικόνα 3.9: Τομή γεωραντάρ κατά μήκος της γραμμής μελέτης BAC (Orlando *et al.*, 2001).

Η επόμενη ενότητα πιθανώς να αναφέρεται στο δεύτερο στρώμα των 12m. Η ταχύτητα, όμως, των σεισμικών κυμάτων ($0,6\text{km/s}$), η χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση ($30\text{-}70\Omega\text{m}$) και η απουσία περιθλάσεων και ανακλάσεων υποδηλώνουν ότι το τμήμα αυτό μπορεί να μην προέρχεται τελικά από οικιακά απορρίμματα, αλλά αντίθετα από άργιλο, η οποία δεν είχε διαστρωματοποιηθεί κατάλληλα πριν την απόρριψή της στο μεταλλείο.

Συμπερασματικά, η έρευνα της περιοχής Regione Lazio έδειξε ότι η μέθοδος του γεωραντάρ, εξαιτίας της μικρής διεισδυτικής ικανότητας και της συχνότητας των κεραιών του, μπόρεσε να ανιχνεύσει τα πλευρικά όρια του χώρου απόθεσης, αλλά όχι τη βάση του. Παρόλ' αυτά, όμως, καθορίζει τα οριζόντια όρια της ρυπογόνου περιοχής και διακρίνει την επιφανειακή ρύπανση (οφείλεται σε οικιακά απορρίμματα) από τα αμμώδη ερείπια του μεταλλείου.

3.2.4 Χρήση συνδυασμένων γεωφυσικών μεθόδων για την εκτίμηση της αγωγιμότητας και του βαθμού κορεσμού σε νερό σχηματισμών κοντά στην επιφάνεια (Garambois et al., 2001)

Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε σε αλλουβιακό σχηματισμό (χονδροειδείς αποθέσεις χαλικιών και άμμων) κοντά στην πόλη Pau της Γαλλίας. Τα δύο πειράματα που έλαβαν χώρα στην περιοχή δοκιμής περιελάμβαναν σεισμικές διασκοπήσεις (διάθλαση P-κυμάτων, ανάκλαση P και S-κυμάτων), χρήση υπεδάφειου ραντάρ και ηλεκτρικές μετρήσεις με διάταξη διπόλου-διπόλου. Το πείραμα Α πραγματοποιήθηκε μετά από διαποτισμό του εδάφους, αντίθετα προς το πείραμα Β που πραγματοποιήθηκε σε ξηρό έδαφος.

Βασικός στόχος της έρευνας είναι ο ποσοτικός προσδιορισμός της εδαφικής υγρασίας και του εδαφικού πορώδους, καθώς και η μελέτη του προβλήματος της εξάρτησης (*trade-off*) της ειδικής αντίστασης του ακέραιου πετρώματος (*bulk resistivity*) από την αλατότητα ύδατος και το βαθμό κορεσμού σε νερό στο νόμο του Archie¹.

Τα φρεάτια στην ευρύτερη περιοχή μελέτης προσκομίζουν πληροφορίες για τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (ποικίλλει από 1-5m σε βάθος ανάλογα με τις καιρικές και εποχικές εναλλαγές), ενώ εδαφολογικές αναλύσεις διαφωτίζουν τις έρευνες σχετικά με την αγωγιμότητα, το pH και τη σύνθεση της αργίλου.

Οι γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόστηκαν έχουν ως εξής:

- ✓ Οι μετρήσεις του γεωραντάρ πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα σύστημα μονάδων RAMAC/GPR συνδεδεμένο με κεραίες συχνότητας 100MHz. Τα στοιχεία του πειράματος Α συλλέχθηκαν με ένα σύνολο 8 συσκευών πομπού-δέκτη, η οριζόντια απόσταση των οποίων κυμαίνεται από 1 έως 8m. Επίσης, στοιχεία κοινού ενδιάμεσου σημείου (*Common Midpoint, CMP*) συλλέχθηκαν από 401 γραμμές -με ισαπόσταση διαδοχικών ενδιάμεσων σημείων 0,1m- σε προφίλ 40m. Τα στοιχεία CMP του πειράματος Β καταγράφηκαν κάθε 4m σε προφίλ 60m και απόσταση

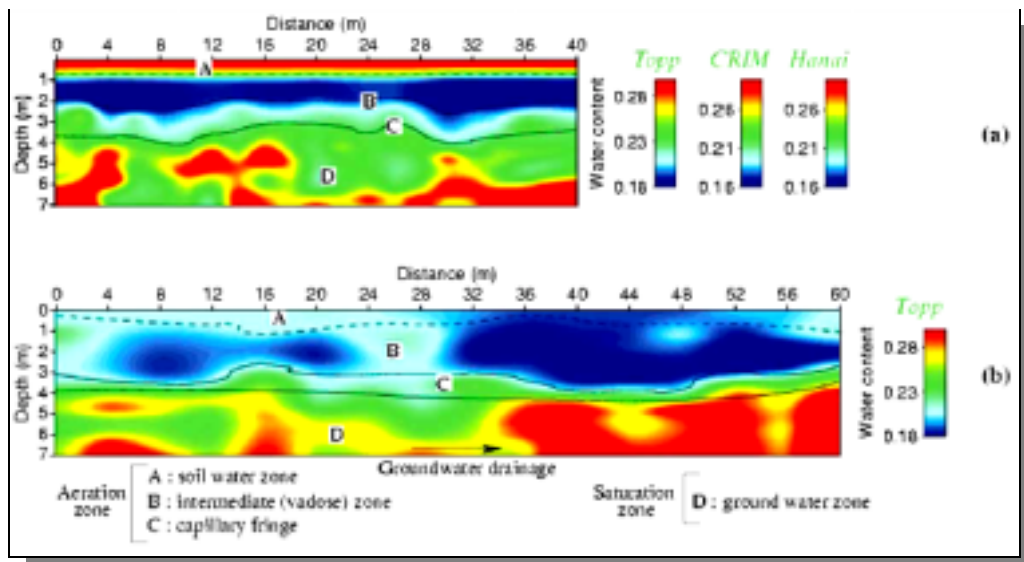
¹ **Νόμος του Archie:** $S_w^n = \frac{R_o}{R_t}$, όπου S_w^n ο βαθμός κορεσμού σε νερό, R_t η πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση σχηματισμού και R_o η ειδική ηλεκ. αντίσταση σχηματισμού ο οποίος είναι 100% κορεσμένος σε νερό ειδικής ηλεκ. αντίστασης R_w . Είναι: $R_o = F * R_w = \frac{\alpha}{\phi^m} * R_w$, όπου F ο συντελεστής σχηματισμού, ϕ το πορώδες και m ο συντελεστής διαγένεσης (Βαφείδης, 1994).

πομπού-δέκτη από 0,6 έως 10m, κάθε 0,2m. Προκειμένου να μειωθεί ο θόρυβος, εφαρμόστηκε φίλτρο διέλευσης ενδιάμεσων συχνοτήτων (*15-250 MHz zero-phase band pass filter*).

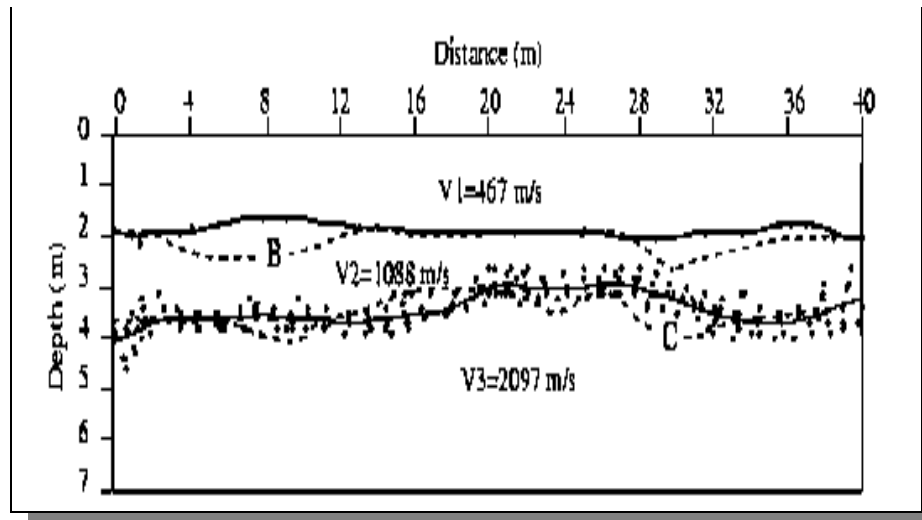
- ✓ Κατά τις σεισμικές έρευνες χρησιμοποιήθηκαν 48 γεώφωνα των 50Hz, τα οποία τοποθετήθηκαν ανά ένα μέτρο κατά μήκος της γραμμής μελέτης του υπεδάφειου ραντάρ. Πολλαπλές καταγραφές πραγματοποιήθηκαν κάθε 12m.
- ✓ Δισδιάστατες ηλεκτρικές τομές προέκυψαν από μετρήσεις 64 ηλεκτροδίων (πείραμα A) και 80 ηλεκτροδίων (πείραμα B) τοποθετημένα ανά 1m και χρησιμοποιώντας διάταξη διπόλου-διπόλου. Για την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων που παρήχθησαν χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RES2DINV.

Κατάλογος τεχνικών αποτελεσμάτων:

Το υπεδάφειο ραντάρ υπολογίζει άμεσα το βαθμό κορεσμού σε νερό βράχων κοντά στην επιφάνεια χρησιμοποιώντας το νόμο του Archie. Επίσης, από τα στοιχεία γεωραντάρ μπορούν να αναγνωριστούν τρία-τέσσερα σχεδόν οριζόντια στρώματα (εικόνα 3.10). Τρία παρόμοια στρώματα παρατηρούνται και στις μεθόδους σεισμικής διάθλασης (εικόνα 3.11). Μία συνδυασμένη ανάλυση των στοιχείων του γεωραντάρ και των σεισμικών αποτελεσμάτων προσδιορίζει το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα (4m) και τις πλευρικές διακυμάνσεις του.

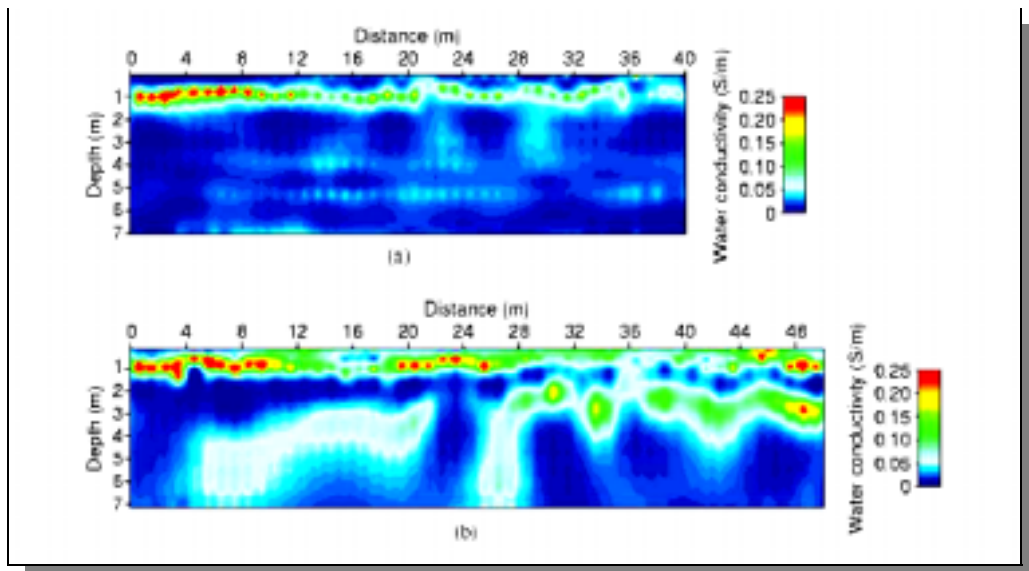


Εικόνα 3.10: (α) Εκτίμηση του βαθμού κορεσμού σε νερό του υπεδάφους, όπως αυτό υπολογίστηκε από την ανάλυση κυμάτων με τη μέθοδο της υπέρθεσης κατά το πείραμα A. Η χρωματική ράβδος δείχνει εάν το περιεχόμενο του νερού υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση Torr ή από τις εξισώσεις CRIM ή Hanai-Bruggeman. (β) Εκτίμηση του βαθμού κορεσμού σε νερό του υπεδάφους για το πείραμα B, βάση μόνο της εξίσωσης Torr (Garambois et al., 2001).



Εικόνα 3.11: 2-D μοντέλο που παριστάνει την ταχύτητα των P-κυμάτων, όπως αυτές υπολογίστηκαν μετά από αντιστροφή του πρώτου χρόνου άφιξης κατά το πείραμα A. Οι τελείες αντιπροσωπεύουν τα σημεία πρόσπτωσης και ανάδυσης των διαθλώμενων ακτίνων κατά μήκος της διεπιφάνειας. Οι γραμμές με τις τελείες απεικονίζουν τους ορίζοντες B και C, όπως ανιχνεύθηκαν από τις μετρήσεις του γεωραντάρ (Garambois et al., 2001).

Τα δισδιάστατα (2-D) ηλεκτρικά μοντέλα εμφανίζουν πιο εκτεταμένη ζώνη διεύθυνσης αλατούχου ύδατος κοντά στην επιφάνεια, αλλά και πιθανή παρουσία αλατούχου νερού σε μεγαλύτερα βάθη κατά μήκος προνομακών ζωνών (εικόνα 3.12).



Εικόνα 3.12: 2-D μοντέλα που παριστάνουν την αγωγιμότητα του νερού. Τα μοντέλα αυτά προέκυψαν από αντικατάσταση των 2-D μοντέλων ηλεκτρικής αντίστασης του πετρώματος (σε σχέση με το βαθμό κορεσμού σε νερό), τα οποία με τη σειρά τους υπολογίστηκαν μέσω δεδομένων γεωραντάρ στο νόμο του Archie ($m=n=2$). (a) Πείραμα A και (b) Πείραμα B (Garambois et al., 2001).

Συμπερασματικά, τα στοιχεία γεωραντάρ μπορούν να παρέχουν από την επιφάνεια αξιόπιστες πληροφορίες για την αγωγιμότητα και το βαθμό κορεσμού σε νερό του υπεδάφους αποφεύγοντας τις γεωτρήσεις. Οι σεισμικές ανακλάσεις και διαθλάσεις επηρεάζονται από το μερικό κορεσμό του εδάφους και δεν ακολουθούν τη φρεατική επιφάνεια. Τέλος, από την ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων μπορεί να υπολογισθεί άμεσα ο βαθμός κορεσμού σε νερό.

Τα παραπάνω δείχνουν το πλεονέκτημα της συνδυασμένης εφαρμογής διαφορετικών μεθόδων για την εκτίμηση γεωλογικών παραμέτρων του υπεδάφους. Εντούτοις, αξίζει να σημειωθεί ότι η παρούσα έκθεση αναφέρεται στο νόμο του Archie και στον τρόπο που ο βαθμός κορεσμού σε νερό προσδιορίζεται.

3.2.5 Ανίχνευση ρύπανσης υπογείου νερού με ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους (Buselli & Lu, 2001)

Στο βόρειο τμήμα της Αυστραλίας, στην περιοχή του ορυχείου Ranger, διεξήχθησαν γεωφυσικές διασκοπήσεις με σκοπό την ανίχνευση πιθανής διαρροής σε χώρους που χρησιμοποιούνταν για αποθήκευση των αποβλήτων. Ο κύριος σκοπός των εργασιών ήταν η απόκτηση μίας ολοκληρωμένης εικόνας των περιβαλλοντικών προβλημάτων που παρουσιάζονται στο ορυχείο, συνδυάζοντας γεωφυσικές μεθόδους με υδρογεωλογικές πληροφορίες.

Ένα από τα ουσιαστικά περιβαλλοντικά προβλήματα που παρουσιάζονται στο ορυχείο είναι η διαρροή από χώρους αποθήκευσης νερού, το οποίο προέρχεται από εργοστάσιο επεξεργασίας ουρανίου (κύριο ορυκτό εξόρυξης). Το συγκεκριμένο νερό περιέχει υψηλές περιεκτικότητες σε Mg^{2+} και SO_4^{2-} και είναι επικίνδυνο. Ενδεικτικό είναι ότι η συγκεκριμένη διαρροή είχε και παλαιότερα ανιχνευτεί σε περιφερειακές γεωτρήσεις, αλλά τα δεδομένα δεν ήταν ικανά για μία άρτια κατανόηση του προβλήματος.

Για αυτόν ακριβώς το λόγο ηλεκτρομαγνητικές γεωφυσικές διασκοπήσεις διεξήχθησαν κατά το έτος 1990. Βόρεια του χώρου αποθήκευσης εφαρμόστηκαν οι παρακάτω μέθοδοι:

- Μέθοδος παροδικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από αέρα (*AEM*).
- Μέθοδος παροδικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (*TEM*).
- Ηλεκτρομαγνητικά συστήματα τα οποία στηρίζονταν όχι στην παράμετρο του χρόνου αυτή τη φορά, αλλά στη συχνότητα.

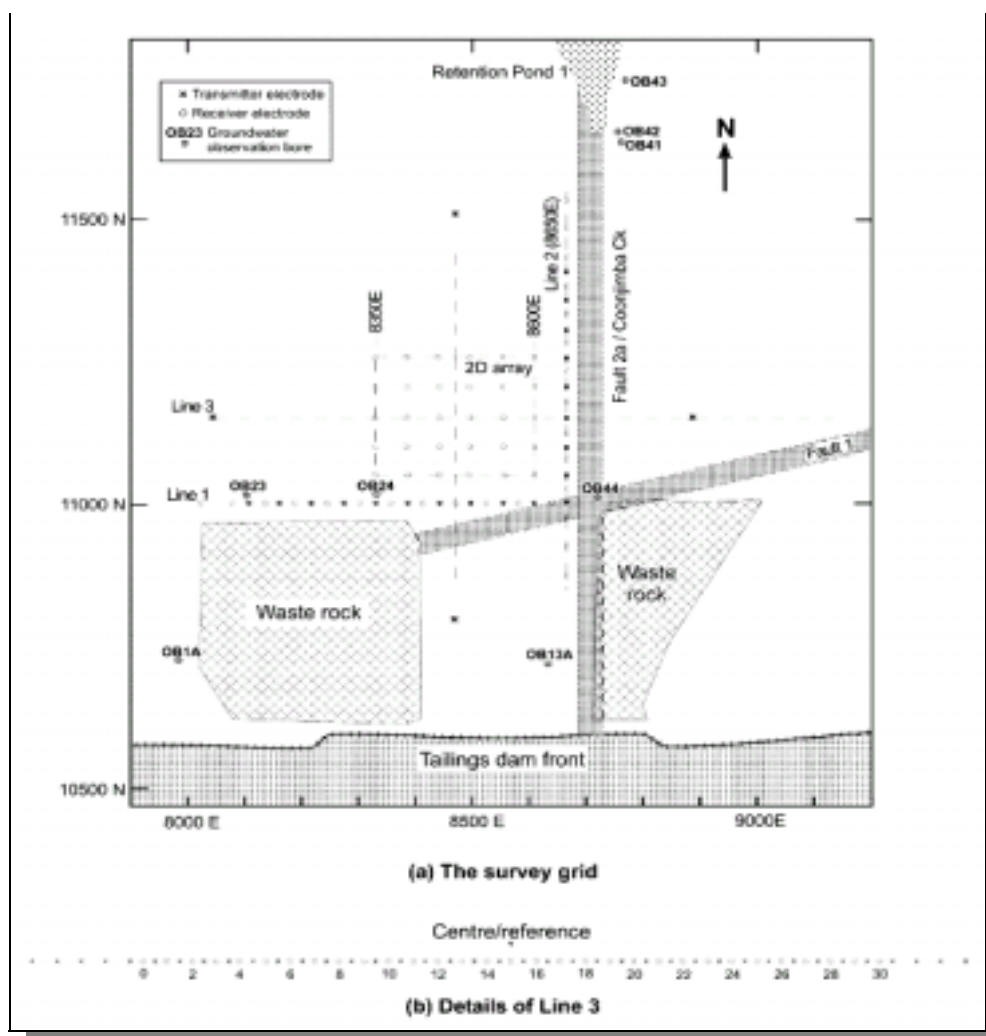
Παρά το γεγονός ότι οι προαναφερθείσες έρευνες έδειξαν μία πιθανή παρουσία υπεδάφειας διαρροής, η πηγή της ρύπανσης δεν ήταν ακόμα ακριβής. Προκειμένου, λοιπόν, να διαπιστωθεί επακριβώς η διαρροή που παρατηρείται στους χώρους αποθήκευσης του ορυχείου, εφαρμόστηκε ένας συνδυασμός από τις ακόλουθες γεωφυσικές μεθόδους:

- ✓ Φυσικού Δυναμικού (*self potential*)
- ✓ Επαγόμενης Πολικότητας (*induced polarization*)
- ✓ Ηλεκτρικής Αντίστασης (*direct current resistivity*)
- ✓ Μέθοδοι βασιζόμενοι σε παροδικά ηλεκτρομαγνητικά κύματα (*TEM*)

Το γεωλογικό προφίλ της περιοχής, όπου πραγματοποιήθηκαν οι γεωφυσικές διασκοπήσεις, αφορά σχετικά αγωγίμα ιζήματα πάχους 2-5m τα οποία υπέρκεινται του κρυσταλλικού υποβάθρου. Τα πετρώματα του υποβάθρου είναι κυρίως γρανίτες και γνεύσιοι με δευτερεύοντα στρώματα χαλαζία, μαρμαρυγία και σχιστόλιθου.

Σε όλες τις γεωφυσικές μεθόδους, εκτός της ηλεκτρομαγνητικής, τα δεδομένα συλλέχθηκαν με σύστημα 64 καναλιών, κατασκευασμένο από το τμήμα Μεταλλευτικών Ερευνητικών Τεχνολογιών του Κέντρου Ερευνών Αυστραλίας (CRC AMET). Το σύστημα αυτό, χρησιμοποιώντας έναν επεξεργαστή στα 16-bit, είχε την δυνατότητα να δειγματίζει όλα τα κανάλια ταυτόχρονα. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η ταυτόχρονη καταγραφή των δεδομένων (μετρήσεις επαναλαμβάνονται σε τακτά διαστήματα κατά μήκος πληθώρας γραμμών) παίζει σημαντικό ρόλο στον έλεγχο των περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Η εικόνα 3.13 απεικονίζει τις θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν ηλεκτρόδια για την πραγματοποίηση των διασκοπήσεων φυσικού δυναμικού, επαγόμενης πολικότητας και ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Ο χάρτης εμφανίζει τόσο τη θέση της δισδιάστατης διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις φυσικού δυναμικού, όσο και των διατάξεων που ακολουθήθηκαν κατά μήκος των γραμμών 1, 2 και 3.



Εικόνα 3.13: Απεικόνιση των γραμμών γεωφυσικών διασκοπήσεων βόρεια της περιοχής του ορυχείου. (α) Θέση των ηλεκτροδίων και των γεωτρήσεων παρακολούθησης. (β) Λεπτομέρειες των μετρήσεων ηλεκτρικής αντίστασης κατά μήκος της γραμμής 3 (Buselli & Lu, 2001).

Κατάλογος τεχνικών αποτελεσμάτων:

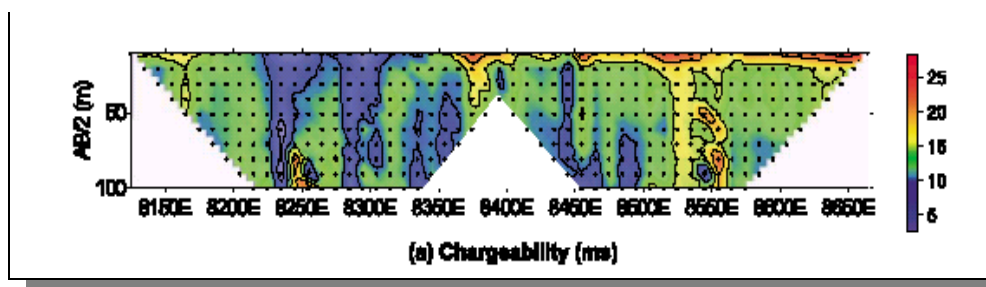
Από τις μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης που πραγματοποιήθηκαν, εξήχθησαν διάφορες τομές για τη φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση (*apparent electrical resistivity*) και τη φορτιστικότητα (*chargeability*). Χαρακτηριστικές τομές που αναφέρονται, είναι αυτές που προκύπτουν από διάταξη πόλου-διπόλου (*pole-dipole*) και από διάταξη Schlumberger.

Η ηλεκτρική διασκόπηση με τη διάταξη Schlumberger (εικόνα 3.13) πραγματοποιήθηκε σε 30 διαφορετικούς σταθμούς με απόσταση ηλεκτροδίων μικρότερη των 10m. Η όλη διαδικασία διήρκεσε μισή μέρα εξαιτίας της ταυτόχρονης καταγραφής των δεδομένων.

Όσον αφορά τη χαρτογράφηση ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και φυσικού δυναμικού, αυτή πραγματοποιήθηκε με απόσταση ηλεκτροδίων 10m. Η συλλογή των δεδομένων έγινε ταυτόχρονα από 31 ηλεκτρόδια. Οι έρευνες φυσικού δυναμικού επαναλήφθηκαν αρκετές φορές την ίδια ημέρα χρησιμοποιώντας μία δισδιάστατη διάταξη ηλεκτροδίων (2-D array), όπως φαίνεται στην εικόνα 3.13.

Εφαρμόζοντας στη μέθοδο της επαγόμενης πολικότητας κατά μήκος της γραμμής 3 (εικόνα 3.13) τη διάταξη Schlumberger, προκύπτουν τομές που απεικονίζουν τη μεταβολή της φορτιστικότητας. Αναλύοντας μάλιστα την εικόνα 3.14, παρατηρούμε τρεις μεγάλες περιοχές που εμφανίζουν ανωμαλίες (8370E, 8525E και 8650E). Οι δύο πρώτες οφείλονται στην παρουσία αργίλου, ενώ η τρίτη παρατηρείται κατά μήκος του ρήγματος 2a (εικόνα 3.13), το οποίο θεωρείται η κύρια δίοδος για τη διαρροή της ρύπανσης.

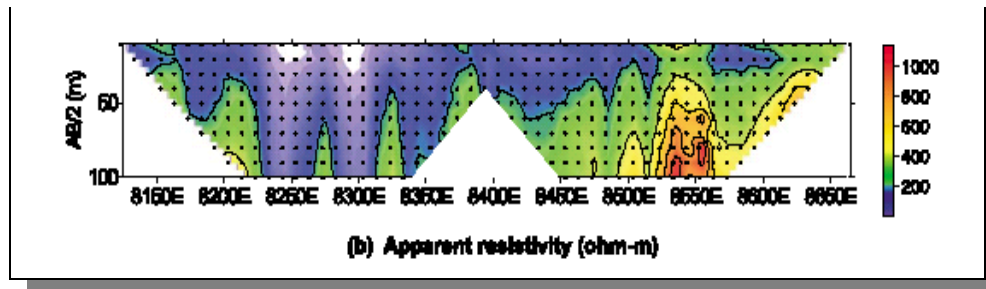
Δεν είναι άλλωστε τυχαίο ότι η περιοχή ενδιαφέροντος που παρατηρείται στα 8650E χαρακτηρίζεται τόσο από αυξημένη φορτιστικότητα, όσο και από υψηλή συγκέντρωση σε Mg^{2+} και SO_4^{2-} στο νερό του υπεδάφους.



Εικόνα 3.14: Τομή που προκύπτει από διάταξη Schlumberger και απεικονίζει τη μεταβολή της φορτιστικότητας σε σχέση με την απόσταση ηλεκτροδίων (Buselli & Lu, 2001).

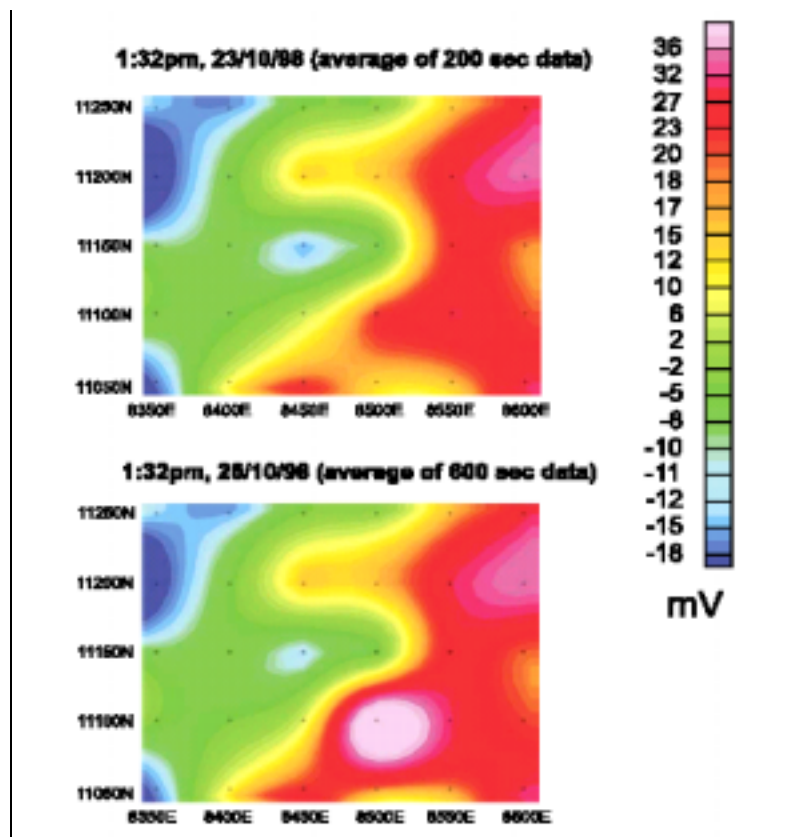
Από την επεξεργασία των δεδομένων της μεθόδου ηλεκτρικής αντίστασης, προκύπτουν ψευδοτομές (*pseudosections*) που απεικονίζουν την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης και του βάθους διασκόπησης. Εντούτοις, παρατηρώντας την εικόνα 3.15, δεν εμφανίζονται περιοχές με ιδιαίτερα χαμηλές τιμές φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης, ιδιαίτερα στα τμήματα εκείνα όπου αναμένεται η ρύπανση.

Το γεγονός αυτό αντιτίθεται με τη διαπίστωση ότι το νερό ρύπανσης του υπεδάφους είναι περισσότερο αγωγίμο από το καθαρό νερό, με αποτέλεσμα να αναμέναμε χαμηλότερες ενδείξεις της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης στις προβληματικές περιοχές.



Εικόνα 3.15: Τομή που προκύπτει από διάταξη Schlumberger και απεικονίζει τη μεταβολή της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης (Buselli & Lu, 2001).

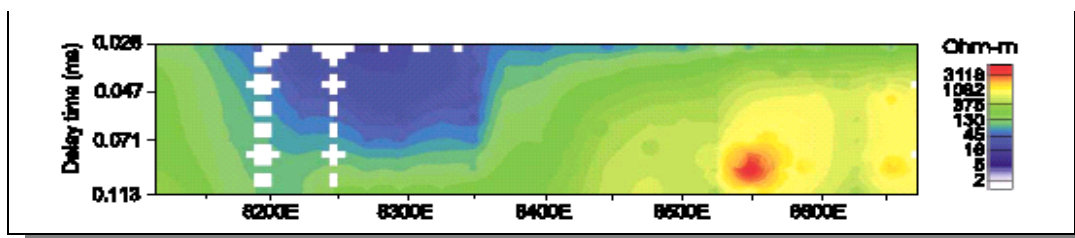
Όσον αφορά τα αποτελέσματα των μετρήσεων φυσικού δυναμικού, οι χάρτες που απεικονίζονται στην εικόνα 3.16 χαρακτηρίζονται από υψηλή επαναληψιμότητα και οι ελάχιστες διαφορές μεταξύ τους μπορούν να αποδοθούν σε αποκλίσεις του παράγοντα “τελλουρικά ρεύματα”. Η ερμηνεία των στοιχείων, που προκύπτουν από τις μετρήσεις φυσικού δυναμικού, δεν μπορεί να είναι άμεση και αποτελεσματική, δεδομένου ότι η πηγή που προκαλεί τις συγκεκριμένες ανωμαλίες δεν είναι προκαθορισμένη. Μία πιθανή λύση θα μπορούσε να δώσει απόσταση ηλεκτροδίων μικρότερη των 10m, η οποία επιλέχθηκε στην παρούσα διασκόπηση.



Εικόνα 3.16: Χάρτες που απεικονίζουν τις ανωμαλίες φυσικού δυναμικού σε διάφορες χρονικές στιγμές (Buselli & Lu, 2001).

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος παροδικών κυμάτων εφαρμόστηκε το Δεκέμβριο του 1998. Οι σταθμοί μέτρησης απείχαν μεταξύ τους 25m και τα πηνία 50m, προκειμένου να περικλείουν κάθε φορά κι από ένα σταθμό. Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό πακέτο SIROTEM και η επεξεργασία τους με την εφαρμογή της μεθόδου «αντιστροφής σειρών».

Ο χάρτης που προκύπτει από τα δεδομένα (εικόνα 3.17) αναφέρεται σε χρονική καθυστέρηση των 0,113msec και απεικονίζει ανάλογες δομές με αυτές που προέκυψαν από την επεξεργασία της μεθόδου ηλεκτρικής αντίστασης. Εμφανίζονται, συνεπώς, χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, παρόμοιες με αυτές που παρατηρήθηκαν από τη μέθοδο ηλεκτρικής αντίστασης.

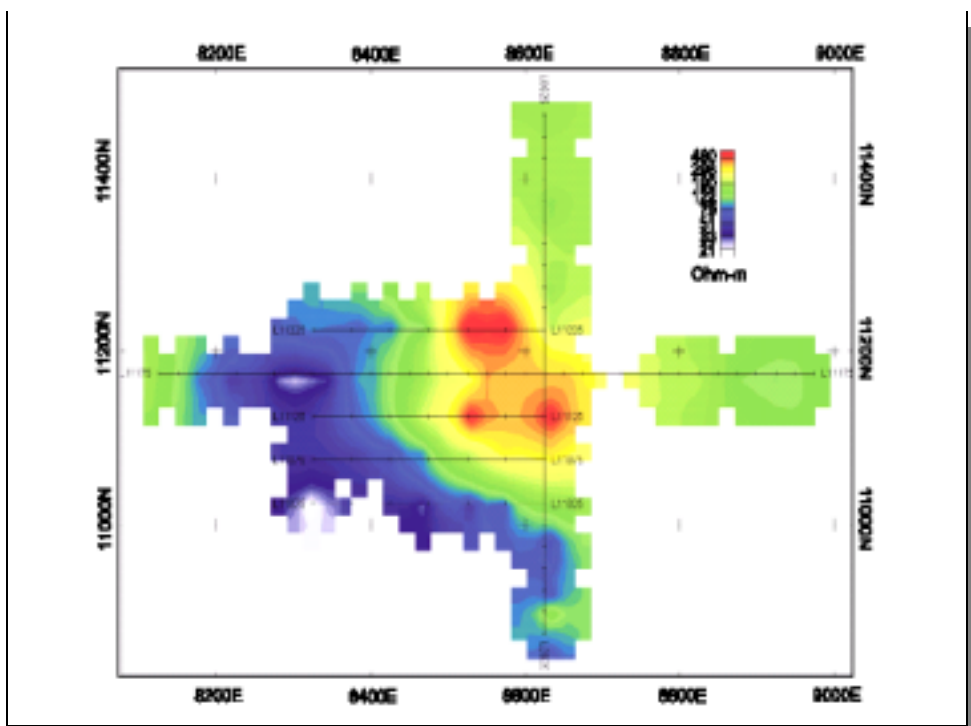


Εικόνα 3.17: Ψευδοτομή που απεικονίζει της μεταβολές φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο παροδικών κυμάτων κατά μήκος της γραμμής 11175N (Buselli & Lu, 2001).

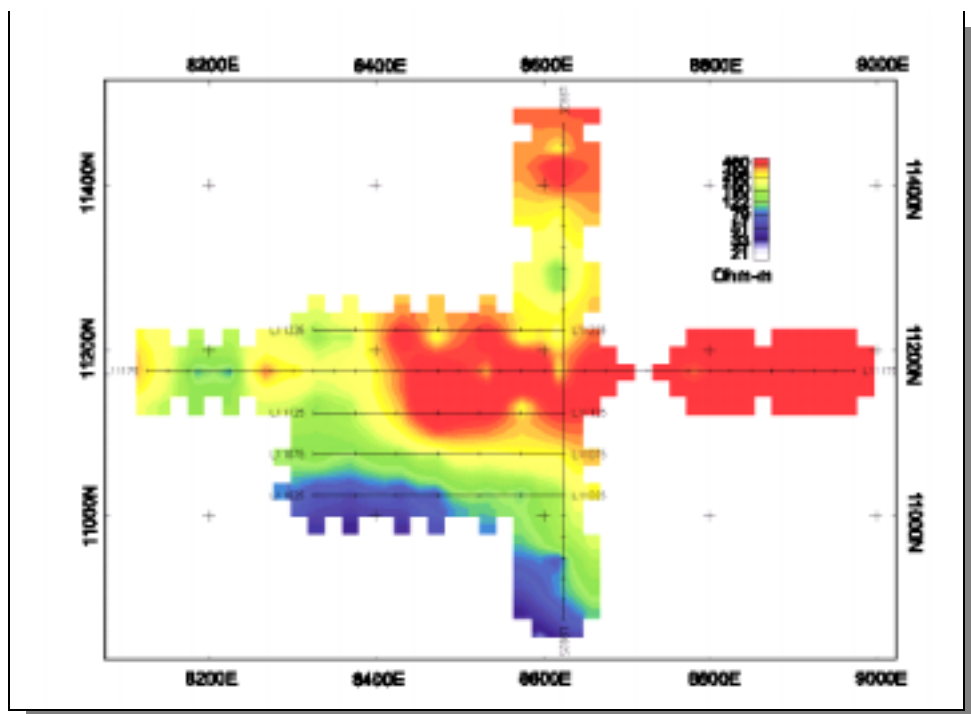
Παρατηρώντας τους επόμενους χάρτες (εικόνες 3.18-3.19), οι οποίοι απεικονίζουν τη μεταβολή της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης σε χρονική καθυστέρηση των 35 και 149μsec αντίστοιχα, γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη μίας ευρείας αγωγίμης περιοχής στα δυτικά του χώρου διασκόπησης, η οποία όμως σταδιακά (αυξάνοντας το χρόνο καθυστέρησης) καθίσταται ηλεκτρικά ανθεκτική.

Συμπερασματικά, θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι και η μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης είναι περισσότερο ευαίσθητες στις μεταβολές της αντίστασης της επιφάνειας, ενώ οι μέθοδοι των φυσικού δυναμικού και επαγόμενης πολικότητας επηρεάζονται από τις ηλεκτροχημικές ιδιότητες του εδάφους.

Τόσο τα δεδομένα των μετρήσεων φυσικού δυναμικού, όσο και αυτά της επαγόμενης πολικότητας, οριοθετούν με σαφήνεια την περιοχή της ρύπανσης. Αντίθετα, οι άλλες δύο μέθοδοι δεν προσκομίζουν ανάλογα αποτελέσματα και αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στο μικρό βάθος διασκόπησης είτε στην ανεπαρκή μεταβολή της αγωγιμότητας του υπεδάφους. Παρόλα αυτά και οι δύο (ηλεκτρικής αντίστασης - ηλεκτρομαγνητικές) δίδουν σημαντικές πληροφορίες για τη γεωλογία του υπεδάφους.



Εικόνα 3.18: Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο παροδικών κυμάτων για χρονική καθυστέρηση των 35μsec (Buselli και Lu, 2001).



Εικόνα 3.19: Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο παροδικών κυμάτων για χρονική καθυστέρηση των 149μsec (Buselli και Lu, 2001).

3.3 Ανίχνευση και οριοθέτηση ηλεκτρικά αγώγιμων περιοχών του υπεδάφους συσχετιζόμενες με την παρουσία παραγόντων ρύπανσης

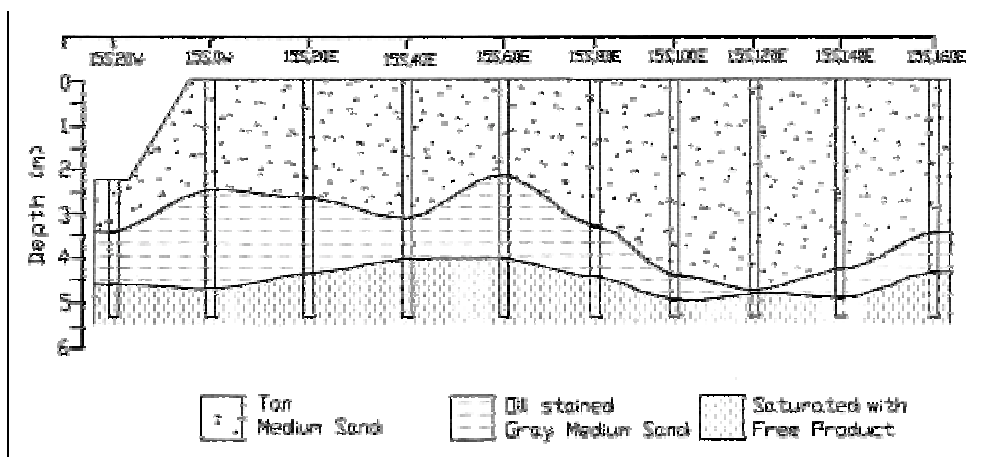
Οι Atekwana και Sauck σε διάφορες μελέτες τους ερεύνησαν την αιτία εξασθένησης των σημάτων του υπεδάφειου ραντάρ. Τα σήματα εμφανίζονται ως σκιαγραφημένες ζώνες (*shadow zones*) και συμπίπτουν με τις περιοχές ρύπανσης υδρογονανθράκων (ρύποι LNAPL). Χρησιμοποιώντας στοιχεία που προέρχονται κυρίως από το υπεδάφειο ραντάρ και τις ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις, προέκυψαν αξιόλογα συμπεράσματα σχετικά με την εμφάνιση ρύπανσης πάνω από ανώμαλη ζώνη αγωγιμότητας. Στην περιοχή μάλιστα αυτή, παρατηρείται μία σημαντική διαφοροποίηση των παραγόντων ρύπανσης, καθώς υπάρχει αλλαγή στη γεωηλεκτρική καταγραφή (από ηλεκτρικά ανθεκτικό σε αγώγιμο), σε τομές που απεικονίζουν τη φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

3.3.1 Γεωηλεκτρικές έρευνες σε περιοχή μελέτης η οποία έχει υποστεί ρύπανση από υδρογονάνθρακες (Atekwana et al., 2000)

Βασικό αντικείμενο της έρευνας αυτής είναι η αξιολόγηση της χρησιμότητας διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι γεωφυσικές τεχνικές εφαρμόζονται για τη χαρτογράφηση του υπεδάφους περιοχής αλλά και για τον εντοπισμό και την κατανομή ρύπανσης, λόγω διέλευσης υδρογονανθράκων σε ποταμό κοντά σε εγκαταστάσεις καθαρισμού στην πόλη Carson του Michigan (Η.Π.Α). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η γεωηλεκτρική καταγραφή των πλουμίων υδρογονανθράκων ποικίλλει από τη μία περιοχή στην άλλη, αφού οι ειδικές αντιστάσεις στις περιοχές ρύπανσης εμφανίζουν τιμές υψηλές ή χαμηλές.

Η εστίαση αυτής της μελέτης αφορά ένα από τα δύο πλούμια υδρογονανθράκων εύρους 229m x 82m, που παρατηρούνται από το 1945 στον ποταμό. Γεωλογικά η περιοχή χαρακτηρίζεται από ένα στρώμα χημικά αποσαθρωμένης άμμου πάχους 4,6 έως 6,1m, το οποίο μετατρέπεται σε αμμοχάλικο κάτω από την επιφάνεια του νερού και υπέρκειται ενός στρώματος αργίλου πάχους 0,6 έως 3,1m. (εικόνα 3.20). Το βάθος του πυθμένα του ποταμού σε σχέση με την επιφάνεια του νερού κυμαίνεται από 0,6-0,9 m δυτικά έως 4,6-5,8 m ανατολικά.

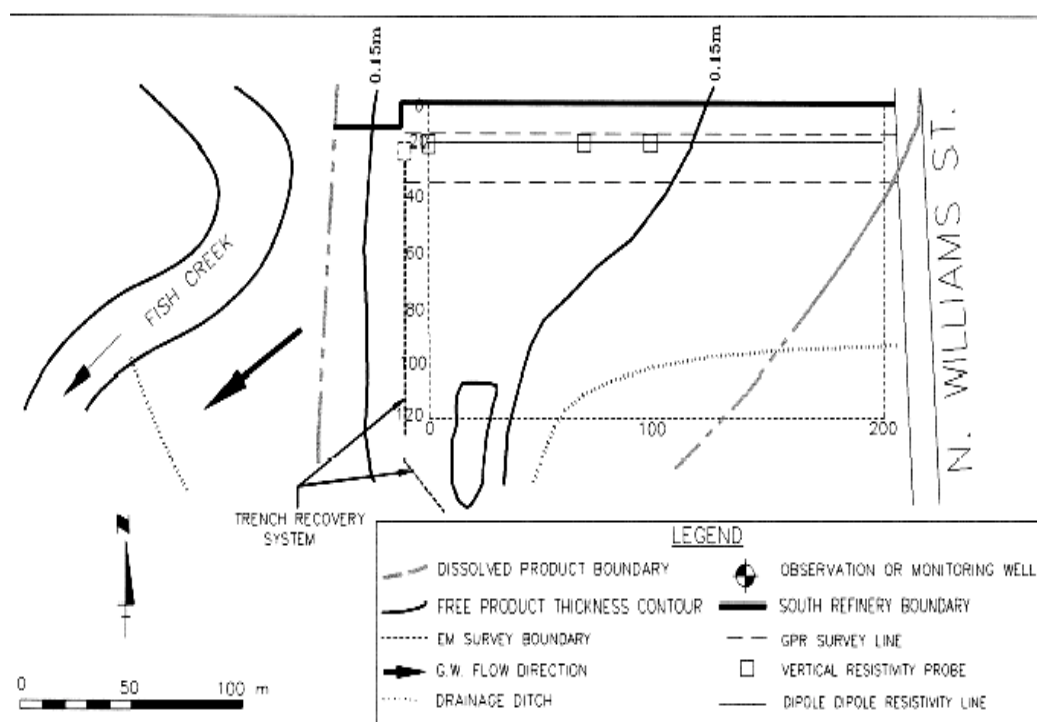
Η μεθοδολογία, η οποία ακολουθείται κατά την έρευνα, περιλαμβάνει την απόκτηση στοιχείων με χρήση υπεδάφειου ραντάρ, ηλεκτρικές μετρήσεις ειδικής αντίστασης και διασκόπηση ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Ακολουθεί σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών αποτελεσμάτων από την κάθε μέθοδο και επικύρωσή τους με στοιχεία γεωτρήσεων, που ολοκληρώθηκαν κατά μήκος μίας από τις γραμμές μελέτης γεωραντάρ 15m νότια των εγκαταστάσεων καθαρισμού.



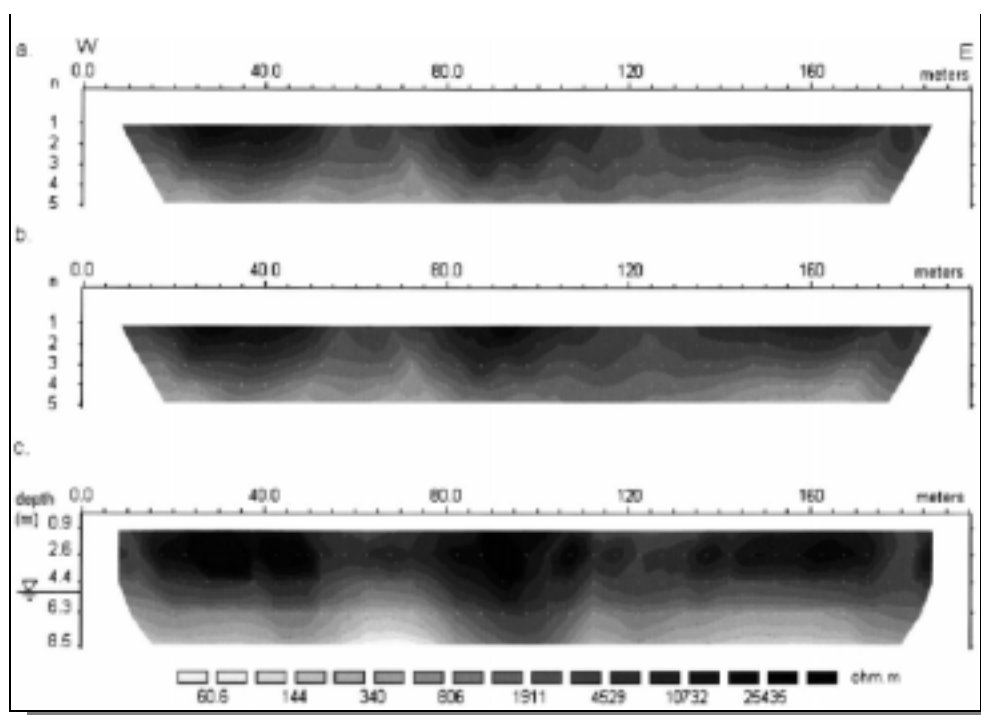
Εικόνα 3.20: Γεωλογική τομή κατά μήκος γραμμής γεωραντάρ (15 S). Τα νούμερα στην κορυφή παριστάνουν τις συντεταγμένες των γεωτρήσεων (Atekwana et al., 2000).

Πιο συγκεκριμένα οι γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόζονται έχουν ως εξής:

- ✓ Οι ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις (*vertical resistivity probes, VRP*) διεξήχθησαν σε 3 θέσεις, 20m νότια των εγκαταστάσεων καθαρισμού με ισαπόσταση ηλεκτροδίων 2,5cm (εικόνα 3.21).
- ✓ Μετρήσεις φαινόμενης ειδικής αντίστασης (*apparent electrical resistivity*) ελήφθησαν με τη διάταξη Wenner και ισαπόσταση ηλεκτροδίων 5cm (εικόνα 3.21). Οι ηλεκτρικές μετρήσεις (*2-D geoelectrical measurements*) πραγματοποιήθηκαν με διάταξη διπόλου-διπόλου και ισοδιάστημα 5m. Για την «αντιστροφή» των δεδομένων εφαρμόστηκε το λογισμικό RES2DINV. Τέλος, υπορουτίνα πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιήθηκε για να υπολογίσει το μοντέλο τιμών ειδικής αντίστασης (εικόνα 3.22).
- ✓ Δεδομένα υπεδάφειου ραντάρ αποκτήθηκαν με εξοπλισμό GSSI SIR10A με διστατικές κεραίες των 300MHz, που καταγράφουν για 160nsec (εικόνα 3.21).
- ✓ Κατακόρυφη ηλεκτρομαγνητική διασκόπηση (*electromagnetic induction*) πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μία μονάδα EM 31 Geonics (εικόνα 3.21).



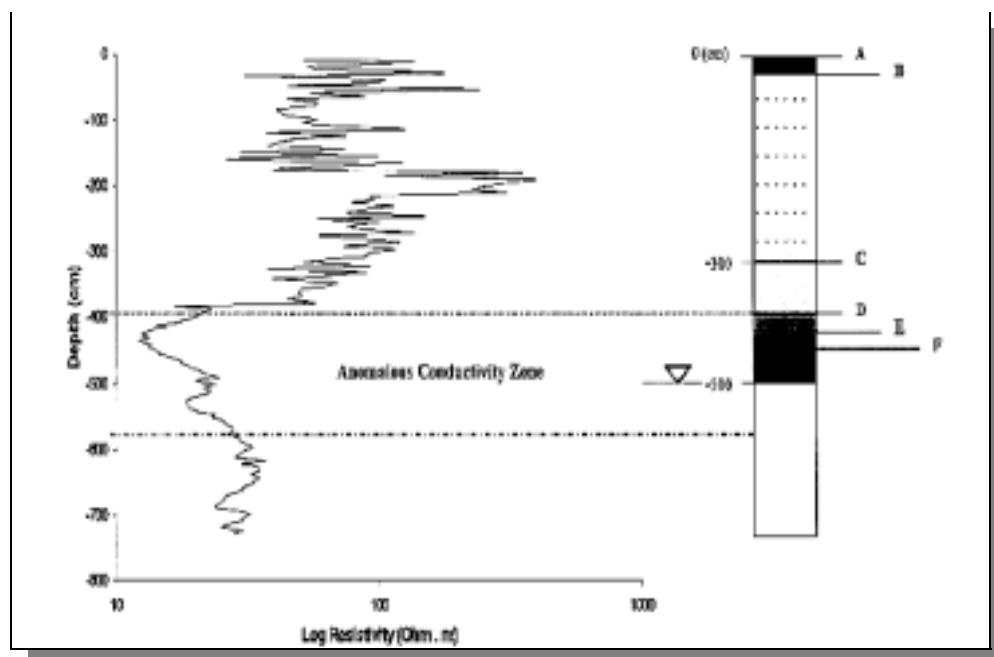
Εικόνα 3.21: Χάρτης της περιοχής μελέτης, στον οποίο απεικονίζονται τα όρια της ρυπογόνου περιοχής και οι διάφορες γραμμές μελέτης που εφαρμόστηκαν (Atekwana et al., 2000).



Εικόνα 3.22: Χάρτης που απεικονίζει μεταβολές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης με διάταξη διπόλου-διπόλου. (a) Ψευδοτομή (pseudosection) - τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης. (b) Ψευδοτομή - θεωρητικές τιμές που προκύπτουν για το μοντέλο (c) μετά από «αντιστροφή» των δεδομένων. Οι σκοτεινές αποχρώσεις αντιπροσωπεύουν χαμηλές τιμές στην κλίμακα ηλεκτρικής αντίστασης (Atekwana et al., 2000).

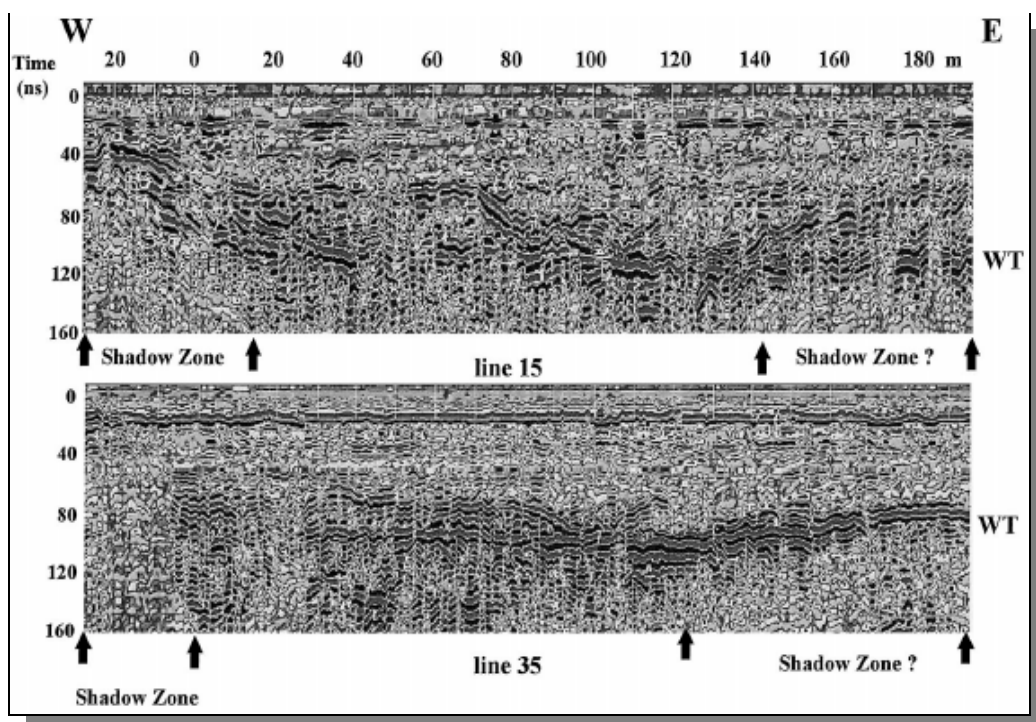
Κατάλογος τεχνικών αποτελεσμάτων:

Τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων εμφανίζουν μία ανώμαλη ζώνη αγωγιμότητας που αντιστοιχεί στο χαμηλότερο τμήμα του ελεύθερου προϊόντος υδρογονάνθρακα (*free phase*) και στο ανώτερο τμήμα της κορεσμένης ζώνης (εικόνα 3.23). Στα σημεία όπου έχει εμφανιστεί σημαντική διαφοροποίηση των παραγόντων ρύπανσης υδρογονανθράκων, υπάρχει αλλαγή στη γεωηλεκτρική καταγραφή, από ηλεκτρικά ανθεκτικό σε αγώγιμο (γεγονός πιθανώς οφειλόμενο στη βιοδιάσπαση των παραγόντων ρύπανσης) (Benson & Stubben 1995, Benson et al. 1997).



Εικόνα 3.23: Συσχέτιση μετρήσεων ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε γεωτρήσεις. Τα στρώματα του εδάφους περιγράφονται ως εξής: (A) μαύρο έδαφος οργανικού υλικού, (B) άμμος μεσαίας διαβάθμισης, (C) ανοιχτόχρωμες γκρι κηλίδες πετρελαίου με άμμο μεσαίας διαβάθμισης, (D) σκούρα γκρι χονδρόκοκκη άμμος με σημαντική παρουσία βενζίνης, (E) μαύρη χονδρόκοκκη άμμος και χαλίκια, (F) σκούρα χαλίκια κορεσμένα σε ελεύθερο προϊόν (Atekwana et al., 2000).

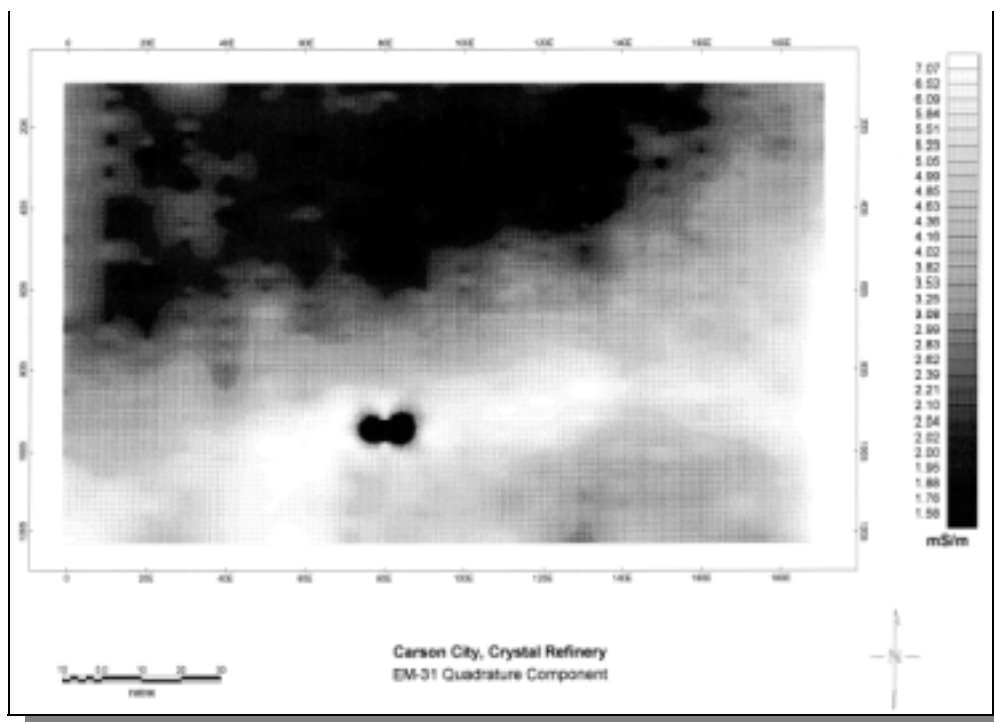
Η ψευδοτομή (2-D) ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης (εικόνα 3.22) εμφανίζει μία ακόρεστη ζώνη (*vadose zone*) με υψηλές ειδικές αντιστάσεις, που μειώνονται σε χαμηλότερες κάτω απ' τη ζώνη αυτή. Αυτή η ζώνη χαμηλότερης ειδικής αντίστασης εμφανίζεται σε μικρότερα βάθη, πράγμα το οποίο επιβεβαιώνεται και από τα στοιχεία του γεωραντάρ (*shadow zones*, εικόνα 3.24). Πιθανώς αυτό να οφείλεται στην παρουσία του ρηχού υδροφόρου ορίζοντα ή και σε άλλα αγώγιμα υπόγεια ύδατα.



Εικόνα 3.24: Τομές γεωραντάρ κατά μήκος γραμμών, οι οποίες βρίσκονται 15 και 35m αντίστοιχα βόρεια του διυλιστηρίου. Η θέση των γραμμών μελέτης απεικονίζεται στην εικόνα 3.21 (Atekwana et al., 2000).

Στα στοιχεία από το γεωραντάρ, ο ανακλαστήρας που οφείλεται στον υδροφόρο ορίζοντα απεικονίζεται πολύ καλά τόσο στα 50ns δυτικά και 80ns ανατολικά στη γραμμή 15, όσο και στα 80ns στη γραμμή 35 (εικόνα 3.24). Επιπλέον, φαίνεται ένας δεύτερος ανακλαστήρας δέκατα του νανοδευτερολέπτου επάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Από το συσχετισμό με τα δεδομένα των γεωτρήσεων, ερμηνεύεται ως ανάκλαση της κορυφής ενός γκρίζου στρώματος άμμου. Στα άκρα των τομών του γεωραντάρ οι ανακλάσεις μειώνονται κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, σε συμφωνία με την ηλεκτρική τομή (εικόνα 3.22).

Τα ηλεκτρομαγνητικά δεδομένα εμφανίζουν υψηλές τιμές αγωγιμότητας στο ανατολικό και νότιο μέρος της υπό μελέτη περιοχής (εικόνα 3.25). Αυτό οφείλεται στην αύξηση της εδαφικής υγρασίας και στο ρηχότερο υδροφόρο ορίζοντα. Οι υψηλότερες αγωγιμότητες που παρατηρούνται μπορούν να συσχετιστούν με μία τάφρο αποξήρανσης. Τέλος, καμία ανωμαλία οφειλόμενη σε ρύπανση υδρογονανθράκων δεν παρατηρείται στα στοιχεία αυτά.



Εικόνα 3.25: Χαρτογράφηση ηλεκτρομαγνητικής διασκόπησης στην περιοχή μελέτης του Κάρσον (Atekwana et al., 2000).

3.3.2 Υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας που σχετίζονται με πλούσιο ρύπον LNAPL και απεικονίζονται με ενσωματωμένες γεωφυσικές τεχνικές (Sauck et al., 1998)

Μία συστηματική γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε σε περιοχή μελέτης στην αεροπορική βάση Wurtsmith, στην πόλη Oscoda (Michigan, Η.Π.Α). Μία ποσότητα καυσίμου είχε διεισδύσει από το 1982 στο υπέδαφος, με αποτέλεσμα πρόσφατες εκθέσεις να αναφέρουν αυξημένα ποσά βενζολίου, τολουολίου, αιθυλικού βενζολίου, ενώσεων ξυλολίων, καθώς και υψηλές τιμές αγωγιμότητας των υπογείων υδάτων.

Η στρωματογραφία της περιοχής είναι ομοιόμορφη και αποτελείται από καλά διαβαθμισμένη με το βάθος άμμο, καθώς και από ένα στρώμα αργίλου πάχους 20-100ft σε βάθος 65ft. Το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα κυμαίνεται από 12 έως 17,4ft.

Βασικός στόχος της έρευνας είναι η εφαρμογή και ολοκλήρωση διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων, προκειμένου να αξιολογηθεί η αιτία της εξασθένησης των σημάτων του υπεδάφειου ραντάρ, τα οποία παρουσιάζονται με τη μορφή σκιαγραφημένων περιοχών (*shadow zones*) και συμπίπτουν με τις περιοχές ρύπανσης υδρογονανθράκων (ρύποι LNAPL).

Η μεθοδολογία η οποία ακολουθείται κατά την έρευνα περιλαμβάνει εφαρμογή υπεδάφειου γεωραντάρ, μετρήσεις ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης και διασκοπήσεις φυσικού δυναμικού σε κάναβο διαστάσεων 15,24m x 15,24m. Γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από το Γεωλογικό Ινστιτούτο Ηνωμένων Πολιτειών (USGS) διασαφηνίζουν τη στρωματογραφία του υπεδάφους, ενώ προηγούμενες έρευνες και πειράματα πεδίων προσφέρουν περισσότερες πληροφορίες για την περιοχή μελέτης.

Οι γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόζονται έχουν ως εξής:

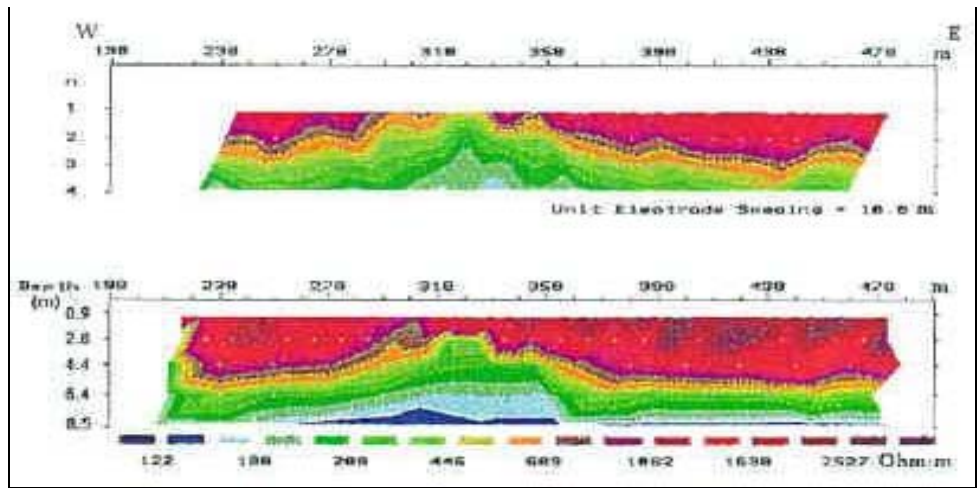
- ✓ Υπεδάφειο ραντάρ (*GPR*): οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με διστατικές κεραίες 100MHz, που καταγράφουν για 400nsec. Η απόσταση πομπού-δέκτη είναι 1,4m. Μετά την εφαρμογή φίλτρου κινητού μέσου όρου (*3-scan moving average filter*), παρήχθησαν δισδιάστατες τομές (x,z) από τα δεδομένα των μετρήσεων για περαιτέρω ερμηνεία.
- ✓ Ηλεκτρική ειδική αντίσταση (*electrical resistivity*): χρησιμοποιήθηκαν δύο γραμμές μελέτης ειδικής αντίστασης. Συγκεκριμένα, διεξήχθη χαρτογράφηση με διάταξη διπόλου-διπόλου και ηλεκτρική βυθοσκόπηση με διάταξη Schlumberger. Τα στοιχεία αποκτήθηκαν χρησιμοποιώντας το σύστημα ειδικής αντίστασης Syscal R2, ενώ και τα δύο σύνολα στοιχείων είχαν «αναστραφεί» για να παρέχουν γεωηλεκτρικές τομές.

Μία καμπύλη ειδικής αντίστασης διπόλου-διπόλου (*dipole-dipole resistivity, DDR*) συλλέχθηκε με παραμέτρους “a”: 10m και “n”: 1 έως 4. Για την «αντιστροφή» των στοιχείων που αποκτήθηκαν χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RES2DINV. Τέλος, εφαρμόστηκε υπορουτίνα πεπερασμένων διαφορών για τον υπολογισμό του μοντέλου των φαινομένων ειδικών αντιστάσεων (εικόνα 3.26), το οποίο συγκρίνεται με τα στοιχεία πειράματος πεδίου.

Τρεις ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις (*VES*) πραγματοποιήθηκαν και τα στοιχεία «αναστράφηκαν» χρησιμοποιώντας το λογισμικό SCHLINV, που δημιουργεί μοντέλο *I-D*.

Τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης συμπληρώνουν τα αποτελέσματα του υπεδάφειου ραντάρ και βοηθούν στην ερμηνεία τους, καθώς παρέχουν σημαντικές πληροφορίες στην κατανομή της κατακόρυφης ειδικής αντίστασης, που προκαλεί την εξασθένιση των σημάτων γεωραντάρ πέρα από το πλούμιο LNAPL.

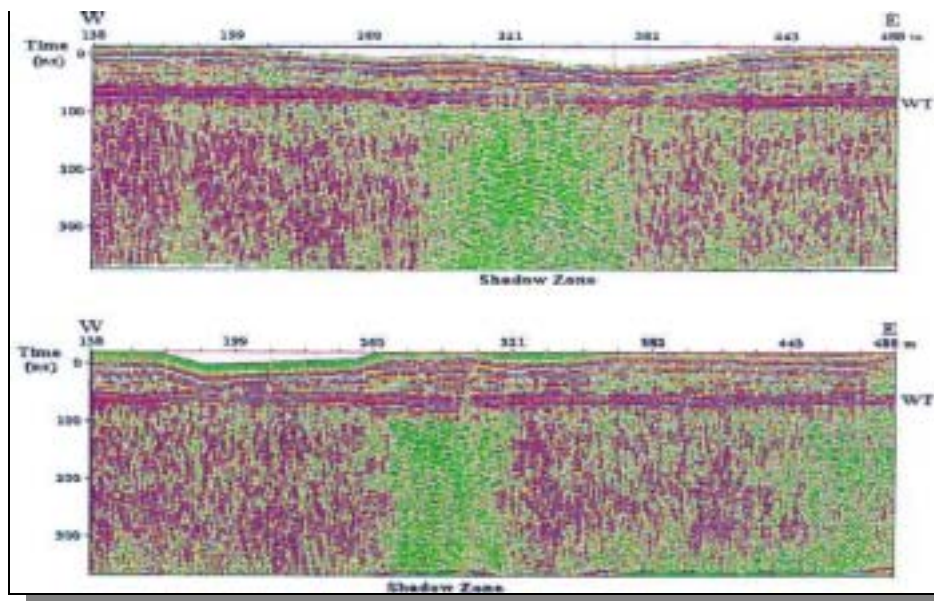
- ✓ Φυσικό Δυναμικό (*self potential, SP*): οι μετρήσεις ελήφθησαν χρησιμοποιώντας δύο μη-πολωμένα ηλεκτρόδια και ένα βολτόμετρο υψηλής σύνθετης αντίστασης. Το σύστημα του πειράματος πεδίου μέτρησε την πιθανή διαφορά μεταξύ σταθερού ηλεκτροδίου αναφοράς και κινητού ηλεκτροδίου, που τοποθετήθηκαν σε κάθε κόμβο του κανάβου μελέτης. Τα ακατέργαστα στοιχεία ερμηνεύονται χρησιμοποιώντας το σύστημα χαρτογράφησης της εταιρείας Geosoft.



Εικόνα 3.26: Γεωηλεκτρικές τομές που προκύπτουν από «αντιστροφή» των δεδομένων σε μετρήσεις ειδικής αντίστασης με διάταξη διπόλου-διπόλου (Sauck et al., 1998).

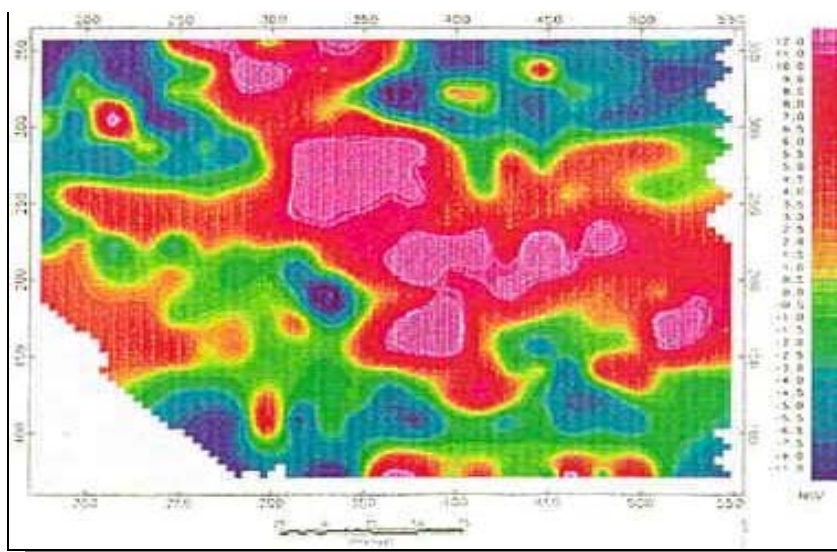
Κατάλογος τεχνικών αποτελεσμάτων:

Τα προφίλ του υπεδάφειου ραντάρ εμφανίζουν έναν πολύ ισχυρό ανακλαστήρα στα 80nsec περίπου, που ισοδυναμεί με βάθος 4,35m και είναι το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα. Το πιο ενδιαφέρον στοιχείο στην καταγραφή από το γεωραντάρ είναι μία περιοχή εξασθενημένων σημάτων-ανακλάσεων ή ζώνη σκιών (*shadow zones*) έκτασης 60-70m (εικόνα 3.27), η οποία μπορεί να συσχετιστεί στο χώρο με τη γνωστή περιοχή ρύπανσης υδρογονανθράκων, όπως καθορίζεται από τις γεωτρήσεις και τις γεωχημικές μελέτες. Η ένταση των σημάτων αρχίζει να μειώνεται όχι επάνω από την ερμηνευμένη ανάκλαση του υδροφόρου ορίζοντα, αλλά ακριβώς κάτω από αυτήν και παραμένει χαμηλή έως το τέλος της καταγραφής.



Εικόνα 3.27: Χάρτης ο οποίος απεικονίζει τις ζώνες σκιών (*shadow zones*) σε τομές γεωραντάρ και δείχνει παράλληλα την περιοχή ρύπανσης, όπως ανιχνεύεται με γεωφυσικές μεθόδους (Sauck et al., 1998).

Τα στοιχεία φυσικού δυναμικού εμφανίζουν τιμές με εύρος από + 8 mV έως + 25mV (εικόνα 3.28). Οι τιμές παρατηρούνται πέρα από τις συσχετιζόμενες περιοχές με τη γνωστή ρύπανση υδρογονανθράκων υπογείου νερού (*shadow zones*, εικόνα 3.27) και τις υψηλές αγωγιμότητες στην ψευδοτομή ηλεκτρικής αντίστασης διπόλου-διπόλου (εικόνα 3.26). Κατά συνέπεια, αυτή η μέθοδος επιβεβαιώνει ότι ένα αγωγίμο πλούμιο υπογείων νερών βρίσκεται κάτω από την ελεύθερη ζώνη ρύπανσης προϊόντων LNAPL και συμπίπτει με το διαλυμένο πλούμιο υδρογονανθράκων.



Εικόνα 3.28: Χαρτογράφηση περιοχής μελέτης με τη μέθοδο του φυσικού δυναμικού (Sauck et al., 1998).

Συμπερασματικά, η παρουσία των σκιαγραφημένων ζωνών οφείλεται στην εξασθένηση των σημάτων του γεωραντάρ, πάνω από περιοχές που παρουσιάζουν υψηλή αγωγιμότητα και συνδέονται με τη βιοδιάσπαση του πλουμίου LNAPL στο υπεδάφος. Η εξήγηση αυτή υποστηρίζεται από τα αποτελέσματα ηλεκτρικής τομογραφίας, ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων και φυσικού δυναμικού, τα οποία όλα εμφανίζουν ένα αγωγίμο σώμα στις περιοχές που συσχετίζονται με τη ρύπανση των υδρογονανθράκων. Η απουσία ρύπανσης στην ακόρεστη ζώνη μέσα στις καταγραφές του υπεδάφειου ραντάρ αποδεικνύει ότι η μέθοδος ειδικής αντίστασης είναι πιο ευαίσθητη μέθοδος ανίχνευσης της αυξημένης αγωγιμότητας των ρηχών ακόρεστων ζωνών (*vadose zones*), σε σύγκριση με τη μέθοδο του υπεδάφειου ραντάρ. Αντίθετα, η εξασθένηση των ανακλάσεων των σημάτων του γεωραντάρ αποτελεί ένα άριστο εργαλείο χαρτογράφησης της αυξημένης αγωγιμότητας κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα.

3.4 Ελεγχόμενες πειραματικές μελέτες και συνεισφορά τους στην περιγραφή μετανάστευσης ρύπων NAPL

Τα ελεγχόμενα πειράματα προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για την κατανομή της ρύπανσης μέσα σε συγκεκριμένο χώρο (*free-vapor-dissolved phase*). Μελέτες των Brewster και Orlando αποδεικνύουν τη συνεισφορά τους στη μελέτη των ιδιοτήτων του υπεδάφους και στην περιγραφή της μετανάστευσης ρύπων NAPL (βλ. Παράρτημα Α). Πολλές φορές μάλιστα το πειραματικό στάδιο πραγματοποιείται ταυτόχρονα με αντίστοιχες μετρήσεις που λαμβάνουν χώρα στο εργαστήριο. Συνήθως πάντως, όπως αναφέρεται σε δημοσιεύματα των Daniels και Grumman, δεν καταλήγουν σε ανάλογα αποτελέσματα.

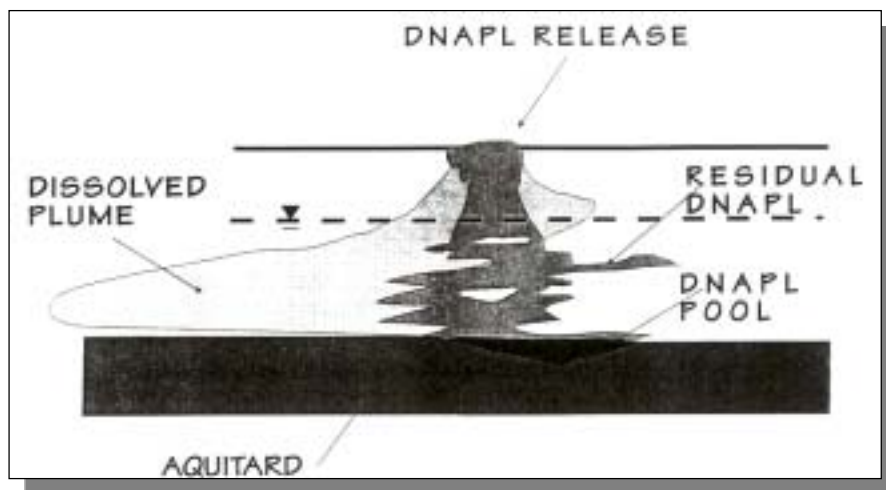
3.4.1 Παρατήρηση μετανάστευσης ρύπων DNAPL σε ελεγχόμενη διαρροή με τη βοήθεια γεωφυσικών μεθόδων (Brewster et al., 1995)

Στην καναδική βάση ενόπλων δυνάμεων κοντά στο Toronto διεξήχθη ελεγχόμενο πείραμα σε χώρο διαστάσεων 9m x 9m x 3,3m. 770lt τετραχλωροαιθυλενίου (PCE) ελευθερώθηκαν εντός της απομονωμένης περιοχής και το πείραμα παρακολουθούνταν επί 984 ώρες με τη βοήθεια πληθώρας γεωφυσικών μεθόδων.

Σκοπός του ελεγχόμενου αυτού πειράματος είναι η ανίχνευση και παρατήρηση ρύπανσης DNAPL κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, καθώς και η περιγραφή της μετανάστευσης και τελικής κατανομής της ελεγχόμενης ρύπανσης.

Οι ρύποι DNAPL, όταν ελευθερωθούν μέσα στην κορεσμένη ζώνη ταμιευτήρα, μεταναστεύουν αρχικά προς τα κάτω εξαιτίας της μεγαλύτερης τους πυκνότητας και έπειτα επεκτείνονται οριζόντια. Κατά τη μετανάστευση τέτοιου είδους ρύπανσης, ένα ποσοστό της μάζας της συγκρατείται μέσα στους πόρους του εδάφους είτε σαν «αποσυνδεδεμένη παραμένουσα φάση» (*residual phase*) είτε σαν «συνδεδεμένη φάση» που σχηματίζει λίμνες ρύπανσης (*pool phase*).

Στην εικόνα 3.29 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό σχήμα που απεικονίζει τις δύο φάσεις των ρύπων DNAPL.



Εικόνα 3.29: Σχηματική αναπαράσταση ρύπανσης DNAPL μέσα σε πορώδες μέσο. Η ρύπανση κατευθύνεται προς τα κάτω, αφήνοντας ένα ποσοστό της μέσα στους πόρους (*residual phase*) και παράλληλα σχηματίζοντας λίμνες ρύπανσης (*pool phase*) μέσα σε περισσότερα αδιαπέρατες επιφάνειες (Brewster et al., 1995).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρούσα αναφορά θα χρησιμοποιηθεί ο όρος “*pool phase*” για να περιγράψει τις συγκεντρώσεις σε τετραχλωροαιθυλένιο. Παρόλα αυτά, δεν είναι πάντα δυνατό να διακρίνουμε εάν η συγκεκριμένη φάση είναι ομογενής ή ετερογενής, εξαιτίας της όχι και τόσο καλής διακριτικής ικανότητας που παρουσιάζουν οι γεωφυσικές μέθοδοι (όχι καλύτερη από 8cm).

Η γεωλογία της περιοχής περιλαμβάνει ένα στρώμα 3,3m από καλή έως μέτρια διαβαθμισμένη άμμο, το οποίο ακολουθείται από 3m δύσκαμπτης αργίλου. Το στρώμα αργίλου ακολουθείται με τη σειρά του από μία άλλη ζώνη αργίλου 13m, στην οποία

παρεμβάλλονται ψαμμιτικά τμήματα μεγάλου πάχους και διασκορπισμένοι ψαμμιτικοί φακοί. Τα αργιλικά ορυκτά, από τα οποία αποτελείται κυρίως αυτό το στρώμα, είναι μοσχοβίτης και χλωρίτης με ίχνη από καολινίτη και σμεκτίτη. Ο ταμιευτήρας από ψαμμίτη δημιουργήθηκε από εναποθέσεις ιζημάτων σε θαλάσσιο περιβάλλον και θεωρείται σχετικά ομογενής.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι προηγούμενο ελεγχόμενο πείραμα είχε πραγματοποιηθεί στην ίδια περιοχή, σε κάναβο διαστάσεων 3m x 3m. Στην περίπτωση αυτή έγινε έγχυση μικρότερου όγκου ρύπανσης (231lt τετραχλωροαιθυλενίου) με τον ίδιο τρόπο. Μία σύγκριση μεταξύ του πρώτου και δεύτερου πειράματος απέδειξε ότι επικρατούν τελείως διαφορετικοί ρυθμοί διήθησης και μετανάστευσης της ρύπανσης μεταξύ των δύο μελετών.

Μία σειρά γεωφυσικών διασκοπήσεων με γεωραντάρ (200MHz) προηγήθηκε του δεύτερου πειράματος, έτσι ώστε να αποτυπωθούν η κατάσταση του υπεδάφους και η στρωματογραφία.

Ο χώρος που διεξήχθη το πείραμα περικλειόταν από διπλό τοίχο, προκειμένου να αποφευχθεί τυχόν ρύπανση της γύρω περιοχής. Ένας εσωτερικός (9m x 9m) και ένας εξωτερικός τοίχος (10m x 10m) κατασκευασμένοι από χαλύβδινες ενώσεις θεμελιώθηκαν σε βάθος 0,6m (στεγανός γεωλογικός σχηματισμός). Αυτή η συνδεσμολογία λειτουργούσε ως σύνορο ενάντια σε τυχόν διαρροή. Οι τοίχοι κατασκευάστηκαν από χαλύβδινες ενώσεις, σχηματίζοντας μία δομή από πασσάλους 3,9m μέσα στο υπέδαφος. Οι ενώσεις μεταξύ των πασσάλων διαμορφώθηκαν έτσι ώστε να γεμίζουν με μπεντονίτη, προκειμένου να δημιουργούν μία στεγανή περιοχή.

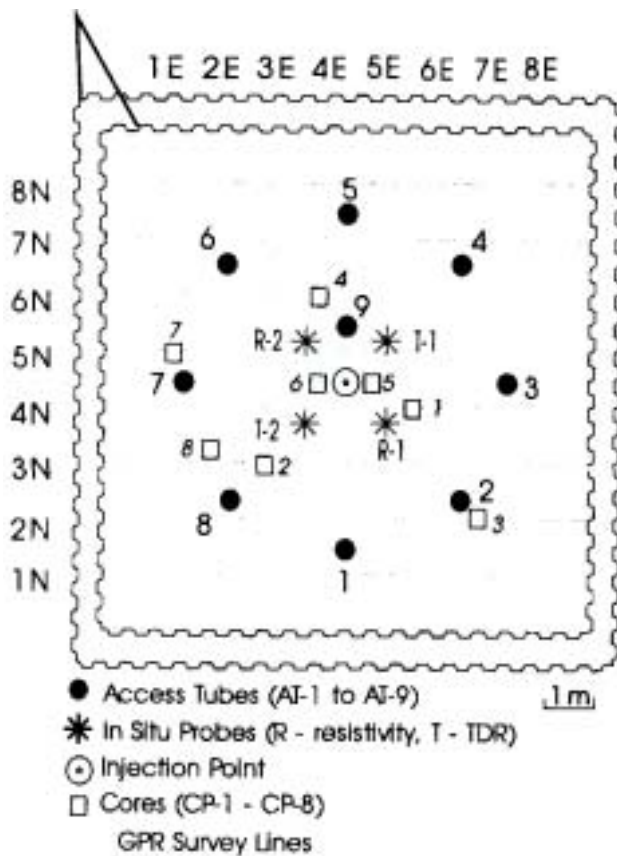
Στο εσωτερικό του χώρου, η στάθμη του νερού διατηρήθηκε στα 15cm κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Με τον τρόπο αυτό επιτευχθεί ο ολοκληρωτικός κορεσμός της περιοχής με νερό.

Τα 770lt τετραχλωροαιθυλενίου εισήχθαν στο κέντρο του χώρου διαμέσου ενός πλαστικού σωλήνα PVC διαμέτρου 6in. Ταυτόχρονα, το τετραχλωροαιθυλένιο διαποτίστηκε σε κόκκινη μπογιά ανθεκτική στο νερό, προκειμένου να διευκολυνθούν η οπτική αναγνώριση και οι φασματοφωτομετρικές μετρήσεις.

Κατά την πραγματοποίηση του πειράματος εφαρμόστηκαν οι ακόλουθες γεωφυσικές μέθοδοι:

- Υπεδάφειο ραντάρ (*ground penetrating radar*)
- Μέθοδος ανάκλασης βασιζόμενη στην παράμετρο του χρόνου (*time domain reflectometry*)

- Μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης (*in situ resistivity*)
- Ανάλυση πυρήνων δειγματοληψίας (*core analysis*)
- Διαγραφίες νετρονίου (*neutron logging*)
- Διαγραφίες πυκνότητας (*density logging*)



Εικόνα 3.30: Σχέδιο που απεικονίζει τη μορφή του χώρου και τη διάταξη των σωλήνων μέτρησης (Brewster et al., 1995).

Περίπου 1000 ώρες μετά την έναρξη του πειράματος ανακτήθηκε μια σειρά πυρήνων (CP-1 έως CP-8). Οι πυρήνες CP-1 έως CP-4 κόβονταν σε δείγματα των 5cm ο καθένας, ενώ οι υπόλοιποι (CP-5 έως CP-8) σε δείγματα των 8cm.

Το τετραχλωροαιθυλένιο που ανιχνευόταν σε κάθε δείγμα πυρήνα διοχετευόταν σε μεθανόλη, προκειμένου να πραγματοποιηθούν φασματοφωτομετρικές μετρήσεις σε μήκος κύματος 370nm. Το ποσοστό ρύπανσης μέσα στους πυρήνες μπορούσε εύκολα να εντοπιστεί βάσει καμπύλης αναφοράς (*calibration curve*) διαμορφωμένης ειδικά για τετραχλωροαιθυλένιο σε μεθανόλη.

Σε κύκλο ακτίνας 3m οκτώ σωλήνες ήταν εξίσου τοποθετημένοι γύρω από το κεντρικό σημείο έγχυσης τετραχλωροαιθυλενίου (εικόνα 3.30). Αυτοί οι σωλήνες χρησιμοποιήθηκαν για διαγραφίες νετρονίου, πυκνότητας και μετρήσεις με γεωραντάρ. Δύο βυθοσκοπήσεις ηλεκτρικής αντίστασης, δύο ανάκλασης και ένας ένατος σωλήνας τοποθετήθηκαν σε ακτίνα 1m από το σημείο έγχυσης.

Πληροφορίες από 16 γραμμές γεωραντάρ, τοποθετημένες ανά 1m, συλλέγονταν κατά τη διάρκεια ενός κύκλου μετρήσεων του πειράματος. Τα ίχνη του γεωραντάρ συλλέγονταν με βήμα διασκόπησης 5cm κατά μήκος των γραμμών αυτών. Τα δεδομένα καταγράφηκαν σε τρεις διαφορετικές συχνότητες: 200, 500 και 900MHz. Οι

πληροφορίες με την κεραία των 200MHz αποκτήθηκαν με το όργανο ΕΚΚΟ IV, ενώ στα στοιχεία των 500 και 900MHz χρησιμοποιήθηκε το γεωφυσικό σύστημα SIR-7.

Κατάλογος τεχνικών αποτελεσμάτων:

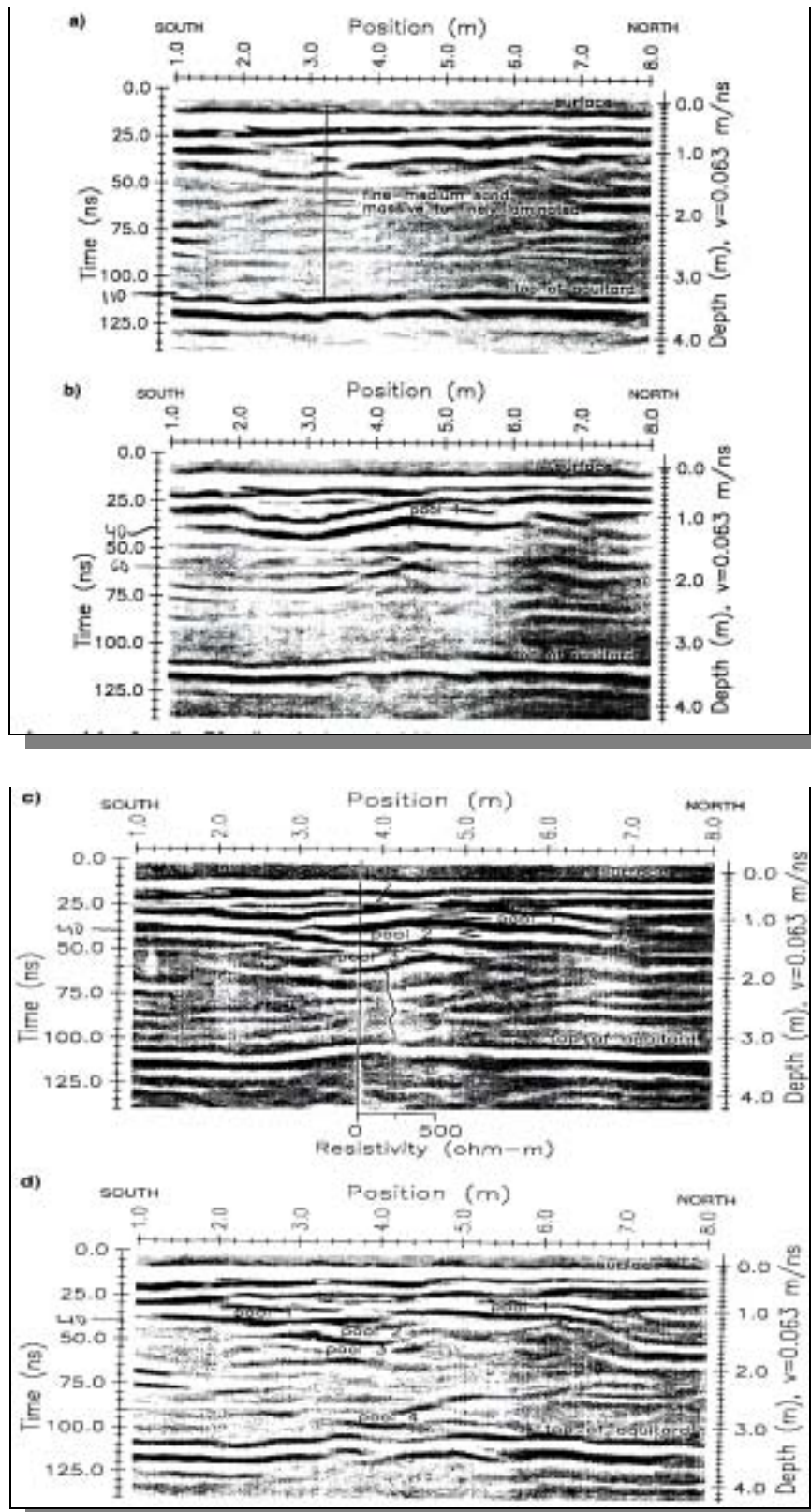
Από τη στιγμή που ξεκίνησε το πείραμα, μία ολοκληρωμένη σειρά γεωφυσικών μετρήσεων πραγματοποιούνταν κάθε 8 ώρες. Από τις μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι το τετραχλωροαιθυλένιο είχε δημιουργήσει μια λίμνη ρύπανσης πάνω σε στρώμα χαμηλής διαπερατότητας. Η λίμνη αυτή βρισκόταν σε βάθος 1m και κάλυπτε μία περιοχή μεγαλύτερη από 32m². Κατά την κατακόρυφη πορεία της μετανάστευσης, το τετραχλωροαιθυλένιο σχημάτισε επίσης 8 μικρότερες εστίες ρύπανσης. Στο τέλος του πειράματος εκτιμήθηκε ότι ένα ποσοστό, περίπου 41% του ολικού τετραχλωροαιθυλενίου, παρέμενε εγκλωβισμένο στην πρώτη λίμνη ρύπανσης που δημιουργήθηκε.

Από τα δεδομένα του γεωραντάρ, συμπεραίνουμε ότι το βάθος διείδυσης του σήματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της διακριτικής του ικανότητας. Ο ταμιευτήρας στον πυθμένα είναι σαφώς ορατός από τις πληροφορίες που λαμβάνουμε με την κεραία των 200MHz (σε βάθος 3,3m). Αντίθετα, αυτό δεν συμβαίνει για τις συχνότητες των 500 και 900MHz.

Μία μοναδική οριζόντια συγκέντρωση τετραχλωροαιθυλενίου ανιχνεύεται σε βάθος 1m περίπου (200MHz). Αυτή η συγκέντρωση ρύπανσης διακρίνεται καθαρότερα με την επεξεργασία των 500MHz. Με μεγαλύτερη ευκρίνεια μάλιστα, στα στοιχεία των 900MHz φαίνεται ότι η ρύπανση δεν είναι μία ενιαία λίμνη, αλλά αποτελείται στην πραγματικότητα από πολλαπλά λεπτά στρώματα. Είναι χαρακτηριστικό ότι το 48% - 100% των παραγόντων ρύπανσης ανιχνεύεται από το υπεδάφειο ραντάρ.

Στην ψαμμιτική περιοχή που διεξάγεται η έρευνα, τα δεδομένα των 200, 500 και 900MHz εμφανίζουν κατακόρυφη διακριτική ικανότητα 10, 4 και 2cm αντίστοιχα.

Στην εικόνα 3.31 απεικονίζονται διάφορες τομές που προκύπτουν από μετρήσεις με κεραία των 200MHz κατά μήκος της γραμμής E5. Οι μετρήσεις έγιναν πριν την έναρξη του πειράματος και 24, 110 και 984 ώρες αργότερα. Από όλες τις τομές συμπεραίνεται ότι ο ταμιευτήρας παρουσιάζεται σαν ισχυρή, συνεχής ανάκλαση σε βάθος 3,3m.

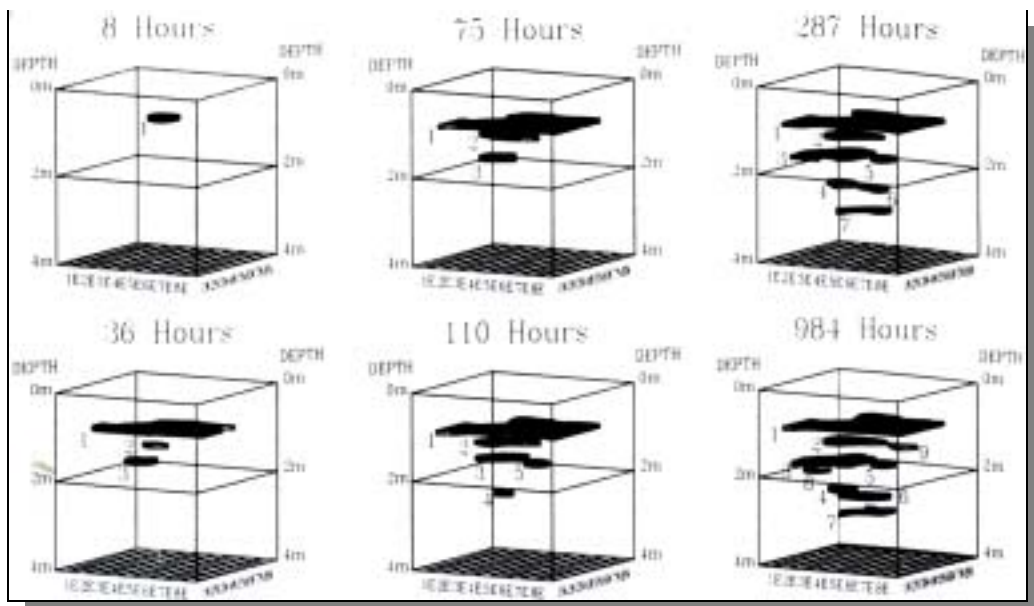


Εικόνα 3.31: Δεδομένα που συλλέχθηκαν από τη γραμμή E5: (α) πριν από την έγχυση τετραχλωροαιθυλενίου, (β) 24 ώρες μετά την έγχυση, (γ) αργότερα από 110 ώρες, (δ) μετά την πάροδο 984 ωρών από την έναρξη του πειράματος (Brewster et al., 1995).

Μετά την πάροδο 110 ωρών από την έναρξη του πειράματος (εικόνα 3.31c), μπορούν να διακριθούν στην τομή τρεις λίμνες. Η πρώτη λίμνη (*pool*) εντοπίζεται μεταξύ 25-40nsec και σε βάθος 0,9-1m. Ήδη η λίμνη αυτή έχει επεκταθεί σχεδόν σε όλο το χώρο.

Όσον αφορά τη δεύτερη και τρίτη λίμνη, αυτές εμφανίζονται σε βάθος 1,4m και 1,7m αντίστοιχα. Η δεύτερη λίμνη εκτείνεται περίπου 2m κατά τη διεύθυνση ανατολής-δύσης, ενώ η τρίτη 1,5m κατά την οριζόντια διεύθυνση. Τα πλάτη των ανακλάσεων που προκύπτουν από τις λίμνες 2 και 3 είναι ασθενέστερα σε σχέση με την πρώτη λίμνη. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι το ποσοστό της ρύπανσης, που οφείλεται στο τετραχλωροαιθυλένιο, δεν είναι τόσο σημαντικό στη δεύτερη και τρίτη λίμνη.

Η τρισδιάστατη ερμηνεία της κατανομής σε τετραχλωροαιθυλένιο (εικόνα 3.32) πραγματοποιήθηκε σε συγκεκριμένους χρόνους κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η ερμηνεία αυτή βασίζεται κυρίως σε μετρήσεις του γεωραντάρ με κεραία των 200MHz. Πρέπει όμως να σημειωθεί, ότι η τρισδιάστατη ερμηνεία δηλώνει μονάχα την παρουσία ρύπανσης σε συγκεκριμένη περιοχή και δεν δίνει καμία πληροφορία για την ποσότητα, την περιεκτικότητα ή το πάχος της ρυπογόνου μάζας. Με τον τρόπο αυτό, επομένως, εντοπίζονται μονάχα οριζόντιες, συνεχείς συγκεντρώσεις και όχι κάθετες ζώνες παραμένουσας ρύπανσης (αυτές ανιχνεύονται με μεθόδους σεισμικής ανάκλασης και ανάλυση πυρήνων).



Εικόνα 3.32: Τρισδιάστατη ερμηνεία κατανομής ρύπανσης τετραχλωροαιθυλενίου (*pool phase*) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Οι λίμνες ρύπανσης εμφανίζουν νοτιοανατολικό προσανατολισμό (Brewster et al., 1995).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων του γεωραντάρ και της ανάλυσης των πυρήνων δειγματοληψίας, καθώς οι λίμνες ρύπανσης που εμφανίζονται είναι περίπου κοινές και για τις δύο μεθόδους. Συμπερασματικά, από το συνδυασμό όλων των μεθόδων βρέθηκε ότι το κέντρο της ρύπανσης μετακινήθηκε συνολικά 0,5m νοτιοανατολικά και 1,3m προς τα κάτω. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι φυσικοί ετερογενείς παράγοντες, ακόμα και σε σχετικά ομογενές περιβάλλον, μπορούν να προκαλέσουν μία πλευρική εξάπλωση ρύπανσης DNAPL σε πολύ μεγάλες περιοχές του υπεδάφους.

3.4.2 Έρευνες με Υπεδάφειο Ραντάρ για την ανίχνευση παραγόντων ρύπανσης προϊόντων πετρελαίου (Daniels et al., 1992)

Στο εργαστήριο ηλεκτρονικής του πανεπιστημίου του Ohio (Η.Π.Α) πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα μέσα σε ένα ειδικά διαμορφωμένο χώρο από άμμο (5m x 5m x 2,9m). Σκοπός του πειράματος ήταν η χρησιμοποίηση του υπεδάφειου ραντάρ για την ανίχνευση ρύπανσης LNAPL.

Εκτός από το παραπάνω πείραμα πραγματοποιήθηκε από την ίδια ομάδα μία ελεγχόμενη έρευνα σε εργοστάσιο αποθήκευσης βενζίνης στη βόρειο Indiana (ΗΠΑ). Συνεχείς μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τον Αύγουστο, Οκτώβριο και Δεκέμβριο του 1990, καθώς και κατά τον Ιανουάριο του 1991.

Στο πρώτο πείραμα (*test pit*) μία σειρά πλαστικών δοχείων γεμάτα με κηροζίνη, νερό και αέρα έπρεπε να εντοπιστούν από το γεωραντάρ. Υπήρχαν, όμως, επιπλέον και άλλα δοχεία, τα οποία περιείχαν είτε συγκεκριμένη αναλογία μεταξύ κηροζίνης - νερού είτε άμμο κορεσμένη σε νερό και κηροζίνη. Όλα τα δοχεία είχαν περιεκτικότητα 19lt με διαστάσεις 0,305m x 0,305m x 0,229m.

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένα λεπτομερές δίκτυο γραμμών γεωραντάρ με καθεμία από τις κεραίες των 100, 300 και 500MHz, οι οποίες απείχαν μεταξύ τους 15cm. Έγινε, επίσης, χρήση μίας κεραίας στα 80MHz, αλλά παρεμβολές από αντικείμενα πάνω από την επιφάνεια κατέστησαν τα δεδομένα μη αξιοποιήσιμα.

Όλες οι πληροφορίες υπέστησαν επεξεργασία με φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (*low frequency cut-off filter*) και με φίλτρο στο χώρο κυματαριθμού -

συχνότητας (*2-D frequency-wave number filter*). Εντούτοις, παρουσιάστηκαν προβλήματα στον ακριβή καθορισμό του χρόνου πρώτων αφίξεων (*timezero*).

Από τα δεδομένα διαπιστώθηκε ότι η κεραία των 500MHz εμφάνισε ευδιάκριτες ανωμαλίες στις μετρήσεις κατά μήκος των δοχείων. Οι ανωμαλίες αυτές ήταν λιγότερο εμφανείς για τα δοχεία γεμάτα με κηροζίνη, σε σχέση με αυτά που περιείχαν νερό.

Παράλληλα, στις ενδείξεις του γεωραντάρ πάνω από τα δοχεία με κηροζίνη - αέρα διαπιστώθηκε μία αλλαγή φάσης 180° , συγκριτικά με τα δοχεία που περιείχαν νερό.

Αξίζει να αναφερθεί ότι στα στοιχεία από την κεραία των 300MHz το πλάτος των σημάτων ήταν περισσότερο ευδιάκριτο για τα δοχεία τα μερικώς γεμάτα με κηροζίνη, σε αντίθεση με τα δεδομένα από την κεραία των 500MHz.

Όσον αφορά το δεύτερο πείραμα (*field example*), πραγματοποιήθηκαν δύο γραμμές μελέτης, προκειμένου να δοθεί ερμηνεία στη μείωση του πλάτους των σημάτων που λαμβάνονταν από το γεωραντάρ. Η γραμμή Α διεξήχθη μακριά από το χώρο του εργοστασίου βενζίνης, ενώ η γραμμή C βρισκόταν στην περιοχή μέγιστης συγκέντρωσης της ρύπανσης. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων έδειξαν το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα (μετά τα 7m) και την επίδραση των εποχικών μεταβολών και της υψηλής βροχόπτωσης στις μετρήσεις του υπεδάφειου ραντάρ.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων του πανεπιστημίου του Ohio, απέδειξαν την ύπαρξη μίας υψηλής ανωμαλίας στο πλάτος του γεωραντάρ πάνω από τα πλαστικά δοχεία τα οποία ήταν γεμάτα με κηροζίνη.

Αντίθετα, οι μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στη βόρειο Indiana έδειξαν μία συσχέτιση μεταξύ της μείωσης του πλάτους των σημάτων του γεωραντάρ με την παρουσία της βενζίνης.

Πιθανή εξήγηση για την αντίθεση μεταξύ του παρατηρούμενου υψηλού πλάτους των ανακλάσεων πάνω από πηγές ρύπανσης στο εργαστηριακό πείραμα και των εξασθενημένων ανακλάσεων που εμφανίζονται στο εργοστάσιο βενζίνης, δίνεται παρακάτω:

- Το προϊόν ρύπανσης (βενζίνη) είναι πιθανόν να περιέχεται σε μικρές, διασκορπισμένες συγκεντρώσεις μέσα στην ακόρεστη ζώνη (*vadose zone*).
- Τα προϊόντα των υδρογονανθράκων που δημιουργούν ρύπανση είναι δυνατόν να εμφανίζουν υψηλό βαθμό εξασθένησης. Αυτή η αιτιολόγηση θα μπορούσε να ερμηνεύσει τόσο την παρατηρούμενη μείωση στο πλάτος των ηλεκτρομαγνητικών

κυμάτων που διαδίδονται μέσω των τριχοειδών αγγείων, όσο και το υψηλό ποσοστό ανάκλασης που εντοπίζεται στους κορεσμένους υδρογονάνθρακες.

3.4.3 Πειράματα για την ανίχνευση οργανικών παραγόντων ρύπανσης στην ακόρεστη ζώνη «vadose zone» (Grumman et al., 1995)

Κατά το έτος 1993 διεξήχθησαν πειραματικές μελέτες σε πρατήρια βενζίνης σε περιοχές κοντά στο Cleveland, Ohio και στη βόρειο Indiana των ΗΠΑ, τα οποία έκλεισαν εξαιτίας διαρροής υδρογονανθράκων. Στις περιοχές αυτές παρατηρήθηκε βενζίνη με τη μορφή ελεύθερης φάσης, καθώς και ρύπανση με τη μορφή ατμού. Η στρωματογραφία των περιοχών χαρακτηρίζεται ως ομοιόμορφη και ημι-ομοιογενής (*semi-homogenous*).

Οι έρευνες με χρήση υπεδάφειου ραντάρ είχαν σαν σκοπό την παρατήρηση της ικανότητας του γεωραντάρ να ανιχνεύσει την παρουσία ρύπανσης με τη μορφή ελεύθερης φάσης (*free phase*) και φάσης ατμού (*vapor phase*). Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν ελεγχόμενα πειράματα προκειμένου να αξιολογηθεί η ευαισθησία του γεωραντάρ σε οργανικούς ρυπογόνους παράγοντες κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες.

Οι εργαστηριακές μελέτες με το γεωραντάρ διεξήχθησαν σε πολλαπλές γραμμές με ισαπόσταση γραμμών 0,6m. Οι κεραίες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν συχνότητες 300MHz, 100MHz και 80MHz. Η ψηφιακή επεξεργασία των μετρήσεων του υπεδάφειου ραντάρ περιελάμβανε ρύθμιση ενίσχυσης (*simple time varying gain adjustment*) και ειδικό φίλτρο για τη μείωση θορύβου χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων. Οι δισδιάστατες και τρισδιάστατες τομές χρησιμοποιήθηκαν για περαιτέρω ερμηνεία.

Στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε υπό ελεγχόμενες συνθήκες, χρησιμοποιήθηκε δεξαμενή από πλεξιγκλάς, προκειμένου να αξιολογηθεί η διακριτική ικανότητα του υπεδάφειου ραντάρ σε διάφορα εδάφη, ποσοστά εδαφικής υγρασίας και ρυπογόνους παράγοντες. Τα ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν νερό, βενζίνη και καύσιμο τύπου ντίζελ. Η δοκιμή γεωραντάρ εκτελέσθηκε με κεραίες συχνότητας 500MHz ή 900MHz πάνω από τη δεξαμενή και στη μία πλευρά της. Τα στοιχεία συλλέχθηκαν

χρησιμοποιώντας 17 έως 20 γραμμές μελέτης και επεξεργάστηκαν έτσι ώστε να προκύψουν δισδιάστατες και τρισδιάστατες τομές.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων του γεωραντάρ πραγματοποιήθηκαν πρόσθετες γεωτρήσεις και χημικές δοκιμές για αρκετές ημέρες. Οι εργασίες αυτές είχαν σαν σκοπό να προσφέρουν πληροφορίες για την κατανομή της ρύπανσης συναρτήσει του χρόνου.

Οι τρισδιάστατες αναλύσεις από τα στοιχεία της περιοχής της βορειοδυτικής Indiana, εντοπίζουν μια ευδιάκριτη περιοχή ασθενών ανακλάσεων του γεωραντάρ, η οποία συμπίπτει με την περιοχή της παρατηρηθείσας ρύπανσης υδρογονανθράκων σύμφωνα με τις γεωτρήσεις παρακολούθησης.

Τα στοιχεία από την περιοχή του Cleveland ωστόσο, δεν παρουσίασαν καμία αντιστοιχία με την ελεύθερη φάση και τη φάση ατμού της ρύπανσης που εντοπίζονται στην περιοχή.

Συμπερασματικά, μπορεί να αναφερθεί ότι ο παράγοντας ο οποίος αναφέρεται ως “*vapor phase*”, είναι ικανός να διαδραματίσει πρωτεύοντα ρόλο στη μετανάστευση οργανικής ρύπανσης διαμέσου της ακόρεστης ζώνης (*vadose zone*). Η ανίχνευση, όμως, αυτής της διαδικασίας δεν είναι εφικτή με τη χρήση του γεωραντάρ. Για αυτόν ακριβώς το λόγο απαιτούνται περισσότερα ελεγχόμενα πειράματα.

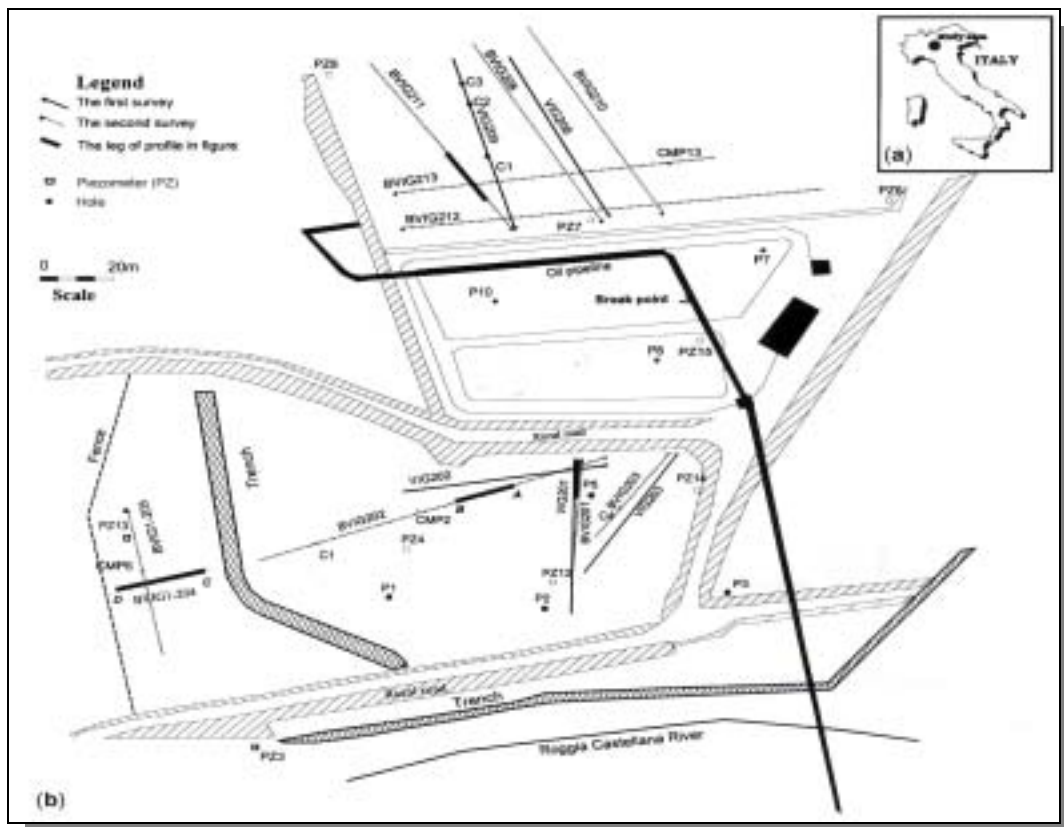
Τα αποτελέσματα των πειραματικών και ελεγχόμενων μελετών δείχνουν ότι πραγματικά εμφανίζονται ευδιάκριτες αλλαγές στις μετρήσεις του γεωραντάρ, πάνω από περιοχές που χαρακτηρίζονται από οργανική ρύπανση. Τα πειραματικά δεδομένα αποδεικνύουν ότι οι τρισδιάστατες τομές που προκύπτουν μπορούν να συνεισφέρουν στην ερμηνεία των εδαφολογικών συνθηκών, συμπεριλαμβανομένης και της οργανικής ρύπανσης, όταν φυσικά επικρατούν ευνοϊκές συνθήκες. Σε αντίθεση, οι αρχικές ενδείξεις από την ελεγχόμενη μελέτη, δείχνουν ότι τα αποτελέσματα της οργανικής ρύπανσης μέσα στη ακόρεστη ζώνη είναι δύσκολο να αποκρυπτογραφηθούν με τη χρησιμοποίηση μονάχα του υπεδάφειου ραντάρ.

3.4.4 Ανίχνευση και ανάλυση ρύπανσης LNAPL μέσω του Υπεδάφειου Ραντάρ, χρησιμοποιώντας τα μεγέθη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων «στιγμαίο πλάτος, φάση και συχνότητα» (Orlando, 2002)

Στη βόρεια Ιταλία μία ολόκληρη περιοχή υπέστη ρύπανση από βενζίνη και πετρέλαιο τύπου ντίζελ λόγω διαρροής σε αγωγό πετρελαίου (εικόνα 3.33). Η αποκατάσταση του χώρου ξεκίνησε αρκετά χρόνια αργότερα.

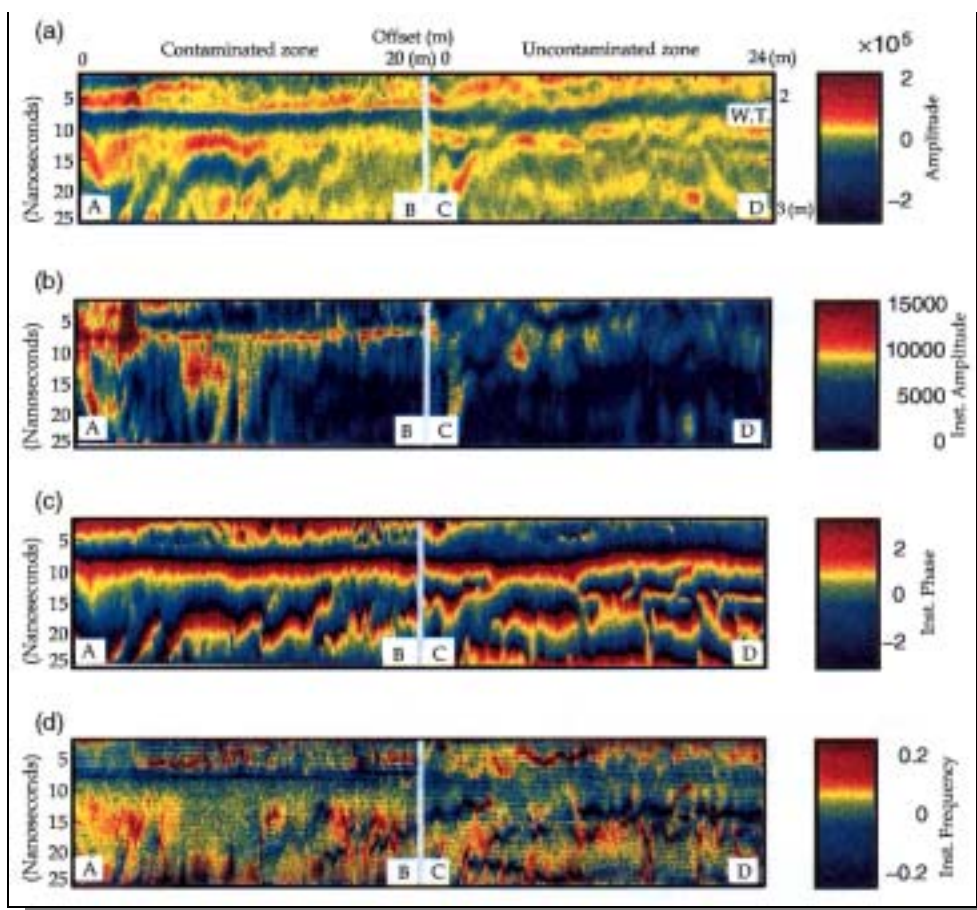
Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να τονιστεί η συνεισφορά της μεθόδου του γεωραντάρ στην ανίχνευση ρύπανσης LNAPL και τον καθορισμό του πάχους του στρώματος, το οποίο έχει υποστεί τη ρύπανση. Είναι σημαντικό η έρευνα να περιλαμβάνει τόσο ρυπογόνες, όσο και μη ρυπογόνες περιοχές, ώστε να μπορεί να γίνει σαφέστερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων (εικόνα 3.33).

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από αλλουβιακά ιζήματα με εναλλαγές διαπερατών και αδιαπερατών στρωμάτων άμμου και χαλικιών ποικίλου πάχους.



Εικόνα 3.33: (a) Περιοχή μελέτης στη βόρεια Ιταλία. (b) Χάρτης που απεικονίζει την τοποθεσία των γραμμών μελέτης και των πιεζομέτρων (PZ). Στο νότιο τμήμα της υπό μελέτη περιοχής, μία τάφρος χωρίζει τη ρυπογόνο από τη μη-ρυπογόνο περιοχή. Οι γραμμές μελέτης BVIG1-205 και BVIG1-204 πραγματοποιήθηκαν στη μη-ρυπογόνο περιοχή, ενώ οι υπόλοιπες στη ρυπογόνο (Orlando, 2002).

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μελέτη, διεξήχθησαν δύο έρευνες με υπεδάφειο ραντάρ (1996-1997, δύο χρόνια μετά το συμβάν) κατά την τελική φάση της αποκατάστασης. Ακολούθησε σύγκριση των τομών του γεωραντάρ, οι οποίες προήλθαν από την ίδια γραμμή μελέτης, αλλά σε διαφορετικούς χρόνους και για διαφορετικό πάχος ρύπανσης LNAPL (εικόνα 3.34).



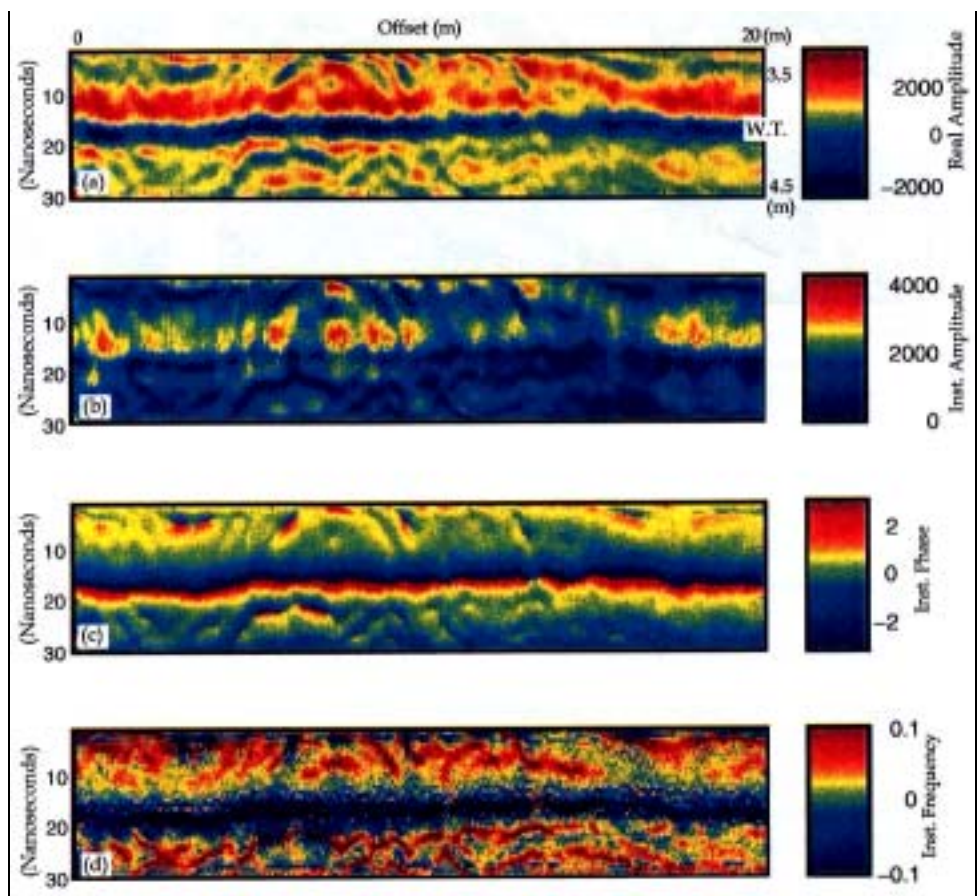
Εικόνα 3.34: Το αριστερό τμήμα των τομών (A-B) αντιστοιχεί σε δεδομένα που ελήφθησαν από τη ρυπογόνο περιοχή κατά μήκος της γραμμής μελέτης BVIG202. Αντίθετα, το δεξί τμήμα (C-D) αναφέρεται στη μη-ρυπογόνο περιοχή BVIG204. Στις τομές απεικονίζονται τα μεγέθη: (a) Πραγματικό πλάτος, (b) Στιγμιαίο πλάτος, (c) φάση και (d) συχνότητα (Orlando, 2002).

Παράλληλα, κατασκευάστηκαν θεωρητικά μοντέλα με βάση τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Με τον τρόπο αυτό έγινε δυνατός ο υπολογισμός των αναμενόμενων τομών του γεωραντάρ και η σύγκρισή τους με τις πραγματικές τομές που προέκυψαν από την έρευνα.

Για την πραγματοποίηση της γεωφυσικής διασκόπησης χρησιμοποιήθηκε το όργανο PulseEKKO 100, εφοδιασμένο με κεραία των 200MHz. Για την απαλοιφή του

θορύβου και την καλύτερη επεξεργασία των δεδομένων, εφαρμόστηκαν στις τομές του γεωραντάρ φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (70-180 MHz) καθώς και εκθετική ενίσχυση (βλ. Κεφάλαιο 5).

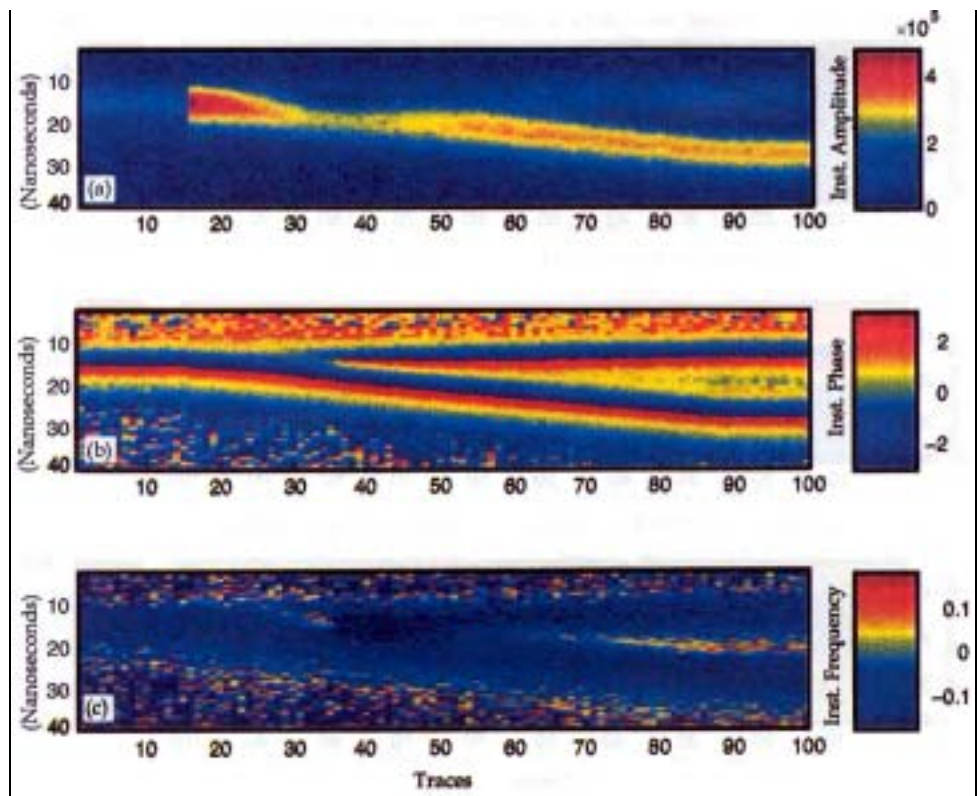
Από τη μελέτη της περιοχής διαπιστώθηκε ότι το βόρειο τμήμα της χαρακτηρίζεται από περιορισμένη ρύπανση (εικόνα 3.35). Αντιθέτως, στη νότια ζώνη η ρύπανση εντοπίστηκε τόσο κατά την πρώτη, όσο και κατά τη δεύτερη διασκόπηση. Στην προβληματική νότιο περιοχή οι ταχύτητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, στο τμήμα πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, είναι σαφώς μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές της περιοχής χωρίς ρύπανση (εικόνα 3.34). Παράλληλα, οι ανακλάσεις των σημάτων του γεωραντάρ, που προέρχονται από τον υδροφόρο ορίζοντα, παρουσιάζουν μεγαλύτερο πλάτος στη ρυπογόνο ζώνη, γεγονός που δεν μπορεί να αποδοθεί σε γεωλογικούς παράγοντες.



Εικόνα 3.35: Τομές που συλλέχθηκαν στο βόρειο τμήμα της περιοχής. Το πιεζόμετρο PZ7 εμφάνισε ρύπανση από βενζίνη πάχους 0,3 m. Στο σχήμα απεικονίζονται τα μεγέθη: (a) Πραγματικό πλάτος, (b) Στιγμιαίο πλάτος, (c) φάση και (d) συχνότητα (Orlando, 2002).

Όσον αφορά το σχεδιασμό των θεωρητικών μοντέλων, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν το είδος της ρύπανσης και η χρονική στιγμή της μέτρησης. Διαπιστώθηκε, ωστόσο, ότι αν και η στιγμιαία φάση του σήματος του γεωραντάρ τονίζει ικανοποιητικά τους ανακλαστήρες, στην περίπτωση αυτή δεν παρουσιάζει σημαντική διαφοροποίηση στις ανακλάσεις που εμφανίζονται πάνω στον υδροφόρο ορίζοντα.

Συμπερασματικά, αναφέρουμε ότι τόσο το πάχος μίας ρυπογόνου περιοχής, όσο και οι πλευρικές διακυμάνσεις της, μπορούν να προσδιοριστούν με ακρίβεια από τη συνδυασμένη μελέτη των τριών μεγεθών του σήματος του ραντάρ (στιγμιαίο πλάτος, συχνότητα, φάση) και από την τιμή του πλάτους της ανάκλασης (εικόνα 3.36). Στη συγκεκριμένη μάλιστα μελέτη υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ θεωρητικών και πραγματικών αποτελεσμάτων.



Εικόνα 3.36: Τομές που προέκυψαν από την εφαρμογή των στιγμιαίων μεγεθών: (a) πλάτους, (b) φάσης και (c) συχνότητας στα δεδομένα του υπεδάφειου γεωραντάρ (Orlando, 2002).

3.5 Άλλες γεωφυσικές τεχνικές

Εκτός από τις καθιερωμένες γεωφυσικές μεθόδους που εφαρμόζονται σε κάθε περίπτωση, δηλαδή το υπεδάφειο ραντάρ, τις ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις και τη μέθοδο σεισμικής ανάκλασης, χρησιμοποιούνται πλέον και άλλες τεχνικές, οι οποίες στοχεύουν στην επεξεργασία διαφορετικών παραμέτρων. Παράδειγμα αποτελεί η αναφορά των Lanz και Cardarelli για τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης, κατά την οποία αναλύονται οι ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων και εντοπίζονται οι περιοχές ρύπανσης ανάλογα με το εύρος των ταχυτήτων. Σε άλλες μελέτες, όπως αυτή των Benson et al., παρουσιάζεται η τεχνική μετρήσεων της γωνίας κλίσης, η οποία σε συνδυασμό με αυτή της ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να προσφέρει σημαντικά στοιχεία. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί η προσπάθεια διεξαγωγής αερομαγνητικών μεθόδων για την οριοθέτηση περιοχών ρύπανσης. Παρόλο που σύμφωνα με τους Doll et al. οι μέθοδοι αυτές δεν μπορούν να συναγωνιστούν τις αντίστοιχες επίγειες τεχνικές, είναι σε θέση να προσφέρουν μία αρχική εκτίμηση της υπό μελέτη περιοχής.

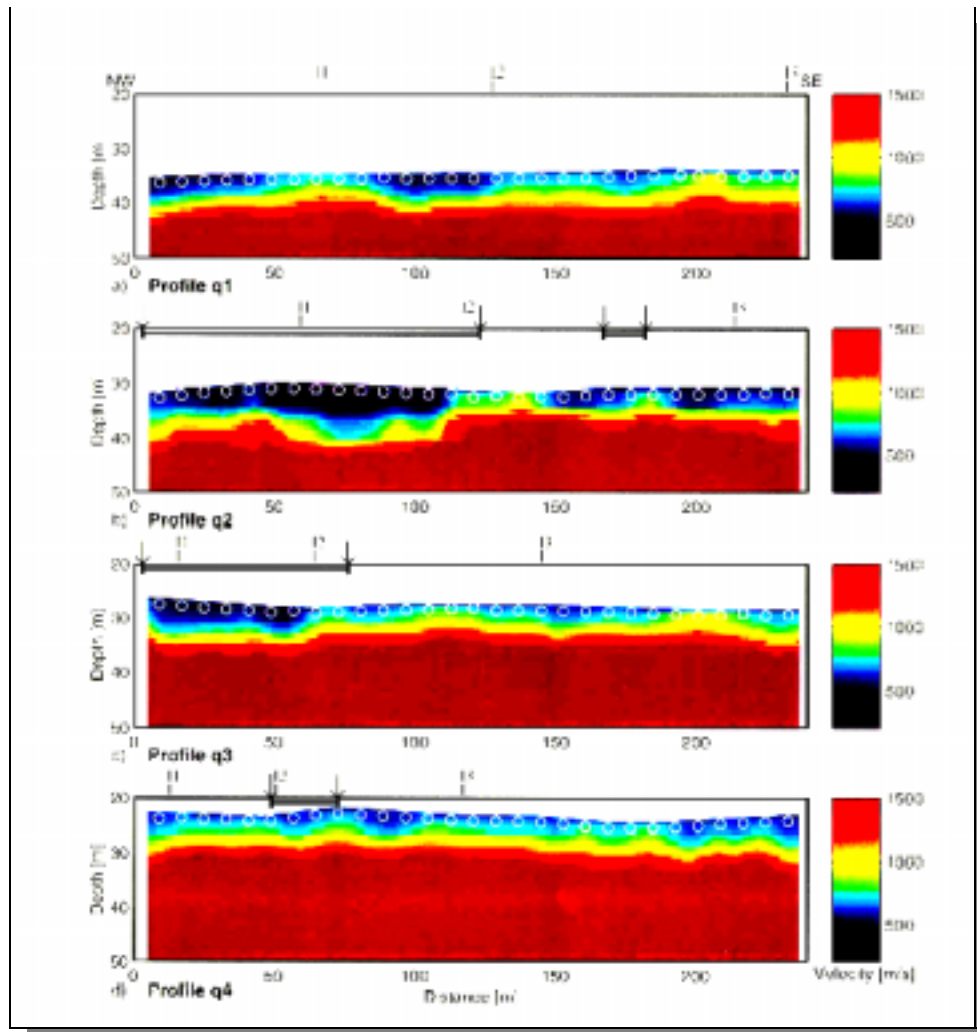
3.5.1 Τομογραφία Διάθλασης πάνω από μία θαμμένη περιοχή απόρριψης αποβλήτων (Lanz et al., 1998)

Βασικός στόχος της έρευνας είναι ο ακριβής προσδιορισμός του βάθους και της γεωμετρίας των πλευρικών και χαμηλότερων ορίων σε δύο χώρους υγειονομικής ταφής (βιομηχανικά απορρίμματα, χημικές ουσίες και απόβλητα πετρελαίου) στο αλπικό συγκρότημα της Ελβετίας (σύμπλεγμα αμμοχάλικου). Εφαρμόζεται η τεχνική της τομογραφίας διάθλασης (*refraction tomography*), ενώ η μεθοδολογία η οποία ακολουθείται περιλαμβάνει κατά σειρά: έρευνα πεδίου κατά τη διάρκεια της νύχτας, ανάλυση των στοιχείων καταγραφής, επανάληψη έρευνας τομογραφίας, αντιστροφή των στοιχείων και ερμηνεία των παραγόμενων τομογραμμάτων.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αποκατάσταση των «επικίνδυνων» χώρων υγειονομικής ταφής απαιτεί την ακριβή γνώση των ορίων, του βάθους, της φύσης και της θέσης των αποβλήτων, καθώς και της παρουσίας υδροφόρου ορίζοντα μέσα ή κάτω από το συγκεκριμένο χώρο.

Κατά την έρευνα χρησιμοποιήθηκαν 100gr δυναμίτη (σεισμική πηγή), γεώφωνα των 30Hz με μήκος καταγραφής 0,5sec (δέκτης), διάστημα δειγματοληψίας στα

0,25msec και ισαπόσταση δεκτών 2 ή 4m σε 120 ή 210 κανάλια αντίστοιχα. Τα τελικά τομογράμματα (εικόνα 3.37) παρήχθησαν με τη βοήθεια αλγορίθμου, ο οποίος χρησιμοποιεί πεπερασμένες διαφορές για την αριθμητική επίλυση της κυματικής εξίσωσης (περιγράφει τα κινηματικά στοιχεία – *eikonal solver*) σε 2D ετερογενές μέσο, καθώς και μεθόδου «αντιστροφής», που ενσωματώνει κατάλληλα φίλτρα απαλοιφής.



Εικόνα 3.37: Τελικά τομογράμματα όπως προέκυψαν από τις τομές q1-q4. Οι κύκλοι στα σχήματα απεικονίζουν την τοποθεσία των μετρήσεων (κάθε 8m), ενώ τα βέλη τα σύνορα της περιοχής ρύπανσης, που εντοπίστηκε με μαγνητικές, ηλεκτρομαγνητικές και μετρήσεις γεωραντάρ. Οι θέσεις L1 έως L2 δείχνουν τα κοινά σημεία των τομών τους εντός της γραμμής μελέτης. Όλα τα δεδομένα αποκτήθηκαν 400m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (Lanz et al., 1998).

Για την επικύρωση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκε συσχέτιση μεταξύ των συνθετικών στοιχείων και των παρατηρηθέντων χρόνων διαδρομής, όπως επίσης και σύγκριση των συσχετιζόμενων διαγραμμάτων ταχύτητας -

βάθους, που εξάγονται από τα κοινά σημεία των τομών τους. Η ευαισθησία στο $1-D$ μοντέλο εισόδου για την $2-D$ «αντιστροφή» εξετάστηκε στο μεγαλύτερο μέρος του ετερογενούς συνόλου των δεδομένων και έδειξε ότι τα αποτελέσματα είναι παρόμοια. Τέλος, συλλέχθηκαν στοιχεία μεταβολής της μαγνητικής βαθμίδας (*ground magnetic gradient*), μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και στοιχεία υπεδάφειου ραντάρ, τα οποία βοήθησαν στον καθορισμό των πλευρικών ορίων των χωματερών (εικόνα 3.37).

Βάσει των πληροφοριών ταχύτητας, τα μέγιστα βάθη των δύο χωματερών είναι περίπου 11m για το δυτικό χώρο υγειονομικής ταφής και 9m για τον αριστερό (συνήθως μεταξύ 2 και 6m). Τα υπόγεια νερά ρέουν βορειοδυτικώς και ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε βάθος 3 έως 5m.

Η μεγαλύτερη μείωση της ταχύτητας συνδέεται με τους χώρους υγειονομικής ταφής, αλλά μπορεί να εμφανιστεί ακόμα και σε αδιατάρακτη περιοχή. Στην περίπτωση αυτή οφείλεται στην παρουσία φακών και καναλιών αμμοχάλικου.

Τεχνικές δυσκολίες, που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια των ερευνών, αποτελούν το θορυβώδες περιβάλλον (απόκτηση στοιχείων κατά τη διάρκεια της νύχτας), ο μεγάλος αριθμός των κοντινά εγκατεστημένων γεωφώνων, οι πολλαπλές πηγές ενέργειας στο υπέδαφος και οι ισχυρές πρώτες αφίξεις των σεισμικών κυμάτων. Επιπλέον, η διακριτική ικανότητα ήταν χαμηλότερη σε σύγκριση με τη μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης. Το γεγονός, όμως, αυτό σπάνια παρέχει πληροφορίες για τα χαλαρά ιζήματα.

Περιορισμούς, επίσης, στην εφαρμογή της τεχνικής της τομογραφίας διάθλασης αποτελούν: η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων απαλοιφής κατά τη διαδικασία της «αντιστροφής», η πλευρική διακριτική ικανότητα, η οποία εξαρτάται από την απόσταση πηγής - δέκτη και από το μέγεθος των στοιχειωδών περιοχών από τα οποία αποτελείται η περιοχή μελέτης, καθώς και η δυσκολία να διακριθούν οριζόντιες ρηχές ζώνες χαμηλής ταχύτητας, που εκτείνονται πλευρικά και βρίσκονται ανάμεσα σε στρώματα μεγαλύτερης ταχύτητας.

3.5.2 Μελέτες προσδιορισμού των παραμέτρων σε απορρίψεις αστικών αποβλήτων (Cardarelli & Bernabini, 1997)

Βασικό αντικείμενο της μελέτης αυτής είναι η αξιολόγηση της χρήσης και εφαρμογής διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων σε έρευνες κοντά στην επιφάνεια για τον καθορισμό των γεωμετρικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τους χώρους υγειονομικής ταφής.

Η μελέτη εστιάζεται σε δύο περιοχές απόρριψης αστικών αποβλήτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά και σε διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Στην πρώτη περιοχή (Caprarola) έχει διαπιστωθεί απόρριψη σε ένα παλαιό λατομείο ηφαιστειακών σχηματισμών (ηφαιστειακές τέφρες). Η μόνιμη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται 50m κάτω από την επιφάνεια. Στη δεύτερη περιοχή (Pisana) ο χώρος απόθεσης αποβλήτων είναι καλυμμένος με λάσπη άμμου και πηλού και βρίσκεται σε πρώην λατομείο αδρανών υλικών, σε ετερογενή ποτάμιο-λιμναίο σχηματισμό. Η θέση και το πάχος της απόρριψης είναι άγνωστες.

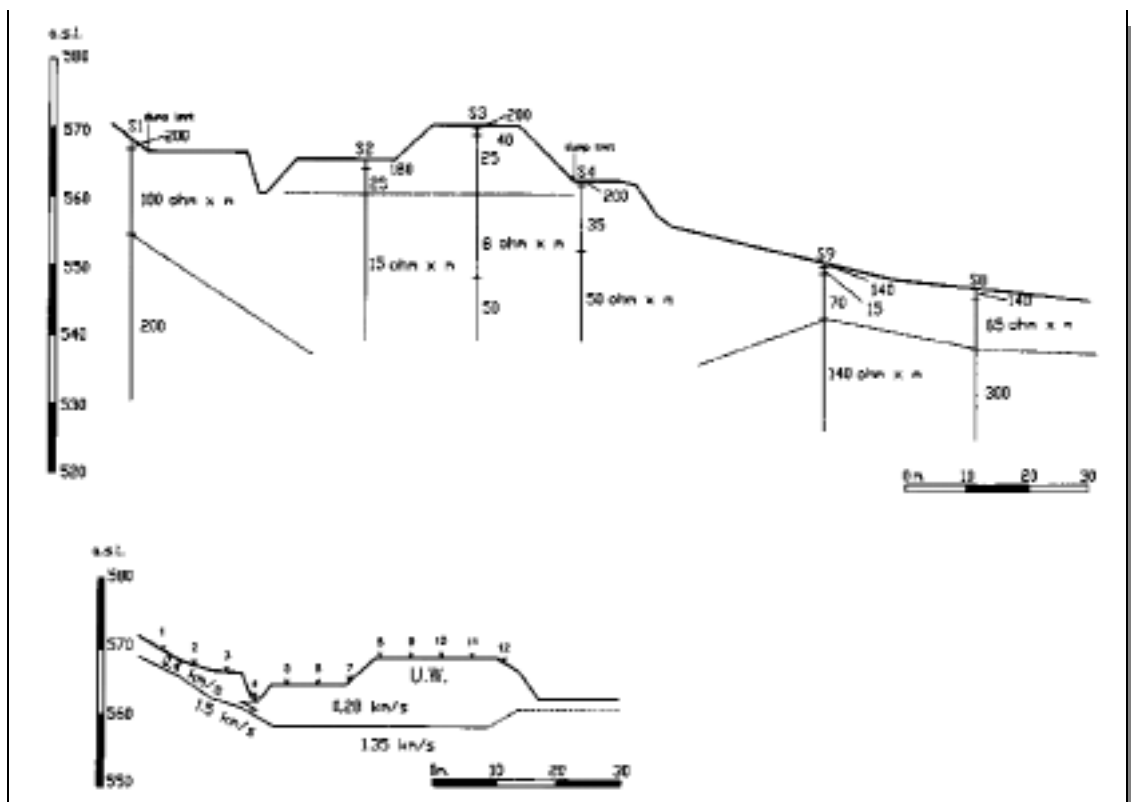
Στην πρώτη περιοχή έλαβαν χώρα 10 ηλεκτρικές βυθομετρήσεις Schlumberger (με μέγιστη απόσταση ηλεκτροδίων “AB”: 100m) και μία γραμμή σεισμικής διάθλασης μήκους 55m. Στη δεύτερη περιοχή πραγματοποιήθηκαν 20 ηλεκτρικές βυθομετρήσεις, 13 από τις οποίες τοποθετήθηκαν σε δύο προφίλ. Μία σεισμική γραμμή διασκοπήθηκε κατά μήκος του ενός από τα προφίλ και μία άλλη, κάθετα σε αυτό.

Στην περιοχή Caprarola, προηγούμενη σεισμική διασκόπηση παρουσιάζει ζώνη χαμηλών ταχυτήτων, πάχους από 5 έως 12m, η οποία μπορεί να συσχετισθεί με το χώρο απόθεσης των αποβλήτων. Πλευρικά και βαθύτερα, οι ταχύτητες αντιστοιχούν στις κανονικές τιμές για ηφαιστειακή τέφρα. Οι ηλεκτρικές μετρήσεις εμφανίζουν ζώνη χαμηλής ειδικής αντίστασης, που αντιστοιχεί στην περιοχή ρύπανσης, ενώ το πάχος είναι το ίδιο όπως υπολογίζεται με τη σεισμική μέθοδο. Στη συνέχεια, ακολουθεί ετερογενής ζώνη χαμηλότερων ειδικών αντιστάσεων, ενώ σε μεγαλύτερα βάθη οι τιμές που παρατηρούνται πλησιάζουν τις κανονικές τιμές για την ηφαιστειακή τέφρα (εικόνα 3.38).

Στην Pisana, τα σεισμικά αποτελέσματα εμφανίζουν ζώνη πάχους 13-14m με χαμηλές ταχύτητες, γεγονός μη συμβατό με έναν ποτάμιο-λιμναίο σχηματισμό. Το εύρος των ταχυτήτων πιθανόν οφείλεται στα απόβλητα. Οι ηλεκτρικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν μακριά από την περιοχή της απόρριψης, εμφανίζουν ένα επιφανειακό στρώμα με μεταβλητές ειδικές αντιστάσεις, στη συνέχεια ένα ενδιάμεσο

με ειδικές αντιστάσεις γύρω στα $40\Omega m$ και τέλος μία ζώνη χαμηλής αντίστασης. Στην περιοχή της απόρριψης τα χαρακτηριστικά είναι παρόμοια με τις υψηλότερες ειδικές αντιστάσεις για το ενδιάμεσο στρώμα.

Συμπερασματικά, τα υλικά που συνθέτουν τα απόβλητα εμφανίζουν χαμηλότερες ταχύτητες σε σχέση με την ταχύτητα στον αέρα. Αυξάνονται με το βάθος, αλλά με τιμές χαμηλότερες από τις κανονικές τιμές για τα αποσαθρωμένα στρώματα. Οι ηλεκτρικές ειδικές αντιστάσεις μπορεί να είναι υψηλότερες ή χαμηλότερες στα υλικά που συνθέτουν την απόρριψη.



Εικόνα 3.38: Κάτω απεικονίζεται τομή σεισμικής διάθλασης στην περιοχή Caprarola. Η τομή δείχνει τις τιμές της ταχύτητας (km/sec) και τα όρια μεταξύ των απορριμμάτων και της γύρω περιοχής. Στο επάνω μέρος του σχήματος φαίνονται οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Ωm) της περιοχής μελέτης και των απορριμμάτων (Cardarelli & Bernabini, 1997).

3.5.3 Χαρτογράφηση ρύπανσης εδαφικού νερού με χρήση των γεωφυσικών μεθόδων *Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης και μέτρησης Γωνίας Κλίσης (Benson et al., 1997)*

Αυτή η μελέτη αφορά τη χαρτογράφηση περιοχής ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών στη βόρεια περιοχή της αλλουβιακής λεκάνης (αμμοχάλικο, άμμος, άργιλος) στην κεντρική κοιλάδα της Utah (Η.Π.Α). Εφαρμόζονται ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης, σε περιοχή όπου παρατηρήθηκε διαρροή καυσίμων από υπόγεια δεξαμενή βενζίνης.

Κατά τη διάρκεια των ερευνών πραγματοποιήθηκαν ηλεκτρικές μετρήσεις ειδικής αντίστασης (*DC resistivity*) και γωνίας κλίσης (*VLF*), προκειμένου να διαμορφωθούν μοντέλα για τα πλούμια ρύπανσης υδρογονανθράκων. 32 μετρήσεις ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης έλαβαν χώρα και δεδομένα για τη γωνία κλίσης αποκτήθηκαν σε 9 γραμμές μελέτης. Παράλληλα, αναλύσεις ύδατος από τέσσερα φρεάτια ελέγχου που είχαν ήδη εγκατασταθεί στην περιοχή, παρείχαν επιπλέον πληροφορίες για την κατεύθυνση της ροής των υπογείων νερών.

Συγκεκριμένα, οι 32 ηλεκτρικές μετρήσεις συλλέχθηκαν με το σύστημα Bison Offset Sounding System, όπου το διάστημα “a” κυμαίνεται από 0,5m έως 16m. Μερικές από τις μετρήσεις επαναλήφθηκαν μετά από δύο μήνες για να επιβεβαιώσουν την ακρίβεια των στοιχείων. Οι ειδικές αντιστάσεις «μοντελοποιήθηκαν» χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα BOSSIX (Interpex).

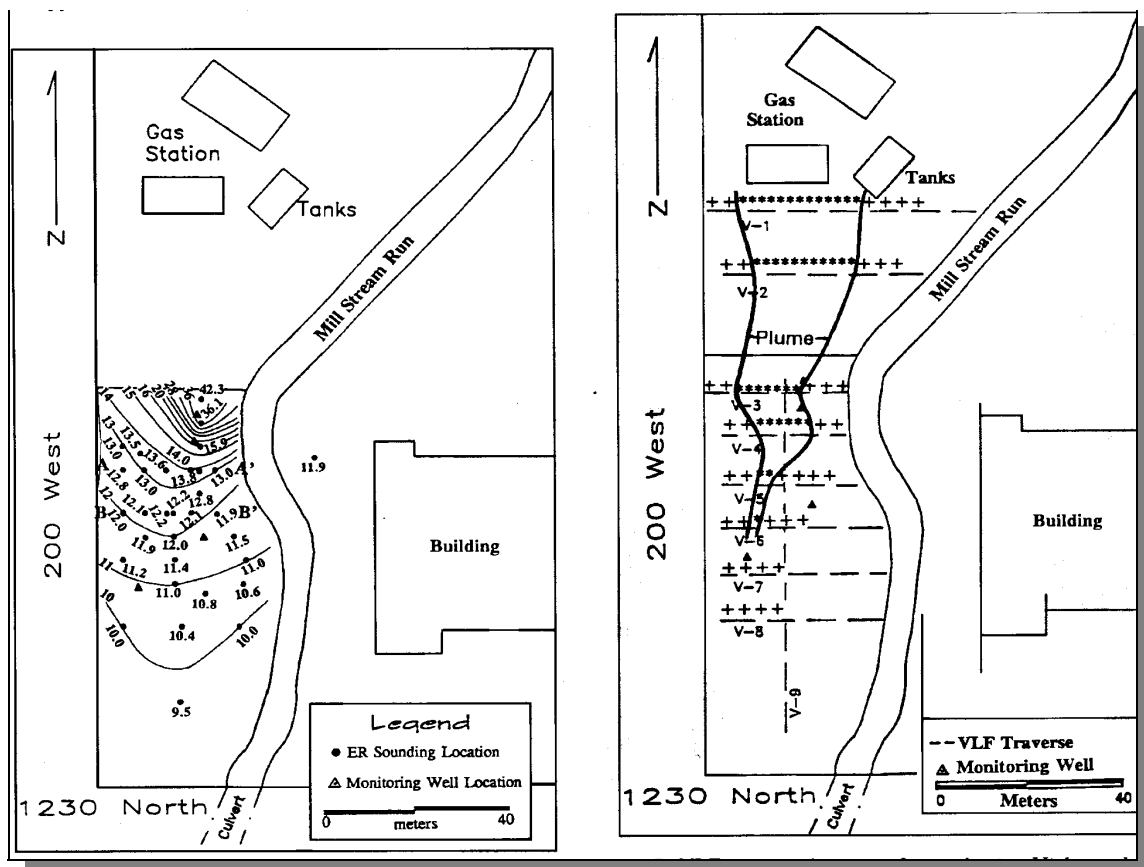
Τα στοιχεία γωνίας κλίσης αποκτήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα σύστημα Wadi που κατασκευάστηκε από την εταιρεία ABEM, υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με ένα φίλτρο Karous-Hjelt και αποτυπώθηκαν σε επιλεγμένο βάθος κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα.

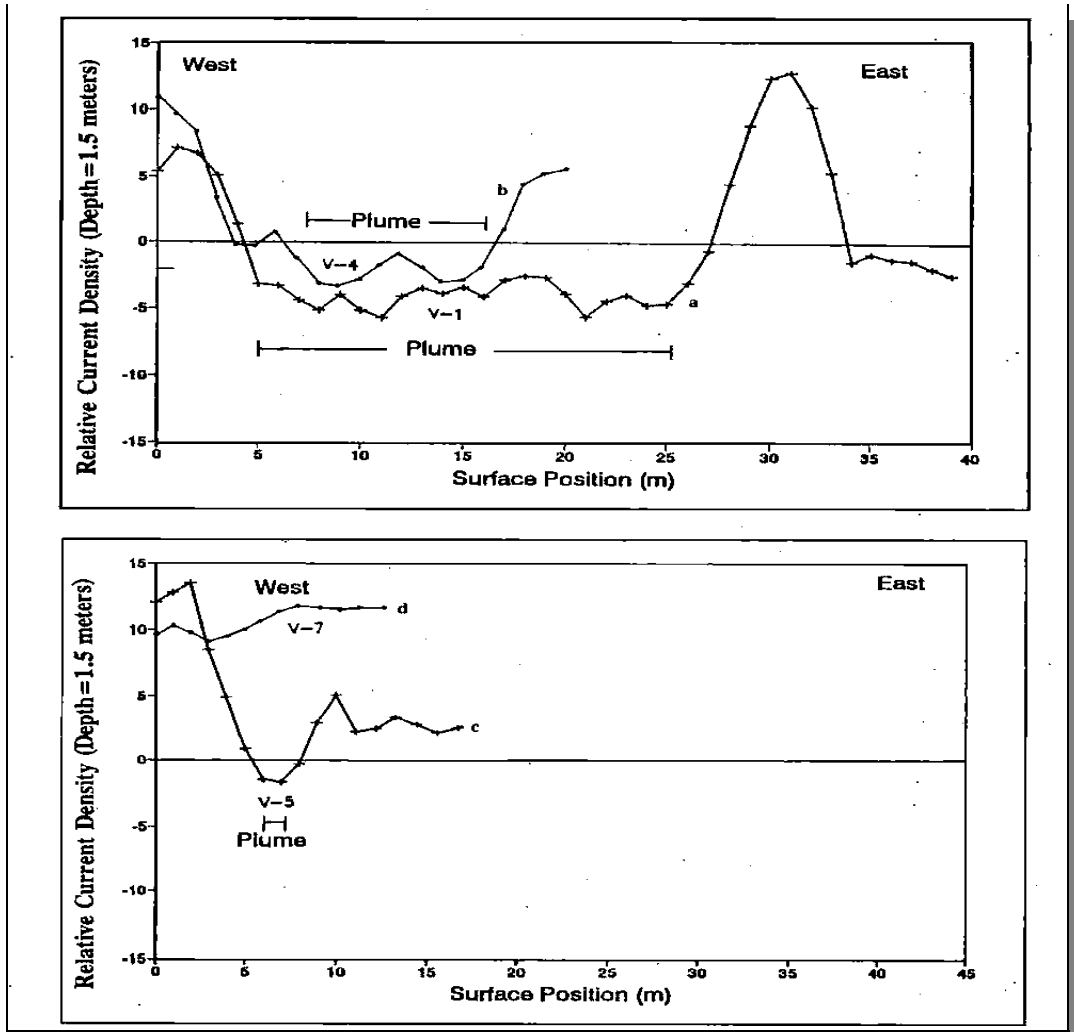
Κατάλογος τεχνικών αποτελεσμάτων:

Μία διατομή των φαινομένων ειδικών αντιστάσεων εμφανίζει ένα στρώμα υψηλής ειδικής αντίστασης, το οποίο απουσιάζει από μία άλλη διατομή. Ερμηνεύεται ως ρύπανση υδρογονανθράκων που διαβρέχει το έδαφος στην ακόρεστη ζώνη (*vadose zone*). Σε βάθος κοντά στην κορυφή του υδροφόρου ορίζοντα, η μέγιστη τιμή των ειδικών αντιστάσεων εμφανίζεται να μειώνεται από το βορρά στο νότο, όπως άλλωστε και τα επίπεδα των παραγόντων ρύπανσης (εικόνα 3.39).

Οι τιμές γωνίας κλίσης εμφανίζουν μέγιστη ειδική αντίσταση που σχετίζεται με τις φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις. Αυτά τα στοιχεία αποδεικνύουν ότι το πλούμιο «στενεύει» προς το νότο (εικόνες 3.40 και 3.41b).

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές της ειδικής αντίστασης εξαρτώνται από την παρουσία των συνολικά διαλυμένων στερεών (*total dissolved solids, TDS*). Όσο υψηλότερες οι τιμές του TDS, τόσο χαμηλότερη η ειδική αντίσταση. Επομένως, στις ρυπογόνες, αλλά ήδη βιοδιασπώμενες περιοχές, οι ειδικές αντιστάσεις του πλουμίου παραγόντων ρύπανσης μπορεί να είναι χαμηλότερες.





Εικόνα 3.41: (a) Δεδομένα κατά μήκος της γραμμής μελέτης V-1, τα οποία παράλληλα έχουν υποστεί φιλτράρισμα. Όλες οι καμπύλες γωνίας κλίσης που απεικονίζονται στο σχήμα αντιπροσωπεύουν τη σχετική πυκνότητα του ρεύματος κατά μήκος μίας τομής και σε βάθος 1,5m. (b) Φιλτραρισμένες τιμές γωνίας κλίσης κατά μήκος της γραμμής V-4. Το πλούμιο της ρύπανσης «στενεύει» καθώς κατευθύνεται προς τα νοτιοδυτικά. (c) Δεδομένα γωνίας κλίσης που συλλέχθηκαν από τη γραμμή μελέτης V-5. Κάθε στοιχείο που αποδεικνύει την παρουσία της ρύπανσης, έχει σχεδόν εξαλειφθεί σε αυτό το διάστημα. (d) Μετρήσεις γωνίας κλίσης από τη γραμμή V-7. Δεν υπάρχει καμία ένδειξη ρύπανσης κατά μήκος αυτής της γραμμής (Benson et al., 1997).

3.5.4 Από αέρα γεωφυσική έρευνα για το χαρακτηρισμό «επικίνδυνων» περιοχών αποβλήτων (Doll et al., 2000)

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η χρησιμότητα των γεωφυσικών μεθόδων εκτός από την ανίχνευση μεταλλευμάτων και πετρελαίου και σε περιβαλλοντικά προβλήματα, διεξήχθη μία συστηματική μελέτη με εφαρμογή από αέρα γεωφυσικών μεθόδων στο Oak Ridge Reservation, Tennessee (Η.Π.Α). Βασικό αντικείμενο της έρευνας ήταν ο

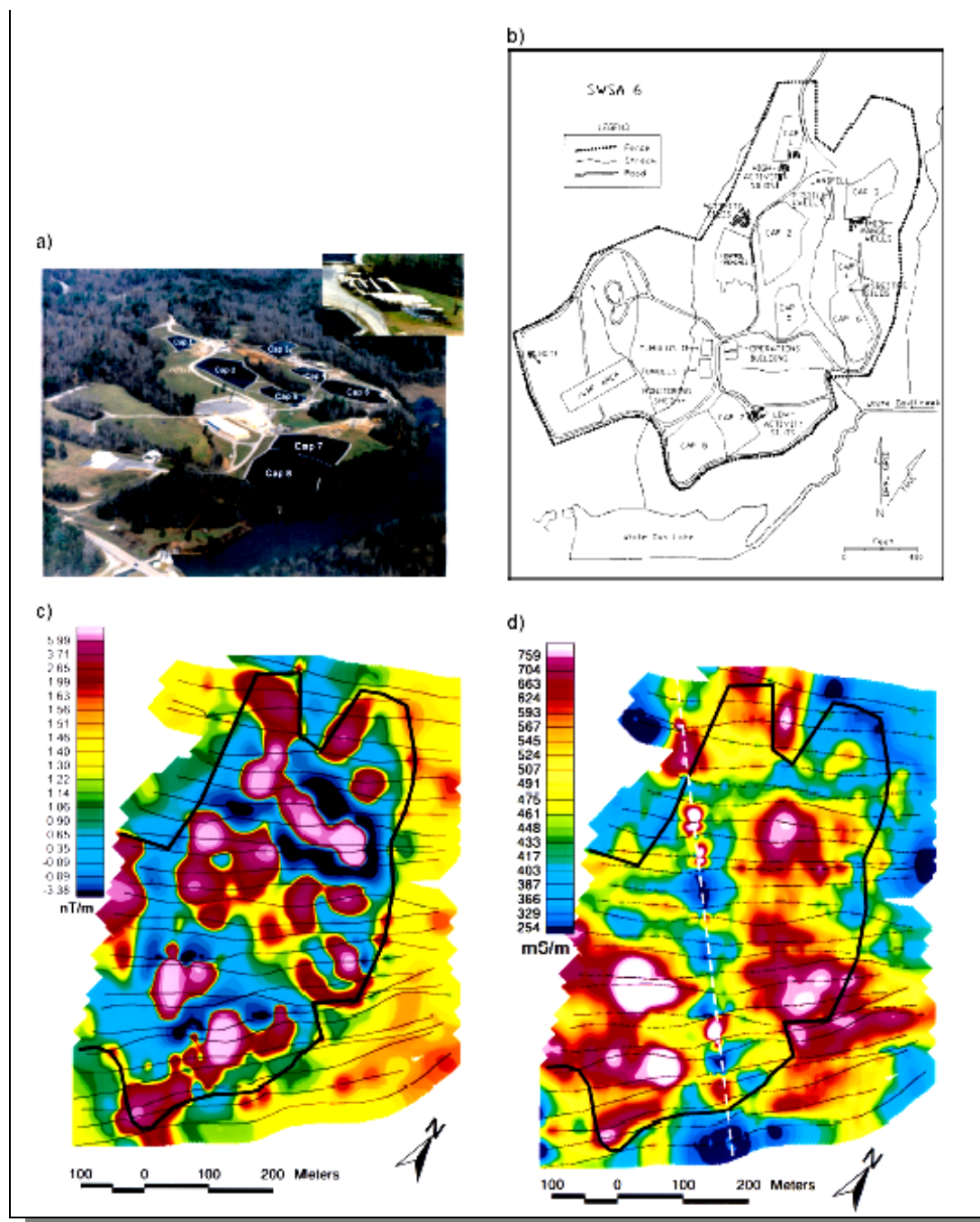
χαρακτηρισμός των γεωλογικών και υδρογεωλογικών παραμέτρων σε περιοχές απόρριψης αποβλήτων (πυρηνικά υλικά, διαλύτες, μολυσμένα μεταλλικά συντρίμια).

Η μεθοδολογία, η οποία ακολουθείται κατά την έρευνα, περιλαμβάνει μαγνητικές, ηλεκτρομαγνητικές και ραδιομετρικές μετρήσεις σε συνδυασμό με εργαστηριακές δοκιμές σε τέσσερις περιοχές δοκιμών (εικόνα 3.42). Επιπλέον μετρήσεις, που πραγματοποιήθηκαν πέρα από τις περιοχές δοκιμής, εμφανίζουν σχιστόλιθο και ανθρακικό άλας. Πυρήνες ιζημάτων συλλέχθηκαν σε βάθος 60cm, προκειμένου να διαπιστωθεί εάν η ρύπανση, που προκαλεί ανωμαλίες ακτίνων-γ, είναι επιφανειακή ή καλύπτεται από ιζήματα.

Για την απόκτηση των στοιχείων στις περιοχές δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ένα ελικόπτερο στο οποίο τοποθετήθηκε ηλεκτρομαγνητικό σύστημα έξι συχνοτήτων, αποτελούμενο από οριζόντια και κατακόρυφα ομοεπίπεδα πηνία καθώς και όργανο καταγραφής της κατακόρυφης βαθμίδας του μαγνητικού πεδίου (2 μαγνητόμετρα καισίου 30m κάτω από το ελικόπτερο, ηλεκτρομαγνητικοί αισθητήρες και αισθητήρες γωνίας κλίσης, φασματόμετρο ακτίνων-γ και κεραία υπεδάφειου ραντάρ).

Τα μαγνητικά στοιχεία είναι αποτελεσματικά τόσο για επιβεβαίωση των ορίων των περιοχών αποβλήτων, όσο και για διάκριση μεταξύ των περιοχών που περιέχουν διαφορετικές ποσότητες μαγνητισμένων αποβλήτων. Μερικές ανωμαλίες μπορούν να συσχετιστούν με τις γεωλογικές επαφές. Τα ηλεκτρομαγνητικά στοιχεία εμφανίζουν ισχυρό συσχετισμό με τα γεωλογικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα (έγκοιλα - καρστ). Τα ραδιομετρικά στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εντοπίσουν την επιφανειακή ρύπανση (η ακτινοβολία γ εξασθενεί σημαντικά παρουσία της βλάστησης).

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την έρευνα παρατηρούνται αρκετές τεχνικές δυσκολίες και περιορισμοί κατά την εφαρμογή των παραπάνω γεωφυσικών μεθόδων. Η απώλεια ευαισθησίας, η οποία οφείλεται στη μεγάλη απόσταση από το στόχο, καθώς και οι αποκλίσεις λόγω του ύψους πτήσης του ελικοπτέρου, της τοπογραφίας, του ανέμου και της βλάστησης αποτελούν πηγές θορύβου. Επιπλέον, είναι δύσκολο να διατηρηθεί διάστημα των γραμμών λήψης στοιχείων μικρότερο από 10m, ενώ επιτακτικός είναι ο προσδιορισμός των ανωμαλιών που οφείλονται στον ανθρώπινο παράγοντα (βάσει στοιχείων, εναέριες φωτογραφίες, εν πτήση βίντεο κ.α). Συνεπώς, οι γεωφυσικές μέθοδοι από αέρα δεν μπορούν να αναπληρώσουν με την ίδια επιτυχία τις επίγειες έρευνες εφαρμοσμένων γεωφυσικών μεθόδων.



Εικόνα 3.42: α) Αεροφωτογραφία της περιοχής WAGG 6, στην οποία φαίνονται οι περιοχές αποθήκευσης των αποβλήτων, οι κτιριακές εγκαταστάσεις και η λίμνη White Oak. Το ένθετο απεικονίζει μία μεγέθυνση του χώρου μεταξύ των Cap 3 και 4, όπου και πραγματοποιήθηκαν οι γεωφυσικές διασκοπήσεις. Στην τοποθεσία αυτή είχε τοποθετηθεί προσωρινά μία πηγή ρεύματος, η οποία και προκάλεσε μεγάλες μαγνητικές ανωμαλίες. β) Χάρτης της περιοχής WAGG 6, ο οποίος απεικονίζει τους χώρους αποθήκευσης των αποβλήτων. γ) Χάρτης της μαγνητικής βαθμίδας. Η ρύπανση οριοθετείται από τη μαύρη έντονη γραμμή. Παρατηρούμε ότι όλες οι μεγάλες μαγνητικές ανωμαλίες εντοπίζονται εντός της ρυπογόνου περιοχής. δ) Χάρτης φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης που προέκυψε από ηλεκτρομαγνητικά δεδομένα των 12KHz. Με την άσπρη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η τοποθεσία της γραμμής ρεύματος, που προκάλεσε και τη μαγνητική ανωμαλία (Doll et al., 2000).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΥΠΕΔΑΦΕΙΟ ΡΑΝΤΑΡ

4.1 Ιστορία του υπεδάφειου ραντάρ

Η τεχνολογία του ραντάρ (*Radio Detection And Ranging – R.A.D.A.R*) εφαρμόστηκε για πρώτη φορά με σκοπό τον εντοπισμό και προσδιορισμό της θέσης κινητών και ακίνητων αντικειμένων από μεγάλες αποστάσεις. Οι πρώτοι σταθμοί ραντάρ κατασκευάστηκαν το 1930, ταυτόχρονα σχεδόν, στις Ηνωμένες Πολιτείες, Βρετανία, Γερμανία και πρώην ΕΣΣΔ. Το σύστημα χρησιμοποιήθηκε πολύ κατά το Β΄ Παγκόσμιο πόλεμο για τη ραδιοανίχνευση εχθρικών πλοίων και αεροπλάνων, αλλά και μεταπολεμικά σε ειρηνικούς τομείς, όπως η πλοήγηση πλοίων, αεροπλάνων και πυραύλων, στους τεχνητούς δορυφόρους, στη μετεωρολογία, στη ραδιοαστρονομία κ.α.

Αν και η ιδέα της χρήσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για την έρευνα του υπεδάφους ξεκίνησε στις αρχές του αιώνα, η τεχνολογία του υπεδάφειου ραντάρ ή γεωραντάρ (*Ground Penetrating Radar – G.P.R*) εισήχθη για πρώτη φορά το 1940. Η ανάπτυξη των συστημάτων ραδιοανίχνευσης και εντοπισμού, από το 1940 και έπειτα, οδήγησε στη δημιουργία αυτόνομων συστημάτων για τους σκοπούς της εφαρμοσμένης γεωφυσικής.

Στα τέλη του 1950 οι σταθμοί ραντάρ των Η.Π.Α. ήταν σε θέση να παρακολουθούν τα αεροπλάνα που προσγειώνονταν στο αεροδρόμιο της Γροιλανδίας, τα οποία λόγω λανθασμένων ενδείξεων του υψομέτρου συντρίβονταν στον πάγο. Το γεγονός αυτό έδωσε την αφορμή για τη διεξαγωγή ερευνών και για εκτενή μελέτη της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο έδαφος.

Παρόλα αυτά, γεωφυσικές διασκοπήσεις με τη χρήση του υπεδάφειου ραντάρ γίνονται μόλις τη δεκαετία του 1970. Σε αυτό συνέβαλε η ανάπτυξη της τεχνολογίας, οπότε και κατασκευάστηκαν φορητά και χαμηλότερου κόστους όργανα. Τη δεκαετία του 1980 η τεχνολογία του υπεδάφειου ραντάρ γνωρίζει μεγάλη άνθιση με την εισαγωγή των ψηφιακών συστημάτων, τα οποία έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην επεξεργασία του σήματος και στην ανάπτυξη καινούργιων εφαρμογών.

4.2 Εφαρμογές

Η ραγδαία εξέλιξη στην ηλεκτρονική τεχνολογία μετά το 1970 έδωσε σημαντική ώθηση στην ανάπτυξη του υπεδάφειου ραντάρ, έτσι ώστε σήμερα να κατατάσσεται στις σύγχρονες μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης με συνεχώς αυξανόμενο πλήθος εφαρμογών.

Η υψηλή ακρίβεια με την οποία το ραντάρ περιγράφει την κατανομή των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων προσφέρει λύσεις σε πολλά πρακτικά προβλήματα, όπως ο καθορισμός του πάχους γεωλογικών στρωμάτων και του βάθους υδροφόρων οριζόντων, ο προσδιορισμός υπογείων εγκοίλων και στοών, ο εντοπισμός θαμμένων αρχαιοτήτων, η χαρτογράφηση των πάγων, ο υπολογισμός της έκτασης της ρύπανσης των υπογείων υδάτων, ο έλεγχος της κατάστασης της ασφάλτου των δρόμων, ο εντοπισμός θαμμένων σωλήνων και καλωδίων, η ανεύρεση μεταλλικών και μη μεταλλικών αντικειμένων κ.α. Τα τελευταία χρόνια η μέθοδος του γεωραντάρ χρησιμοποιείται και για μετρήσεις σε γεωτρήσεις.



Εικόνα 4.1: Το σύστημα του υπεδάφειου ραντάρ (Σπανουδάκης, 2001).

Οι εφαρμογές του γεωραντάρ μπορούν ουσιαστικά να διακριθούν σε δύο κατηγορίες, βασιζόμενες στην κεντρική συχνότητα εκπομπής του:

- ✓ Για γεωλογικούς σκοπούς, όπου το βάθος διασκόπησης είναι σημαντικότερο από τη διακριτική ικανότητα του ραντάρ. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται συνήθως κεραίες συχνότητας 50MHz.
- ✓ Για εφαρμογές στις επιστήμες των μηχανικών και στις μη καταστροφικές δοκιμές (*Non Destructive Testing - NDT*). Σε αυτή την κατηγορία το ζητούμενο είναι η διακριτική ικανότητα του συστήματος και επομένως οι κεραίες που χρησιμοποιούνται είναι της τάξης των 500-2000MHz.

Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι κυριότερες εφαρμογές του γεωραντάρ.

Πίνακας 4.1: Εφαρμογές γεωραντάρ (Reynolds 1998), (Mellet 1995), (Al-Dajani 1990), (Toshioka 1995), (Tsoflias 1999), (Al-Nuaimy 2000), (Hugenschmidt 1998), (Σπανουδάκης 2001)

Γεωλογικές

Ανίχνευση εγκοίλων και ασυνεχειών
 Χαρτογράφηση βυθισμάτων
 Χαρτογράφηση επιφανειακών κοιτασμάτων
 Έρευνα κοιτασμάτων και αξιολόγηση ορυκτών πόρων
 Πάχος στρωμάτων τύρφης και αξιολόγηση της
 Θέση σφηνών πάγου
 Χαρτογράφηση ρωγμών σε ορυκτό αλάτι
 Χαρτογράφηση προσχώσεων, επιπέδων ασυνεχειών κλπ
 Χαρτογράφηση γεωλογικών δομών
 Χαρτογράφηση λιμνιαίων και ποτάμιων ιζημάτων

Περιβαλλοντικές

Χαρτογράφηση ρυπογόνων περιοχών
 Χαρτογράφηση ρύπων στο υπεδάφειο νερό
 Έρευνες σε χωματερές και χώρους υγειονομικής ταφής
 Εντοπισμός θαμμένων βυτίων και βαρελιών
 Εντοπισμός διαρροής αερίων
 Έρευνες για νερό

Επιστήμη μελέτης παγετώνων

Χαρτογράφηση του πάχους των πάγων
 Προσδιορισμός εσωτερικής δομής των παγετώνων
 Μελέτη κίνησης των πάγων

Ανίχνευση ρωγμών στη βάση των παγετώνων
Χαρτογράφηση καναλιών ροής νερού στους παγετώνες
Μελέτη της ισορροπίας της μάζας κάτω από τον παγετώνα
Χαρτογράφηση της στρωματογραφίας του χιονιού

Κατασκευές

Ανάλυση στρωματογραφίας σε δρόμους
Ανίχνευση αστοχιών / κενών
Προσδιορισμός οπλισμού στο τσιμέντο
Προσδιορισμός σωλήνων, καλωδίων
Μελέτη ακεραιότητας κατασκευαστικών υλικών
Δοκιμές στο τσιμέντο (concrete testing)

Αρχαιολογία

Εντοπισμός θαμμένων κατασκευών
Εντοπισμός αρχαίων τάφων
Χαρτογράφηση πριν την εκσκαφή
Εντοπισμός, χαρτογράφηση αρχαίων δρόμων

Δικανικές επιστήμες

Εντοπισμός θαμμένων στόχων (πτώματα, μπάρες χρυσού κλπ)

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι τα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη διαμόρφωση του παρόντος κεφαλαίου, προέρχονται από τις διπλωματικές εργασίες των Πουλιούδη Γ. (1999) και Σπανουδάκη Ν. (2001). Για οποιαδήποτε επιπλέον πληροφορία, ο αναγνώστης καλείται να ανατρέξει στις άνωθεν διπλωματικές εργασίες.

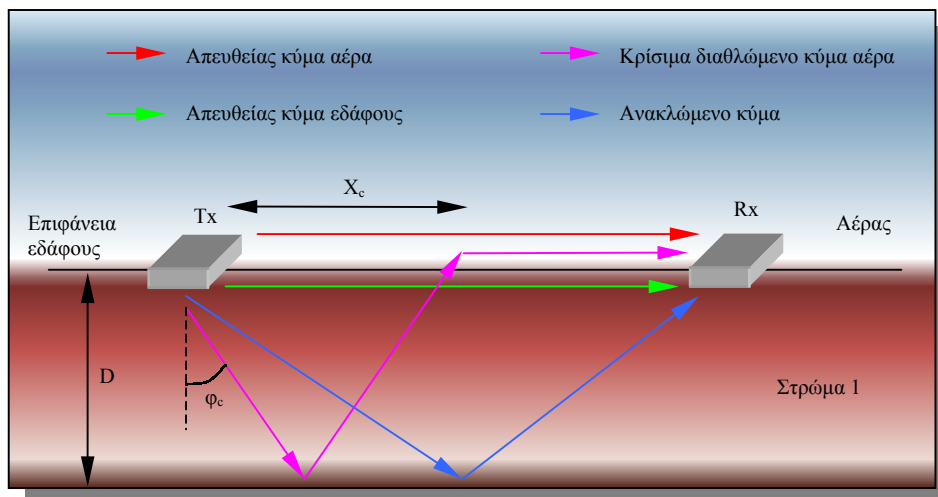
4.3 Αρχή λειτουργίας του υπεδάφειου ραντάρ

Η μέθοδος του υπεδάφειου ραντάρ εφαρμόζεται στην έρευνα δομών μικρού βάθους και χρησιμοποιεί ραδιοκύματα εύρους συχνοτήτων από 1 έως 1200 MHz. Η λειτουργία του στηρίζεται στην ανάκλαση των ραδιοκυμάτων.

Το σύστημα του γεωραντάρ εκπέμπει έναν ηλεκτρομαγνητικό παλμό στο υπό έρευνα υλικό. Ο παλμός, που διαρκεί μερικά νανοδευτερόλεπτα (10^{-9} sec), «ταξιδεύει» στο έδαφος μέχρι να συναντήσει επιφάνεια με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Ένα μέρος της ενέργειας του παλμού διαδίδεται στο δεύτερο στρώμα και ένα μέρος

ανακλάται στην επιφάνεια, οπότε και επιστρέφει στην κεραία του δέκτη. Στη συνέχεια το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης προωθείται στη μονάδα ελέγχου, όπου καταγράφεται ο χρόνος διαδρομής και το πλάτος του κύματος. Η διάδοση του παλμού στο υπέδαφος είναι συνάρτηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του μέσου διάδοσης και της συχνότητας εκπομπής της κεραίας του πομπού. Η εκπομπή και λήψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί από την ίδια κεραία (*monostatic mode*) ή από δύο διαφορετικές κεραίες (μία για την εκπομπή και μία για τη λήψη – *bistatic mode*).

Εκτός από τα ανακλώμενα κύματα η κεραία του δέκτη κατοπτρεύει και τα απευθείας κύματα ή πρώτες αφίξεις (*first breaks*). Τα κύματα αυτά διαδίδονται από τον πομπό στον δέκτη χωρίς να ανακλαστούν σε κάποια διεπιφάνεια (εικόνα 4.2). Εξαιτίας της μικρής διαδρομής που διανύουν καταφθάνουν στην κεραία του δέκτη σε πολύ μικρούς χρόνους και πριν από όλα τα ανακλώμενα κύματα. Οι απώλειες σε ενέργεια των κυμάτων αυτών είναι μικρές και τα πλάτη που καταγράφονται μεγάλα.



Εικόνα 4.2: Γεωμετρία διάδοσης των κυριότερων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Πουλιούδης, 1999).

Τα απευθείας κύματα είναι δύο ειδών: αυτά που διαδίδονται στον αέρα και αυτά που διαδίδονται κάτω ακριβώς από την επιφάνεια του εδάφους. Τα απευθείας κύματα του αέρα καταφθάνουν πρώτα στον δέκτη, ενώ ακολουθούν τα απευθείας του εδάφους. Αυτό συμβαίνει διότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με μεγαλύτερη ταχύτητα στον αέρα παρά σε ένα γεωλογικό σχηματισμό.

Όταν η απόσταση των κεραιών πομπού - δέκτη υπερβεί μία κρίσιμη τιμή X_c (π.χ. σε μία διασκόπηση κοινού ενδιάμεσου σημείου) τότε ο δέκτης κατοπτρεύει και τα κρίσιμα διαθλώμενα κύματα του αέρα. Τα κύματα αυτά ανακλώνται στην πρώτη

διεπιφάνεια που θα συναντήσουν, διαθλώνται στην επιφάνεια του εδάφους και τελικά διαδίδονται στον αέρα. Η διάθλαση των κυμάτων αυτών στην επιφάνεια του εδάφους προϋποθέτει ότι η γωνία πρόσπτωσης του ανακλώμενου κύματος είναι ίση με την ορική γωνία φ_c . Επομένως, τα κρίσιμα διαθλώμενα κύματα του αέρα διαδίδονται εν μέρει στο έδαφος και εν μέρει στον αέρα. Συνεπώς, καταφθάνουν στην κεραία του δέκτη πριν από τα απευθείας κύματα του εδάφους και μετά από τα απευθείας κύματα του αέρα.

Η μονάδα ελέγχου του γεωραντάρ μετράει το χρόνο t_r που χρειάζεται ο παλμός για να ταξιδέψει από την κεραία του πομπού στην κεραία του δέκτη. Ο χρόνος διαδρομής του παλμού t_r ισούται με:

$$t_r = \frac{(4D_r^2 + X^2)^{1/2}}{v} \Leftrightarrow t_r^2 = \frac{4D_r^2}{v^2} + \frac{X^2}{v^2} \quad (4.1)$$

που δίδει:

$$D_r = \frac{[(t_r v)^2 - X^2]^{1/2}}{2} \quad (4.2)$$

όπου X είναι η οριζόντια απόσταση πομπού - δέκτη, D_r το βάθος της επιφάνειας ανάκλασης και v η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο μέσο διάδοσης. Το βάθος του ανακλαστήρα μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί εφόσον γνωρίζουμε το χρόνο διαδρομής t_r και την ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος v στο μέσο διάδοσης.

4.4 Σχεδιασμός διασκόπησης

Πριν ξεκινήσει η πραγματοποίηση της έρευνας, θεωρείται σκόπιμο να μελετηθούν όλες εκείνες οι παράμετροι που θα καθορίσουν την επιτυχή έκβαση της. Το στάδιο αυτό είναι κρίσιμο και πρέπει να πραγματοποιηθεί προσεκτικά, έτσι ώστε οι μετρήσεις να είναι ακριβείς και να αποφευχθούν σφάλματα τα οποία θα δώσουν λανθασμένες πληροφορίες. Ο ερευνητής, επομένως, καλείται πριν αρχίσει οποιαδήποτε εργασία, να αποσαφηνίσει πλήρως το πρόβλημα και να σχεδιάσει τη διασκόπηση με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Ο σχεδιασμός πραγματοποιείται πριν από την διασκόπηση και αποτελείται από τρία βασικά στάδια:

- ✓ Αξιολόγηση του πεδίου έρευνας
- ✓ Επιλογή της μεθόδου διασκόπησης
- ✓ Προσδιορισμός των παραμέτρων της διασκόπησης

4.5 Αξιολόγηση του πεδίου έρευνας

Οι πληροφορίες και τα δεδομένα που συλλέγονται στο στάδιο της αυτοψίας αξιολογούνται, έτσι ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο είναι εφικτό ή όχι να εφαρμοστεί η μέθοδος του υπεδάφειου ραντάρ κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες που διέπουν τη διασκόπηση. Προκειμένου να δοθεί επομένως απάντηση σε αυτό το ερώτημα, είναι καθοριστική η μελέτη των παρακάτω σημείων:

- Βάθος διείσδυσης ακτινοβολίας και βάθος στόχου
- Γεωμετρία στόχου
- Ηλεκτρικές ιδιότητες στόχου και μέσου διάδοσης
- Περιβάλλον διασκόπησης

Μία σωστή αξιολόγηση προϋποθέτει την πραγματοποίηση διασκόπησης με τη μέθοδο του κοινού ενδιάμεσου σημείου, η οποία θα έχει προηγηθεί και θα συμβάλλει στον προσδιορισμό της ταχύτητας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ο προσδιορισμός της ταχύτητας και κατ' επέκταση της διηλεκτρικής σταθεράς του μέσου διάδοσης¹, θα οδηγήσουν σε έναν πιο ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων διασκόπησης. Διαφορετικά ο υπολογισμός των διαφόρων παραμέτρων πρέπει να βασιστεί σε εκτιμήσεις, γεγονός, που ίσως οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα.

4.5.1 Βάθος διείσδυσης ακτινοβολίας και βάθος στόχου

Είναι αυτονόητο, ότι εάν το βάθος του στόχου είναι μεγαλύτερο από το βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ο στόχος δεν θα μπορέσει να εντοπιστεί. Το μέγιστο βάθος διείσδυσης ή διαφορετικά η ακτίνα δράσης του γεωραντάρ, εξαρτάται άμεσα από την εξασθένιση και την ηλεκτρική αγωγιμότητα των σχηματισμών στους οποίους διαδίδεται. Όταν η εξασθένιση και η αγωγιμότητα των σχηματισμών είναι μεγάλη, το βάθος διείσδυσης είναι μικρό.

¹ Η ταχύτητα διάδοσης v του Η/Μ κύματος σε μέσο διαφορετικό του κενού δίδεται: $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$, όπου ϵ_r η διηλεκτρική σταθερά του μέσου διάδοσης και c η ταχύτητα διάδοσης του Η/Μ κύματος στο κενό. Είναι: $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$, όπου ϵ_0 , μ_0 η ηλεκτρική και η μαγνητική διαπερατότητα αντίστοιχα του κενού (Πουλιούδης, 1999).

Το βάθος του στόχου μελετάται πάντα σε συνδυασμό με το βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τη διακριτική τους ικανότητα (Bernabini 1995, Jol 1995, Hamran 1995). Το πρόβλημα που τίθεται είναι ότι το βάθος διείσδυσης επιδρά σε βάρος της διακριτικής ικανότητας. Για αυτόν ακριβώς το λόγο ο ερευνητής πρέπει να αναλογίζεται κάθε φορά σε ποιον παράγοντα θα δώσει πρωταρχική σημασία. Αν δηλαδή προτεραιότητά του είναι να φτάσει σε μεγάλα βάθη, χωρίς όμως να ανιχνεύσει το στόχο ή να πετύχει υψηλή διακριτική ικανότητα, χωρίς όμως τελικά το σήμα να φτάσει μέχρι το επιθυμητό βάθος.

Επειδή η ανάλυση αυτή είναι επίπονη, οι Annan και Cosway (1975) προτείνουν τρεις εμπειρικές σχέσεις, εκ των οποίων οι δυο πρώτες προσδιορίζουν το μέγιστο βάθος διείσδυσης d_{max} , ενώ η τρίτη τη διακριτική ικανότητα ΔR :

$$d_{max} = \frac{35}{\sigma} \quad (4.3)$$

$$d_{max} < \frac{30}{\alpha} \quad (4.4)$$

$$\Delta R = \frac{\lambda}{4} \quad (4.5)$$

όπου σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου διάδοσης (S/m), α ο συντελεστής εξασθένισης (dB/m) και λ το μήκος κύματος. Η εξίσωση 4.4 ισχύει για μέσες και υψηλές τιμές εξασθένισης ($<0,1$ dB/m) (Πουλιούδης, 1999).

4.5.2 Γεωμετρία στόχου

Είναι γεγονός ότι ο στόχος πρέπει να περιγράφεται με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Η πιο σημαντική παράμετρος του είναι το μέγεθος (ύψος, πλάτος, μήκος). Στην περίπτωση που ο στόχος δεν είναι σφαιρικός, θα πρέπει να προσδιοριστεί και ο προσανατολισμός του (κλίση, διεύθυνση, βάθος), ο οποίος είναι και ο παράγοντας που καθορίζει τη διεύθυνση της διασκόπησης. Εντούτοις, δεν είναι δυνατόν πάντα να γνωρίζουμε τις διαστάσεις και τον προσανατολισμό του στόχου.

4.5.3 Ηλεκτρικές ιδιότητες στόχου και μέσου διάδοσης

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου και του μέσου διάδοσης, που ενδιαφέρουν την τεχνική του γεωραντάρ, είναι οι αντίστοιχες διηλεκτρικές σταθερές και αγωγιμότητες (ϵ_r , σ). Η γνώση τους επιτρέπει στο χρήστη να διαπιστώνει κάθε φορά εάν η αντίθεση μεταξύ τους είναι σημαντική, ώστε να υπάρξει μετρήσιμη ανάκλαση. Εξαιτίας της ανομοιογένειάς του το μέσο διάδοσης μπορεί να παρουσιάσει διαφορές στις ηλεκτρικές ιδιότητες στα διάφορα τμήματά του. Όταν οι διαφορές αυτές είναι ίδιες με την διαφορά των ηλεκτρικών ιδιοτήτων στόχου και μέσου διάδοσης, τότε ο στόχος δύσκολα αναγνωρίζεται.

Μέτρο της ενέργειας που ανακλάται από το στόχο είναι ο συντελεστής ανακλώμενης ενέργειας P_r ο οποίος δίδεται από τη σχέση:

$$P_r = \left[\frac{(\epsilon_{r1}^{1/2} - \epsilon_{r2}^{1/2})}{(\epsilon_{r1}^{1/2} + \epsilon_{r2}^{1/2})} \right]^2 \quad (4.6)$$

όπου ϵ_{r1} και ϵ_{r2} είναι οι διηλεκτρικές σταθερές του μέσου διάδοσης και του στόχου αντίστοιχα. Όταν η αντίθεση στις ηλεκτρικές ιδιότητες είναι μεγάλη και η ενέργεια των ανακλώμενων κυμάτων είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια του θορύβου, τότε ο συντελεστής ανακλώμενης ενέργειας πρέπει να ξεπερνά την τιμή 0,01 (τιμή αναφοράς για τον εντοπισμό οποιουδήποτε στόχου).

Στόχος	ϵ_r	P_r
Πλαστικός σωλήνας	3	0,071
Φύλλο αλουμινίου	8,8	0,24
Ασβεστόλιθος	9	0,25
Σιδερένιος σωλήνας	16	0,36
Φύλλο μολύβδου	6	0,17

Πίνακας 4.2: Συντελεστής ανακλώμενης ενέργειας για διάφορα υλικά, όταν το μέσο διάδοσης είναι ο αέρας (Σπανουδάκης, 2001).

Στόχος	ε_r	P_r
Οπλισμός από σίδηρο	16	0,01
Αέρας (ρωγμή)	1	0,1

Πίνακας 4.3: Συντελεστής ανακλώμενης ενέργειας για διάφορα υλικά, όταν το μέσο διάδοσης είναι τσιμέντο (Σπανουδάκης, 2001).

4.5.4 Περιβάλλον διασκόπησης

Η μέθοδος του γεωραντάρ είναι ευάλωτη στο περιβάλλον υπό το οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Η χρήση του δεν ενδείκνυται σε περιοχές όπου υπάρχουν εγκατεστημένοι μεταδότες ραδιοκυμάτων και αυτό διότι οι ευαίσθητες κεραίες του γεωραντάρ κατοπτρεύουν, τόσο τα ισχυρά ραδιοκύματα όσο και τον ανακλώμενο από το στόχο παλμό, με αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα των μετρήσεων.

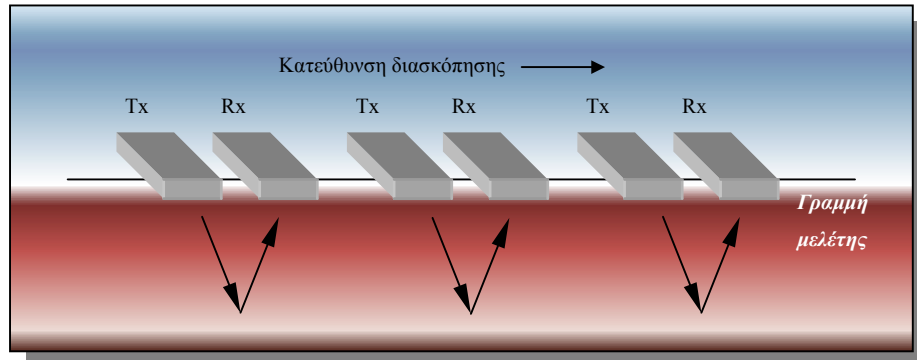
Περιοχές με εκτεταμένες μεταλλικές κατασκευές στο υπέδαφος ή στην επιφάνεια είναι επίσης ακατάλληλες για τη διασκόπηση με τη μέθοδο του γεωραντάρ. Οι ισχυρότατες ανακλάσεις που προέρχονται από τις κατασκευές αλλοιώνουν την ποιότητα των μετρήσεων.

Οι κλιματικές συνθήκες αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για τη λειτουργία του γεωραντάρ. Για τεχνικούς λόγους το ραντάρ δεν μπορεί να λειτουργήσει σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία και βρόχινες συνθήκες. Σημειώνεται ότι οι μετρήσεις κάτω από συνθήκες υψηλής εδαφικής υγρασίας ενδέχεται να παρουσιάσουν διαφοροποίηση σε σχέση με δεδομένα που συλλέγονται υπό φυσιολογικές (ξηρές) συνθήκες στον ίδιο χώρο, εξαιτίας της μεταβολής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του μέσου διάδοσης και του στόχου.

4.6 Επιλογή της μεθόδου διασκόπησης

Το υπεδάφειο ραντάρ είναι δυνατόν να χρησιμοποιεί διαφορετική μέθοδο κάθε φορά για τη συλλογή των δεδομένων, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε διασκόπησης. Τέσσερις από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους που εφαρμόζονται είναι οι εξής:

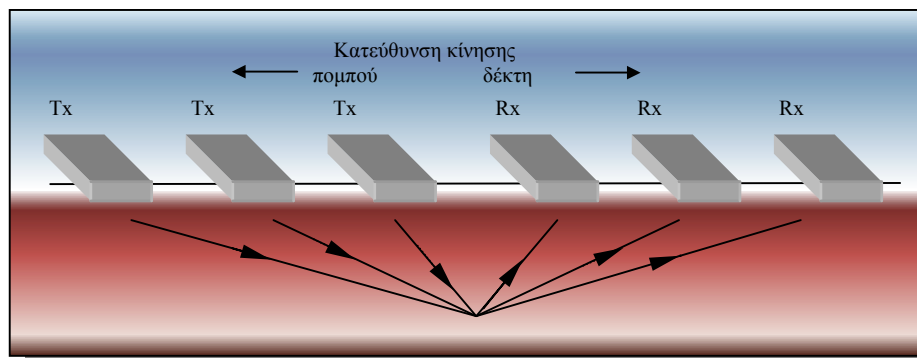
- **Μέθοδος της ανάκλασης (Reflection):** Είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος και εφαρμόζεται στη χαρτογράφηση των γεωλογικών στρωμάτων. Για το σκοπό αυτό οι κεραίες του πομπού και του δέκτη κινούνται κατά μήκος της γραμμής μελέτης, διατηρώντας συγκεκριμένο προσανατολισμό και σταθερή απόσταση (εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3: Διασκόπηση με τη μέθοδο της ανάκλασης, όπου T_x είναι η κεραία του πομπού και R_x του δέκτη (Πουλιούδης, 1999).

- **Μέθοδος του κοινού ενδιάμεσου σημείου (Common Midpoint):** Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε συνάρτηση με το βάθος. Για το λόγο αυτό οι δύο κεραίες απομακρύνονται από σταθερό σημείο κατά μήκος της γραμμής μελέτης και παράλληλα καταγράφεται ο χρόνος διαδρομής του κύματος για τον ίδιο ανακλαστήρα (εικόνα 4.4).

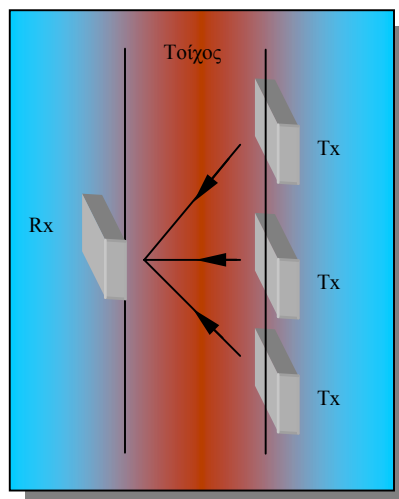
Η βέλτιστη διάταξη των κεραιών απαιτεί τα ηλεκτρικά τους πεδία να είναι παράλληλα ενώ οι κεραίες κινούνται κατά μήκος της γραμμής μελέτης, η οποία είναι κάθετη στο επίπεδο πόλωσης του ηλεκτρικού πεδίου (εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4: Η μέθοδος του κοινού ενδιάμεσου σημείου, όπου T_x είναι η κεραία του πομπού και R_x του δέκτη (Πουλιούδης, 1999).

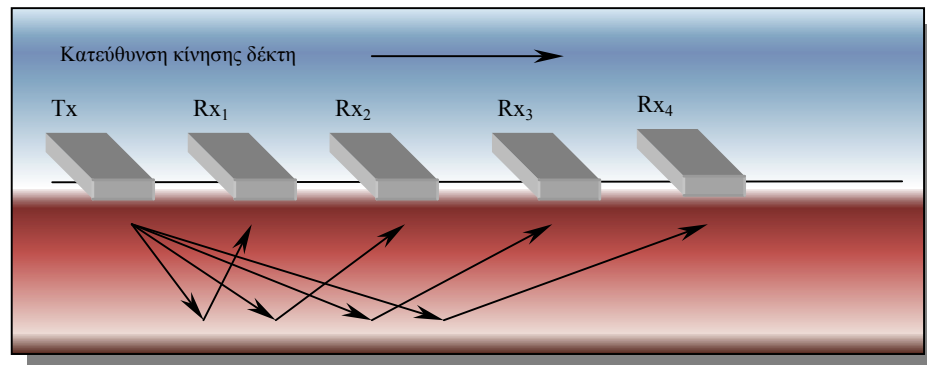
Η διαδικασία μίας διασκόπησης κοινού ενδιαμέσου σημείου είναι απλή. Σε πρώτο στάδιο προσδιορίζεται ένας ανακλαστήρας με τη βοήθεια της μεθόδου της ανάκλασης. Στη συνέχεια επιλέγεται σημείο της επιφάνειας του εδάφους ακριβώς επάνω από τον ανακλαστήρα, το οποίο θα αποτελέσει το κοινό ενδιαμέσο σημείο. Εκατέρωθεν του σημείου αυτού και στην ελάχιστη απόσταση πομπού – δέκτη τοποθετούνται οι κεραίες. Συνήθως, η αρχική ελάχιστη απόσταση είναι ίση με το βήμα δειγματοληψίας Nyquist n_x , το οποίο επιλέχθηκε για τη διασκόπηση ανάκλασης που προηγήθηκε. Κατά τη διάρκεια της διασκόπησης η κάθε κεραία απομακρύνεται από το κοινό ενδιαμέσο σημείο κατά $n_x/2$ και η απόσταση πομπού - δέκτη αυξάνει σε ακέραια πολλαπλάσια του n_x . Η μέγιστη απόσταση πομπού – δέκτη δεν πρέπει να υπερβαίνει μία με δύο φορές το βάθος του ανακλαστήρα. Εάν η εξασθένιση του μέσου διάδοσης είναι υψηλή, η ενέργεια του παλμού αποσβένει πριν επιτευχθεί η μέγιστη απόσταση.

- **Μέθοδος της τομογραφίας (Transillumination):** Η μέθοδος αυτή δεν στηρίζεται στην ανάκλαση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος όπως οι προηγούμενες, αλλά στη διέλευση του μέσα από τη μάζα του υλικού μελέτης. Οι κεραίες τοποθετούνται στις δύο απέναντι πλευρές του υλικού του οποίου θέλουμε να μελετήσουμε τις ιδιότητες, με τέτοιο τρόπο ώστε να αντικρίζει η μία την άλλη (εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5: Διασκόπηση διαπερατής ακτινοβολίας, όπου Tx είναι η κεραία του πομπού και Rx του δέκτη (Πουλιούδης, 1999).

- **Μέθοδος σταθερού πομπού - κινούμενου δέκτη (*Wide angle reflection and refraction*):** Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης μέσα στο μέσο. Η διαφορά της από τη μέθοδο του κοινού ενδιάμεσου σημείου έγκειται στο γεγονός ότι ο πομπός παραμένει σταθερός σε κάποιο σημείο, ενώ ο δέκτης κινείται πάνω στη γραμμή μελέτης με σταθερό βήμα (εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6: Η μέθοδος σταθερού πομπού - κινούμενου δέκτη, όπου T_x είναι η κεραία του πομπού (σταθερή) και Rx_i του δέκτη (κινούμενη) (Σπανουδάκης, 2001).

4.7 Προσδιορισμός των παραμέτρων της διασκόπησης

Πριν ξεκινήσει η διασκόπηση είναι πρωταρχικής σημασίας να ρυθμιστούν όλοι εκείνοι οι παράγοντες, οι οποίοι σχετίζονται με την επιτυχή έκβαση του πειράματος. Οι παράμετροι αυτοί μπορούν να συνοψιστούν στους παρακάτω:

- ✓ συχνότητα εκπομπής
- ✓ ολικός χρόνος καταγραφής
- ✓ διάστημα δειγματοληψίας
- ✓ βήμα διασκόπησης
- ✓ απόσταση κεραιών
- ✓ προσανατολισμός κεραιών
- ✓ υπέρθεση

4.7.1 Συχνότητα εκπομπής

Η συχνότητα εκπομπής (*operating frequency*) συνδέεται άμεσα με τη διακριτική ικανότητα και το βάθος διεύθυνσης του παλμού του γεωραντάρ. Αυτοί οι δύο

παράγοντες καθορίζουν τελικά την επιλογή της συχνότητας. Η επιλογή όμως δεν είναι πάντα εύκολη. Στις υψηλές συχνότητες εκπομπής το βάθος διείσδυσης είναι μικρό, ενώ η διακριτική ικανότητα μεγάλη. Στις χαμηλές συχνότητες συμβαίνει το αντίστροφο. Επομένως για τη βέλτιστη επιλογή της συχνότητας οι δύο παράγοντες θα πρέπει να σταθμιστούν ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε διασκόπησης. Συνήθως είναι προτιμότερο ένα μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης, διότι είναι ανώφελη μία πολύ καλή διακριτική ικανότητα όταν ο στόχος δεν μπορεί να εντοπιστεί.

Μία διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος αποτελεί ο υπολογισμός της συχνότητας (σε MHz) από την εξίσωση:

$$f = \frac{150}{x \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (4.7)$$

όπου το x συμβολίζει τη χωρική διακριτική ικανότητα (σε m).

Ένας άλλος τρόπος προσδιορισμού της συχνότητας είναι η χρήση του πίνακα 4.4. Οι τιμές του πίνακα βασίζονται στην πρακτική εμπειρία και με την υπόθεση ότι η απαιτούμενη χωρική διακριτική ικανότητα είναι περίπου το 25% του βάθους του στόχου. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο πίνακας αυτός δεν θα πρέπει να αντικαταστήσει μία προσεκτική μελέτη του προβλήματος, αλλά απλά να αποτελέσει ένα πρόχειρο οδηγό αναφοράς.

<i>Βάθος (m)</i>	<i>0.5</i>	<i>1.0</i>	<i>2.0</i>	<i>5.0</i>	<i>10</i>	<i>30</i>	<i>50</i>
<i>Κεντρική συχνότητα (MHz)</i>	<i>1000</i>	<i>500</i>	<i>200</i>	<i>100</i>	<i>50</i>	<i>25</i>	<i>10</i>

Πίνακας 4.4: Ενδεικτικές τιμές του βάθους διασκόπησης συναρτήσει της συχνότητας, υποθέτοντας ότι η χωρική διακριτική ικανότητα είναι το 25% του βάθους του στόχου (Πουλιούδης, 1999).

4.7.2 Ολικός χρόνος καταγραφής

Ο υπολογισμός του ολικού χρόνου καταγραφής (*time window*) στηρίζεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$W = 1.3 \frac{2d_{\max}}{v_{\min}} \quad (4.8)$$

όπου W είναι ο ολικός χρόνος καταγραφής, d_{max} το μέγιστο βάθος διείσδυσης και v_{min} η ελάχιστη ταχύτητα του παλμού στο μέσο διάδοσης. Η παραπάνω εξίσωση αυξάνει τον ολικό χρόνο κατά 30%, έτσι ώστε να είναι σε θέση να προβλέπει σφάλματα του υπολογισμού που οφείλονται σε πιθανές διακυμάνσεις της ελάχιστης ταχύτητας και του μέγιστου βάθους διασκόπησης.

Μία διασκόπηση χαρακτηρίζεται αποτυχημένη εάν ο ολικός χρόνος καταγραφής δεν είναι αρκετά μεγάλος για να καταγραφούν τα ανακλώμενα κύματα που προέρχονται από το στόχο. Αντίστροφα, ένας πολύ μεγάλος χρόνος καταγραφής θα είχε σαν συνέπεια μεγάλο όγκο των δεδομένων με ταυτόχρονη μείωση της παραγωγικότητας.

4.7.3 Διάστημα δειγματοληψίας

Μία από τις παραμέτρους που σχετίζονται με τη λήψη των δεδομένων είναι το διάστημα δειγματοληψίας (*sampling interval*). Η παράμετρος αυτή εκφράζει το χρονικό διάστημα το οποίο μεσολαβεί μεταξύ δύο σημείων μίας καταγραφείσας κυματομορφής, όπου κάθε σημείο αντιπροσωπεύει δεδομένη χρονική στιγμή κατά την οποία λαμβάνεται η μέτρηση.

Το διάστημα δειγματοληψίας εξαρτάται από την συχνότητα “Nyquist” και πρέπει να είναι πάντα μικρότερο από το μισό της περιόδου του κύματος της μέγιστης συχνότητας εκπομπής. Η συχνότητα Nyquist f_N ορίζεται ως η υψηλότερη συχνότητα του φάσματος εκπομπής του γεωραντάρ και είναι διαφορετική για κάθε κεραία. Τα περισσότερα συστήματα γεωραντάρ εκπέμπουν σε ένα εύρος συχνοτήτων που κυμαίνεται από $0,5f$ έως $1,5f$ (η f συμβολίζει την κεντρική συχνότητα εκπομπής). Τελικά, αν θεωρήσουμε συντελεστή ασφάλειας ίσο με δύο, τότε το διάστημα δειγματοληψίας δίνεται από την σχέση:

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t} \rightarrow 1.5f = \frac{1}{2\Delta t} \xrightarrow{\text{συντ.ασφάλειας } 2} \Delta t = \frac{1}{6f} \quad (4.9)$$

όπου f_N είναι η συχνότητα Nyquist (Hz) και Δt το διάστημα δειγματοληψίας (sec).

Εάν η ταχύτητα λήψης και ο όγκος των δεδομένων θεωρηθούν πρωταρχικής σημασίας συγκριτικά με την ποιότητα των δεδομένων, τότε σε μερικές περιπτώσεις είναι δυνατόν το διάστημα δειγματοληψίας να αυξηθεί (ελαφρώς) σε σχέση με το προτεινόμενο.

4.7.4 Βήμα διασκόπησης

Το βήμα διασκόπησης ορίζει την απόσταση δύο διαδοχικών σημείων πάνω στη γραμμή μελέτης όπου πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Ένα μεγάλο βήμα διασκόπησης δεν δίνει επαρκή αποτελέσματα. Ειδικότερα όταν αυτό είναι μεγαλύτερο από το διάστημα δειγματοληψίας Nyquist, οι απότομες μεταβολές στις κλίσεις των ανακλαστήρων δεν μπορούν να περιγραφούν επαρκώς και μεμονωμένοι στόχοι είναι δυνατόν να μην εντοπιστούν. Αντίθετα, αν το βήμα είναι υπερβολικά μικρό, ο μεγάλος όγκος των δεδομένων επιβαρύνει την παραγωγικότητα. Για αυτόν το λόγο προτείνεται βήμα δειγματοληψίας Nyquist n_x το οποίο ισούται με:

$$n_x = \frac{\lambda}{4} = \frac{75}{(\epsilon_r)^{\frac{1}{2}} f} \quad (4.10)$$

4.7.5 Απόσταση κεραιών

Τα συστήματα γεωραντάρ προσφέρουν στο χρήστη τη δυνατότητα να μεταβάλει, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις, την απόσταση των κεραιών προκειμένου να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος. Αύξηση της απόστασης των κεραιών συνεπάγεται αύξηση της εξασθένισης του κύματος, αφού αυτό αναγκάζεται να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση. Μία εκτίμηση της βέλτιστης απόστασης των κεραιών S αποτελεί η ακόλουθη έκφραση:

$$S = \frac{2 \times d_{\sigma\tau\delta\chi\omicron\upsilon}}{\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad (4.11)$$

όπου ϵ_r είναι η διηλεκτρική σταθερά του μέσου διάδοσης και $d_{\sigma\tau}$ το βάθος του στόχου.

Όταν οι πληροφορίες που αφορούν την περιοχή διασκόπησης είναι λιγοστές (άγνωστο ϵ_r), ένας ασφαλής κανόνας προσδιορισμού της απόστασης είναι η εξίσωση που ακολουθεί:

$$S = 0,2 * d_{\sigma\tau\omicron\chi\omicron\upsilon} \quad (4.12)$$

<i>Ελάχιστη απόσταση κεραιών (m)</i>	<i>0.17</i>	<i>0.25</i>	<i>0.5</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>8</i>
<i>Κεντρική συχνότητα (MHz)</i>	<i>900</i>	<i>450</i>	<i>225</i>	<i>110</i>	<i>50</i>	<i>25</i>	<i>12.5</i>

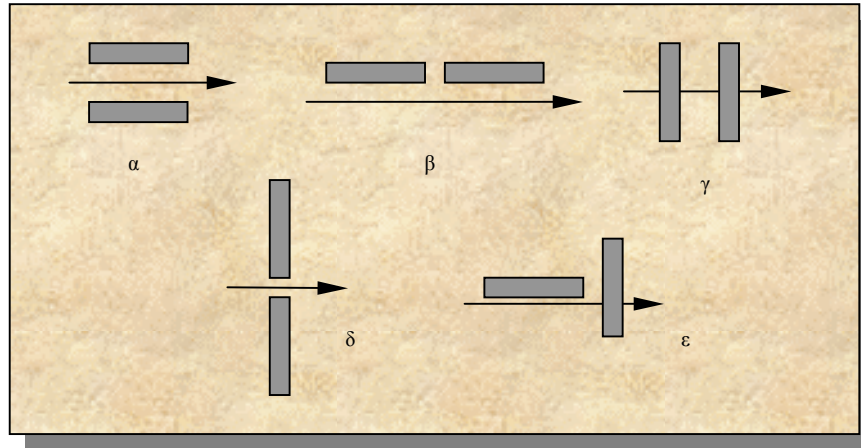
Πίνακας 4.5: Συνοπτικός πίνακας κεντρικών συχνοτήτων εκπομπής και προτεινόμενης ελάχιστης απόστασης κεραιών (Πουλιούδης, 1999).

4.7.6 Προσανατολισμός κεραιών

Η παράμετρος που μελετάται στην παράγραφο αυτή είναι ο προσανατολισμός των κεραιών, δηλαδή η σχετική θέση μεταξύ τους και σε σχέση με τη γραμμή μελέτης. Οι κεραίες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα γεωραντάρ είναι ωμικές, διπολικές και ο προσανατολισμός τους καθίσταται σημαντικός για την επιτυχή έκβαση των πειραμάτων. Η πιο συνηθισμένη διάταξη είναι αυτή κατά την οποία το ηλεκτρικό πεδίο πολώνεται παράλληλα με το μεγάλο άξονα των κεραιών (πομπού και δέκτη) και κάθετα ή παράλληλα με τη διεύθυνση της διασκόπησης (εικόνα 4.7α και 4.7γ). Εάν οι κεραίες χρησιμοποιούν κυκλικά πολωμένο σήμα, ο προσανατολισμός των κεραιών είναι ασήμαντος. Τα περισσότερα όμως συστήματα γεωραντάρ του εμπορίου χρησιμοποιούν γραμμικώς πολωμένες κεραίες, οπότε ο προσανατολισμός τους καθίσταται σημαντικός.

Όπως προαναφέρθηκε, ο προσανατολισμός των κεραιών περιλαμβάνει τόσο τη μεταξύ τους διάταξη όσο και τη σχετική τους θέση ως προς τη διεύθυνση της διασκόπησης. Στην εικόνα 4.7 παρουσιάζονται όλοι οι δυνατοί προσανατολισμοί.

Η σπουδαιότητα του προσανατολισμού των κεραιών φαίνεται στο ακόλουθο παράδειγμα. Έστω γραμμή μελέτης η οποία διασχίζει κάθετα ένα θαμμένο μεταλλικό σωλήνα. Εάν το ηλεκτρικό πεδίο πολώνεται παράλληλα με τον άξονα του σωλήνα (διάταξη εικόνας 4.7γ), τότε ο σωλήνας εμφανίζεται στα δεδομένα με τη μορφή υπερβολής σαν ένας εξαιρετικός ανακλαστήρας. Όταν οι κεραίες περιστραφούν κατά 90° ο σωλήνας δύσκολα μπορεί να εντοπιστεί. Η διάταξη των παράλληλων ηλεκτρικών πεδίων (εικόνα 4.7α και 4.7γ) έχει καλύτερη εφαρμογή στη χαρτογράφηση γεωλογικών στρωμάτων.



Εικόνα 4.7: Δυνατές διατάξεις των κεραιών πομπού και δέκτη με τη διεύθυνση διασκόπησης. Το ηλεκτρικό πεδίο θεωρείται παράλληλο στο μεγάλο άξονα των κεραιών (Πουλιούδης, 1999).

Οι δύο κεραιές μπορούν να τοποθετηθούν και σε κάθετη διάταξη (κάθετα ηλεκτρικά πεδία), όπως φαίνεται στην εικόνα 4.7ε. Στην περίπτωση αυτή, το γεωραντάρ γίνεται περισσότερο ευαίσθητο σε σκεδαστές, όπως οι σωλήνες, χωρίς όμως η σχετική θέση σκεδαστή - κεραιών να επηρεάζει το αποτέλεσμα της καταγραφής. Η τελευταία διάταξη έχει φτωχά αποτελέσματα στη χαρτογράφηση των γεωλογικών στρωμάτων.

4.7.7 Κατακόρυφη υπέρθεση

Σε περιβάλλοντα με υψηλό θόρυβο η βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων επιτυγχάνεται με επαναλαμβανόμενες καταγραφές σε κάθε σημείο της γραμμής μελέτης. Τα πλάτη των ιχνών των πολλαπλών καταγραφών, που λαμβάνονται στο ίδιο σημείο, αθροίζονται και υπολογίζεται ο μέσος όρος αυτών. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται αυτόματα από το γεωραντάρ και είναι γνωστή ως υπέρθεση (*stacking*). Το αποτέλεσμα της υπέρθεσης είναι ένα ίχνος στο οποίο τα πλάτη των ανακλώμενων κυμάτων έχουν ενισχυθεί, ενώ ο θόρυβος εξαλείφεται.

Είναι γεγονός ότι με τη διαδικασία αυτή βελτιώνεται η ποιότητα των δεδομένων, επιβραδύνεται όμως σημαντικά η διασκόπηση. Όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός υπέρθεσης, τόσο αυξάνει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη διεκπεραίωση της διασκόπησης. Ο αριθμός επαναλαμβανόμενων μετρήσεων λαμβάνει τιμές στο διάστημα 1 έως 2048. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι κατάλληλη μία από τις τιμές 16, 32, 64.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

5.1 Εισαγωγή

Η επεξεργασία των δεδομένων του υπεδάφειου ραντάρ σχετίζεται με τεχνικές της ψηφιακής ανάλυσης εικόνας. Σκοπός είναι η απεικόνιση των δεδομένων με ευκρίνεια, προκειμένου να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα κατά την ερμηνεία και αξιολόγησή τους. Συγκεκριμένα, η μαθηματική επεξεργασία του αρχικού σήματος επιδιώκει τον τονισμό ορισμένων χαρακτηριστικών, τα οποία δε γίνονται άμεσα αντιληπτά (όπως οριζόντιοι και κεκλιμένοι ανακλαστήρες), την απαλοιφή του θορύβου και τη γενικότερη βελτίωση της ποιότητας απεικόνισης των δεδομένων.

Στις ενότητες που ακολουθούν, παρουσιάζονται σε θεωρητικό υπόβαθρο τα στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά των σημάτων (*instantaneous attributes*), καθώς και τα φίλτρα (*filters*) και οι τύποι ενίσχυσης (*gains*) που εφαρμόζονται στο αρχικό σήμα του υπεδάφειου ραντάρ (Σπανουδάκης 2002/2001, Πουλιούδης 1999, Taner et al. 1992-2001).

5.2 Φίλτρα

Η δειγματοληψία και καταγραφή των μετρήσεων πραγματοποιείται ανά προκαθορισμένα τακτά χρονικά διαστήματα για κάθε ίχνος (*sample interval*) και αποστάσεις μεταξύ γειτονικών-διαδοχικών ιχνών (*trace interval*)¹. Η λειτουργία των

¹ Σημειώνεται ότι τα δεδομένα γεωραντάρ είναι ένας πίνακας, του οποίου κάθε στήλη είναι ένα ίχνος ενώ κάθε γραμμή του αντιστοιχεί σε καταγραφές με ίδιο χρόνο άφιξης (Σπανουδάκης, 2002).

αλγορίθμων των φίλτρων στηρίζεται σε μαθηματικές πράξεις μεταξύ των σημείων του ίδιου ίχνους ή μεταξύ γειτονικών ίχνων.

5.2.1 Φίλτρα διόρθωσης (*trace correction*)

Η εκπομπή του παλμού από την κεραία του γεωραντάρ μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία κυμάτων χαμηλής συχνότητας, τα οποία δεν διαδίδονται αλλά διαχέονται στο έδαφος και υπερτίθενται στα κύματα ανάκλασης υψηλών συχνοτήτων, αλλοιώνοντας έτσι την καταγραφή. Το πλήθος των κυμάτων χαμηλής συχνότητας και ο τρόπος που εμφανίζονται στα δεδομένα, εξαρτώνται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης (έδαφος) και την απόσταση των κεραιών.

Οι δύο κύριοι τύποι φίλτρων αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων είναι:

- i) **Φίλτρο διόρθωσης Dewow:** Πρόκειται για φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (*High pass filter*). Η λειτουργία του φίλτρου στηρίζεται στη δημιουργία νοητού παραθύρου σε κάθε σημείο του ίχνους. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η μέση τιμή των σημείων που ανήκουν στο παράθυρο, η οποία αφαιρείται από την τιμή του κεντρικού σημείου. Στη συνέχεια το παράθυρο μετατοπίζεται κατά ένα σημείο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.
- ii) **Φίλτρο διόρθωσης DCshift:** Ο αλγόριθμος του φίλτρου αυτού υπολογίζει τη μέση τιμή όλων των σημείων του ίχνους και την αφαιρεί από την τιμή κάθε σημείου του. Έτσι, απομακρύνεται η μέση τιμή της καταγραφής. Η εφαρμογή αυτού του φίλτρου σε δεδομένα που συλλέχθηκαν με κεραίες υψηλής συχνότητας μπορεί να έχει καλύτερα αποτελέσματα από την εφαρμογή του φίλτρου Dewow (Σπανουδάκης, 2001).

5.2.2 Φίλτρο μέσου σημείου ή κινητού μέσου όρου (*down the trace average*)

Σκοπός του φίλτρου κινητού μέσου όρου είναι η απομάκρυνση του τυχαίου θορύβου και των υψηλών συχνοτήτων από την καταγραφή. Η λειτουργία του στηρίζεται στον υπολογισμό της μέσης τιμής των σημείων που ανήκουν σε παράθυρο προκαθορισμένου εύρους και λαμβάνει χώρα κατά μήκος κάθε ίχνους, δηλαδή κατά τη διεύθυνση του χρόνου (Σπανουδάκης, 2002). Συγκεκριμένα, η τιμή του κεντρικού

σημείου στο παράθυρο αντικαθίσταται από την υπολογισμένη μέση τιμή και το παράθυρο μετατοπίζεται στο επόμενο σημείο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε όλα τα σημεία κάθε ίχνους. Η διαφορά σε σύγκριση με το φίλτρο διόρθωσης Dewow έγκειται στο ότι η υπολογισμένη μέση τιμή δεν αφαιρείται από την τιμή του κεντρικού σημείου του παραθύρου.

Η λειτουργία του φίλτρου απαιτεί από τον χρήστη τον προσδιορισμό του εύρους του παραθύρου (*window width*). Πρόκειται για ένα ακέραιο θετικό αριθμό που δηλώνει το πλήθος των σημείων του παραθύρου. Έτσι, αν ο χρήστης δώσει την τιμή 3 και αφορά το σημείο 15, το φίλτρο υπολογίζει τη μέση τιμή των 14,15 και 16 και αντικαθιστά το αποτέλεσμα στη θέση της τιμής του 15. Το παράθυρο μετατοπίζεται έπειτα στο επόμενο σημείο και η διαδικασία γίνεται σε όλο το μήκος του ίχνους. Η τιμή 1 για το εύρος καθιστά το φίλτρο ανενεργό.

Η βέλτιστη επιλογή της τιμής του εύρους του παραθύρου εξαρτάται από τις υψηλές συχνότητες που επιθυμούμε να αποκοπούν. Ένας τρόπος προσδιορισμού του εύρους του παραθύρου είναι ο υπολογισμός της περιόδου των κυμάτων που θέλουμε να αποκόψουμε σε μονάδες χρόνου (nsec) και η διαίρεσή της με το διάστημα δειγματοληψίας (*sampling interval*). Με την μεθοδολογία αυτή υπολογίζονται τα σημεία που πρέπει να περιλαμβάνει το παράθυρο για να αποκοπούν οι συγκεκριμένες υψηλές συχνότητες.

5.2.3 Φίλτρο μέσου ίχνους (*trace to trace average*)

Σκοπός του φίλτρου μέσου ίχνους είναι να τονίσει μικρής κλίσης και οριζόντιους ανακλαστήρες στην εικόνα των δεδομένων. Παράλληλα, μειώνει το θόρυβο και τα κύματα περίθλασης από σημειακούς ανακλαστήρες (π.χ. σωλήνες, καλώδια, μεταλλικά αντικείμενα), που εμφανίζονται στην εικόνα σαν υπερβολές.

Το φίλτρο αυτό έχει παρόμοιο τρόπο λειτουργίας με το κινητού μέσου όρου με τη διαφορά ότι υπολογίζει τη μέση τιμή μεταξύ των σημείων γειτονικών ιχνών και δημιουργεί ένα νέο μέσο ίχνος. Ο χρήστης καλείται να επιλέξει τον αριθμό των ιχνών (*traces*) που θα προστεθούν. Ο αριθμός 1 καθιστά και αυτό το φίλτρο ανενεργό.

Για να γίνει κατανοητός ο τρόπος που λειτουργεί, θεωρούμε παράδειγμα με αριθμό ιχνών τρία. Εάν βρισκόμαστε στο πέμπτο ίχνος της τομής, τότε οι τιμές των σημείων των ιχνών 4,5 και 6 που αντιστοιχούν στον ίδιο χρόνο αθροίζονται και υπολογίζεται η μέση τιμή τους. Έτσι, προκύπτει ένα νέο ίχνος, το μέσο ίχνος, το οποίο αντικαθιστά το

ίχνος 5. Κατόπιν, η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται για το ίχνος 6 λαμβάνοντας υπόψιν στους υπολογισμούς τα ίχνη 5,6 και 7 κ.ο.κ.

5.2.4 Φίλτρο διαφοράς ιχνών (*trace difference*)

Το φίλτρο διαφοράς ιχνών χρησιμοποιείται για να τονίσει σημειακούς ανακλαστήρες, οι οποίοι προκαλούν το φαινόμενο της περίθλασης (εμφανίζονται στην εικόνα σαν υπερβολές με τα κοίλα προς τα κάτω), ενώ αντενδείκνυται για τη χαρτογράφηση γεωλογικών σχηματισμών επειδή καταστρέφει πληροφορίες που προέρχονται από οριζόντιους και μικρής κλίσης ανακλαστήρες. Κατά την εφαρμογή του κάθε ίχνος αντικαθίσταται από τη διαφορά του από το επόμενο (Σπανουδάκης, 2002).

5.2.5 Φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (*High pass filter*)

Το φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων χρησιμοποιεί έναν περιοδικά επαναλαμβανόμενο αλγόριθμο με σκοπό να τονίσει και να αναδείξει τοπικές λεπτομέρειες που στην αρχική εικόνα δεν διακρίνονται (Σπανουδάκης, 2002).

Το φίλτρο αυτό αποκόπτει συχνότητες κάτω από ένα όριο το οποίο καθορίζεται από τον χρήστη. Ορίζεται σαν ποσοστό της συχνότητας *Nyquist* (π.χ. $f_N = 5000\text{MHz}$, οπότε αν ο χρήστης επιλέξει 10% τότε αποκόπτονται συχνότητες κάτω των 500MHz, αν επιλέξει 20% αποκόπτονται συχνότητες κάτω των 1000MHz κ.ο.κ.).

5.3 Ενίσχυση του σήματος (*Gain*)

Καθώς ο παλμός διαδίδεται στο μέσο η ενέργειά του μειώνεται λόγω απορρόφησης, διάχυσης και γεωμετρικής διασποράς. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να ενισχυθούν τα ασθενέστερα κύματα ώστε να μη χαθούν οι πληροφορίες που περιέχουν.

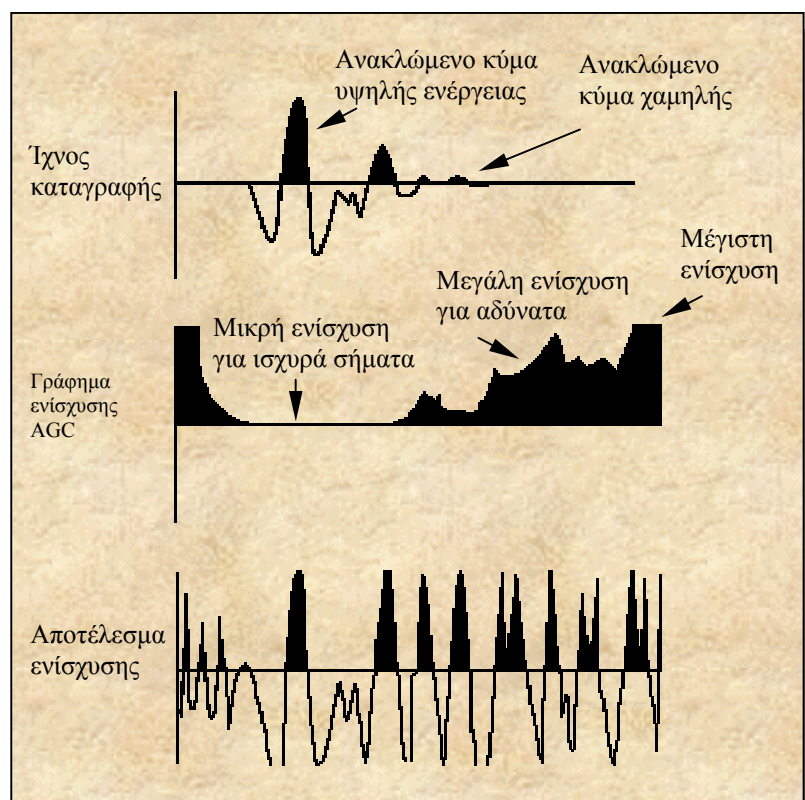
Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι ενίσχυσης (Πουλιούδης, 1999):

1. *Αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης (Automatic Gain Control - AGC)*
2. *Εκθετική ενίσχυση για την αντιστάθμιση της γεωμετρικής διασποράς (Spreading and Exponential Compensation - SEC)*
3. *Σταθερή ενίσχυση (Constant Gain)*

5.3.1 Αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης (Automatic Gain Control - AGC)

Ο αλγόριθμος αυτός έχει σκοπό να ενισχύσει τα ασθενή σήματα που προκύπτουν κατά την εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υπέδαφος. Ουσιαστικά επιτυγχάνει την ισοστάθμιση του σήματος καταγραφής για τον προσδιορισμό και την ανάδειξη της συνέχειας των κυμάτων ανάκλασης και την καλύτερη παρουσίαση ασθενικών ανακλάσεων στην εικόνα. Αυτό επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας στο σήμα ενίσχυση, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ενέργειά του. Πρέπει να σημειωθεί, όμως, ότι από τη στιγμή που θα εφαρμοστεί ο τύπος ενίσχυσης AGC, δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα από τη συσχέτιση των πλατών των κυμάτων που προέρχονται από διαφορετικούς ανακλαστήρες.

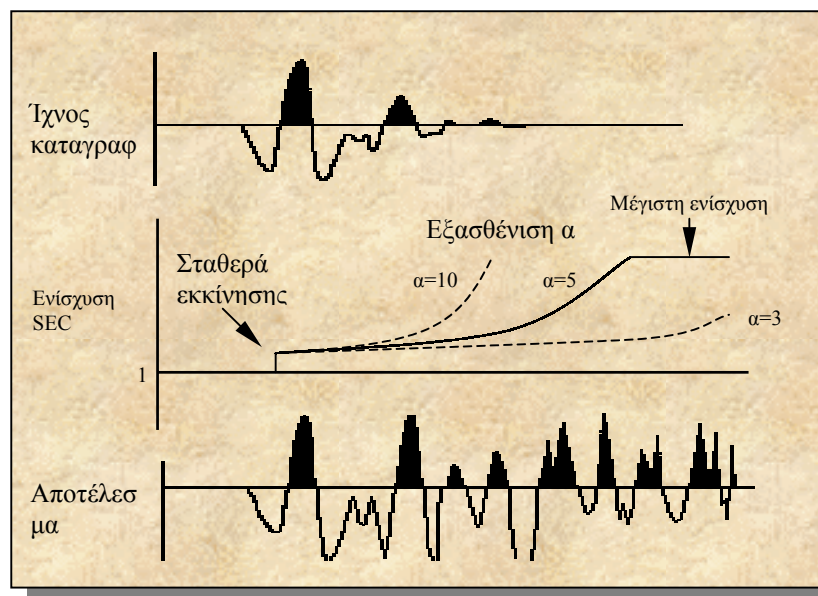
Η ενίσχυση του σήματος πραγματοποιείται σε κάθε σημείο του ίχνους χωριστά. Ο αλγόριθμος αρχικά υπολογίζει τη μέση τιμή (ή μέση ενέργεια) γύρω από το κεντρικό σημείο του παραθύρου και ακολούθως πολλαπλασιάζει τα αρχικά δεδομένα με τον αντίστροφο της μέσης τιμής. Έτσι, τα ισχυρά πλάτη ενισχύονται λίγο ή και καθόλου, ενώ τα ασθενή πλάτη λαμβάνουν ισχυρές τιμές (εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Απεικόνιση της ενίσχυσης AGC και της επίδρασής της στο σήμα καταγραφής (Πουλιούδης, 1999).

5.3.2 Εκθετική ενίσχυση σήματος λόγω απωλειών διασποράς (SEC)

Η ενίσχυση SEC (*Spreading and Exponential Compensation*) αποτελεί σύνθεση γραμμικής και εκθετικής ενίσχυσης που εξαρτάται από το χρόνο (PulseEKKO 1000Run User Guide). Ο σκοπός της ενίσχυσης αυτής είναι η αναπλήρωση της ενέργειας των σημάτων από απώλειες που οφείλονται στην γεωμετρική διασπορά και την εκθετική εξασθένιση της ενέργειας των κυμάτων. Η ενίσχυση SEC μέχρι να προσεγγίσει την μέγιστη τιμή της πραγματοποιείται με εκθετικούς ρυθμούς, ενώ στη συνέχεια γραμμικά² (εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2: Η ενίσχυση SEC (Πουλιούδης, 1999).

5.3.3 Σταθερή ενίσχυση (Constant Gain)

Η σταθερή ενίσχυση είναι ο πιο απλός τύπος ενίσχυσης. Κατά την εφαρμογή της, όλα τα δεδομένα πολλαπλασιάζονται με μία σταθερά. Με τον τρόπο αυτό δε βελτιώνεται ουσιαστικά η εικόνα, αφού η αναλογία μεταξύ μεγάλων και μικρών τιμών στα δεδομένα παραμένει σταθερή.

² Η συνάρτηση που περιγράφει την ενίσχυση SEC είναι: $g(t) = C + \left(1 + \frac{t - (\tau_w + t_o)}{\tau_w}\right) e^{bt}$, όπου C

είναι η σταθερά εκκίνησης, t_o ο χρόνος άφιξης του πρώτου σήματος (timezero), τ_w το εύρος του παλμού και $\beta = (\text{εξασθένιση } \alpha \text{ σε dB/m επί ταχύτητα παλμού } 0,1\text{m/ns}) / 8,69$ (Πουλιούδης, 1999).

5.4 Στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά των σημάτων (*Instantaneous Attributes*)

Το σήμα που στέλνει και λαμβάνει το γεωραντάρ είναι πραγματικός αριθμός. Για μεγαλύτερη όμως ακρίβεια και ευκολία στους υπολογισμούς, το σήμα μετατρέπεται σε μιγαδικό αριθμό (*complex trace*) ³. Το λογισμικό του γεωραντάρ συνδυάζει το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του αναλυτικού σύνθετου σήματος (Σπανουδάκης, 2002), με αποτέλεσμα να ανακτώνται επιπλέον πληροφορίες στην εικόνα του αρχικού σήματος, πολύ χρήσιμες για την αξιολόγηση και ερμηνεία των δεδομένων.

Τα στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά των σημάτων (*instantaneous attributes*) εκφράζουν τις στιγμιαίες μεταβολές ποικίλων παραμέτρων. Οι στιγμιαίες τιμές των μιγαδικών χαρακτηριστικών (όπως το στιγμιαίο πλάτος και οι παράγωγοί του, η στιγμιαία φάση και η στιγμιαία συχνότητα) μπορούν να προσδιοριστούν από τα αναλυτικά σύνθετα σήματα (Taner et al., 1992-2001).

5.4.1 Στιγμιαίο πλάτος (*Instantaneous Amplitude / Trace Envelope*)

Το στιγμιαίο πλάτος $E(t)$ εκφράζει την ανακλώμενη ισχύ, η οποία είναι ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα της ολικής ενέργειας του σήματος σε δεδομένη χρονική στιγμή. Αποτελεί το μέτρο του αναλυτικού σύνθετου σήματος (σχέση 5.1) και χρησιμοποιείται κυρίως για να τονίσει αλλαγές στη λιθολογία και τις γεωλογικές ανομοιομορφίες (ασυνέχειες κτλ).

$$E(t) = \sqrt{[f^2(t) + g^2(t)]} \quad (5.1)$$

5.4.2 Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα ‘decibel’ (*dB based Reflection Strength*)

Το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα ‘decibel’ δίδεται από τη σχέση: $20\log E(t)$. Η κλίμακα dB χρησιμοποιείται συνήθως στο πεδίο των συχνοτήτων για τη απεικόνιση του φάσματος ισχύος (*power spectrum*). Αυτό το μιγαδικό χαρακτηριστικό χρησιμοποιείται

³ Το αναλυτικό σύνθετο σήμα $F(t)$ μπορεί να γραφτεί: $F(t) = f(t) + ig(t)$, όπου $f(t)$ το πραγματικό μέρος (δεδομένα καταγραφής γεωραντάρ) και $g(t)$ το φανταστικό μέρος του σήματος (Taner et al., 1992-2001). Το φανταστικό μέρος (quadrature) είναι το φασικά μετατοπισμένο κατά 90° πραγματικό μέρος και προκύπτει με μετασχηματισμό *Hilbert* στο πραγματικό μέρος (βλ. Παράρτημα Β).

για τη μελέτη της μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB. Η κλασματική ανάλυσή του (*fractal analysis*) δίδει πληροφορίες σχετικά με στρωματογραφικές σειρές και ανωμαλίες λόγω της ύπαρξης υδρογονανθράκων.

5.4.3 Ρυθμός μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους (*Time Derivative of the Envelope*)

Ο ρυθμός μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους $\frac{d[E(t)]}{dt}$ δείχνει τη μεταβολή της ανακλώμενης ισχύος και πιθανές περιοχές απορρόφησης της ενέργειας των κυμάτων. Επίσης, σχετίζεται με ασυνέχειες όταν υπάρχει πλευρική διακύμανση στις τιμές του. Η πρώτη παράγωγος του στιγμιαίου πλάτους ως προς το χρόνο υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{d[E(t)]}{dt} = E(t) * \text{diff}(t) \quad (5.2)$$

όπου το σύμβολο $*$ δηλώνει συνέλιξη και $\text{diff}(t)$ είναι ο διαφορικός τελεστής.

5.4.4 Στιγμιαίο φασματικό εύρος (*Instantaneous Band Width*)

Το στιγμιαίο φασματικό εύρος δίδεται από τη σχέση:

$$\sigma_f^2(t) = \frac{d[E(t)]/dt}{2\pi E(t)} \quad (5.3)$$

Από τη σχέση 5.3 μπορεί να υπολογιστεί η απόλυτη τιμή του ρυθμού μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους $d[E(t)]/dt$. Μονάδα μέτρησης του στιγμιαίου φασματικού εύρους είναι η οκτάβα.

5.4.5 Στιγμιαία φάση (*Instantaneous Phase*)

Η στιγμιαία φάση $Ph(x,t)$ επιτυγχάνει τη συνεχή απεικόνιση της φάσης του σήματος σε σχέση με το χρόνο. Χρησιμοποιείται κυρίως για να δώσει έμφαση στην πλευρική συνέχεια των ανακλαστήρων, αφού μπορεί να κάνει τα αδύναμα σήματα να διακρίνονται. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη γεωλογική χαρτογράφηση, αφού αναδεικνύει τους ανακλαστήρες και τις αλλαγές στη λιθολογία, ενώ δεν παρέχει πληροφορίες για

την ισχύ των ανακλάσεων. Αποτελεί το τόξο εφαπτομένης του αναλυτικού σύνθετου σήματος:

$$Ph(x, t) = \arctan \left[\frac{g(x, t)}{f(x, t)} \right] \quad (5.4)$$

5.4.6 Κανονικοποιημένο πλάτος (*Normalized Amplitude/Envelope*)

Το κανονικοποιημένο πλάτος $normenv(x, t)$ υπολογίζεται ως το συνημίτονο της στιγμιαίας φάσης (σχέση 5.5). Περιέχει όλες τις λεπτομέρειες της στιγμιαίας φάσης χωρίς, όμως, να περιλαμβάνει τις απότομες μεταβολές, με αποτέλεσμα να τονίζει την πλευρική συνέχεια των ανακλαστήρων. Το μιγαδικό χαρακτηριστικό αυτό δεν περιέχει πληροφορίες σχετικά με την ισχύ των ανακλάσεων, ενώ οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ -1 και $+1$.

$$normenv(x, t) = \cos[Ph(x, t)] \quad (5.5)$$

5.4.7 Γινόμενο του πλάτους και του συνημιτόνου της στιγμιαίας φάσης (*Product of real Amplitude and cosine of Instantaneous Phase*)

Αυτό το μιγαδικό χαρακτηριστικό, που δίδεται από τη σχέση: $f(t)\cos[Ph(x, t)]$, ενισχύει τις θετικές και αρνητικές αιχμές (*peaks and troughs*) της καταγραφής και μετατρέπει τις αρνητικές αιχμές σε «ψευδοαιχμές» για την καλύτερη ερμηνεία της στρωματογραφίας.

5.4.8 Γινόμενο του φιλτραρισμένου στιγμιαίου πλάτους και του συνημιτόνου της στιγμιαίας φάσης (*Product of filtered Instantaneous Amplitude and cosine of Instantaneous Phase*)

Για τον υπολογισμό αυτού του μιγαδικού χαρακτηριστικού, αρχικά υπολογίζεται η μέση τιμή του στιγμιαίου πλάτους κάθε ίχνους και αφαιρείται από κάθε σημείο του (εφαρμογή φίλτρου διόρθωσης *DCshift* στο στιγμιαίο πλάτος). Το αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται με το συνημίτονο της στιγμιαίας φάσης (δηλ. το κανονικοποιημένο πλάτος). Το γινόμενο του φιλτραρισμένου στιγμιαίου πλάτους και του συνημιτόνου της στιγμιαίας φάσης χρησιμοποιείται στην ανάλυση των ανωμαλιών του στιγμιαίου πλάτους ενισχύοντας παράλληλα τα ασθενή σήματα και τους συνεχείς ανακλαστήρες.

5.4.9 Στιγμιαία συχνότητα (*Instantaneous Frequency*)

Ο ρυθμός μεταβολής της στιγμιαίας φάσης (σχέση 5.6) είναι η στιγμιαία συχνότητα $Freq(x,t)$. Είναι το μέτρο της συχνότητας του ανακλώμενου παλμού και χρησιμοποιείται για να αναδείξει τις αλλαγές στη λιθολογία, τη μεταβολή του πάχους των σχηματισμών, τις διεπιφάνειες και την ύπαρξη ασυνεχειών. Ουσιαστικά αποτελεί φίλτρο αποκοπής υψηλών συχνοτήτων.

$$Freq(x,t) = \frac{\partial[Ph(x,t)]}{\partial(t)} \quad (5.6)$$

5.4.10 Σταθμισμένη μέση συχνότητα (*Weighted Mean Frequency*)

Για να εξαλειφθούν οι ψευδείς τιμές της στιγμιαίας συχνότητας για σήμα χαμηλής ποιότητας, η στιγμιαία συχνότητα $Freq(t)$ πολλαπλασιάζεται με τις τιμές του στιγμιαίου πλάτους $E(t)$ και έπειτα υπολογίζεται ο μέσος όρος σε μικρό χρονικό παράθυρο. Η σχέση που περιγράφει τη σταθμισμένη μέση συχνότητα $\bar{\omega}(t)$ είναι:

$$\bar{\omega}(t) = \frac{\sum_T [E(t) Freq(t)]}{\sum_T E(t)} \quad (5.7)$$

όπου T χρονικό παράθυρο.

5.4.11 Δείκτης λεπτών στρωμάτων (*Thin Bed Indicator*)

Οι περιοχές όπου η στιγμιαία συχνότητα παρουσιάζει απότομες διακυμάνσεις στις τιμές της ή λαμβάνει αρνητικές τιμές, έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού σχετίζονται με ανακλάσεις που λαμβάνουν χώρα σε λεπτά γεωλογικά στρώματα. Ο ρυθμός μεταβολής της στιγμιαίας φάσης $\omega(t)$ (δηλ. η στιγμιαία συχνότητα) λειτουργεί ως δείκτης λεπτών στρωμάτων όταν η μεταβολή είναι μεγάλη, ενώ η σταθμισμένη μέση τιμή του $\bar{\omega}(t)$ δείχνει τα χαρακτηριστικά τους. Ο δείκτης λεπτών στρωμάτων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$thin-bed(t) = \omega(t) - \bar{\omega}(t) \quad (5.8)$$

5.4.12 Επιτάχυνση της φάσης (Acceleration of the Phase)

Με παραγωγή ως προς το χρόνο της στιγμιαίας συχνότητας προκύπτει η στιγμιαία επιτάχυνση $accel(t)$. Με τον τρόπο αυτό τονίζονται οι τοπικές απότομες διακυμάνσεις της στιγμιαίας συχνότητας και αναδεικνύονται τα λεπτά στρώματα. Παράλληλα, η στιγμιαία επιτάχυνση λειτουργεί έως ένα βαθμό και ως δείκτης της απορρόφησης της ενέργειας των κυμάτων, αναδεικνύοντας την κατανομή της κυρίαρχης συχνότητας των κυμάτων καθώς διαδίδονται στο υπέδαφος.

$$accel(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (5.9)$$

5.4.13 Στιγμιαίος δείκτης ποιότητας (Instantaneous Q/Quality Factor)

Ο στιγμιαίος δείκτης ποιότητας $q(t)$ δίδεται από τη σχέση:

$$q(t) = \frac{-\pi Freq(t)}{decay(t)} \stackrel{(σχ\epsilonση 5.3)}{=} \frac{-Freq(t)}{2\sigma_f^2(t)} \quad (5.10)$$

όπου $decay(t) = \frac{d[E(t)]/dt}{E(t)}$ ο στιγμιαίος ρυθμός εξασθένισης των κυμάτων ⁴.

⁴ Η εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων χαρακτηρίζεται από το συντελεστή Q . Ορίζεται ως ο λόγος της ολικής ενέργειας του κύματος που επιστρέφει στον δέκτη και της ενέργειας που χάνεται κατά την διάρκεια μιας περιόδου. Είναι: $Q = \omega / 2\nu\alpha = f\pi / \nu\alpha$, όπου f η κεντρική συχνότητα εκπομπής, α ο συντελεστής εξασθένισης και ν η ταχύτητα διάδοσης του H/M κύματος (Πουλιούδης, 1999).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΑΠΟ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ‘MONFALCONE’ ΤΗΣ ΒΟΡΕΙΑΣ ΙΤΑΛΙΑΣ

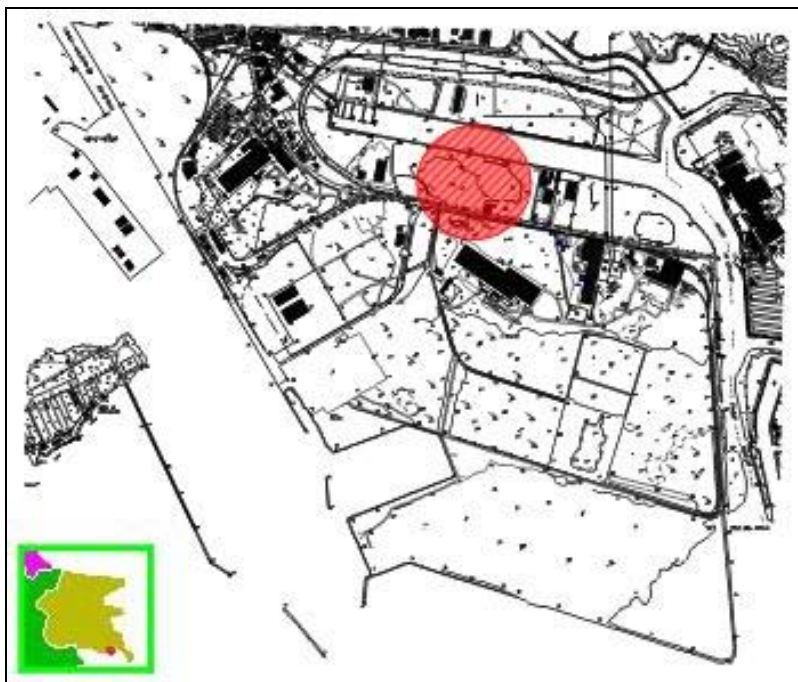
6.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική, παρουσιάζονται αποτελέσματα επεξεργασίας και ερμηνείας δεδομένων υπεδάφειου ραντάρ στην προσπάθεια για ανάδειξη της συμβολής του στη μελέτη της ρύπανσης των εδαφών και υπογείων νερών.

Για την πραγματοποίηση της επεξεργασίας χρησιμοποιούνται στοιχεία από διασκόπηση γεωραντάρ που διεξήχθη στην περιοχή μελέτης ‘*Terme Romane*’, στο *Monfalcone* της βόρειας Ιταλίας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, αξιολογούνται και χρησιμοποιούνται για περαιτέρω ερμηνεία και συσχέτιση με αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών στην εν λόγω περιοχή μελέτης.

6.2 Περιγραφή του χώρου ρύπανσης

Στο δήμο *Monfalcone*, ο οποίος βρίσκεται στη βορειοανατολική Ιταλία και συγκεκριμένα καταλαμβάνει τμήμα της βιομηχανικής περιοχής *Lisert*, διεξήχθησαν από το 1970 γεωφυσικές έρευνες με σκοπό την ανίχνευση και στη συνέχεια αποκατάσταση χώρου ρύπανσης (εικόνα 6.1).



Εικόνα 6.1: Χάρτης στον οποίο απεικονίζεται ο χώρος ρύπανσης 'Terme Romane' στο Monfalcone (με κόκκινο) (CSIM, 2000).

Συγκεκριμένα οι έρευνες επικεντρώθηκαν στην περιοχή 'Terme Romane', η οποία γεωλογικά χαρακτηρίζεται από αλλουβιακές αποθέσεις κατά την περίοδο των παγετώνων, πάνω σε ασβεστολιθικό υπόστρωμα. Οι ασβεστόλιθοι εντοπίζονται σε βάθος 40m και μάλιστα πλησίον του καναλιού, το οποίο διασχίζει την περιοχή.

Κατά την περίοδο 1974 έως 1986, η περιοχή 'Terme Romane' χρησιμοποιήθηκε αρχικά ως χώρος απόθεσης στάχτης, η οποία παραγόταν από το θερμοηλεκτρικό σταθμό ENEL καθώς και από μονάδα αποτέφρωσης των δήμων Monfalcone και Duino. Εκτός από την παραπάνω ρύπανση, η περιοχή αποτελούσε παράλληλα χώρο απόθεσης αστικών απορριμμάτων και υλικών κατεδάφισης πάνω στις προϋπάρχουσες στάχτες. Δεν υπάρχουν ωστόσο επαρκείς πληροφορίες για την προέλευση, την ποσότητα και την περίοδο απόθεσης των στερεών αστικών απορριμμάτων, ενώ η συγκέντρωση των υλικών κατεδάφισης επιβάρυνε την περιοχή μετά το 1986.

Κατά τη διάρκεια επομένως της δεκαετίας 1970-1980 η περιοχή 'Terme Romane' ήταν χώρος παράνομης και νόμιμης απόθεσης υλικών ποικίλης φύσεως. Εκείνη την περίοδο δεν υπήρχε πραγματικός έλεγχος της κατάστασης, καθώς τα απορρίμματα αποτίθεντο πάνω στο φυσικό έδαφος χωρίς να λαμβάνεται κανένα προστατευτικό μέτρο. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα ο όγκος των απορριμμάτων να πλησιάζει τα 108.000m³, ενώ παράλληλα με τον καιρό χάθηκαν τα γεωγραφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά που διατηρούσε ο χώρος απόθεσης την προηγούμενη δεκαετία (από

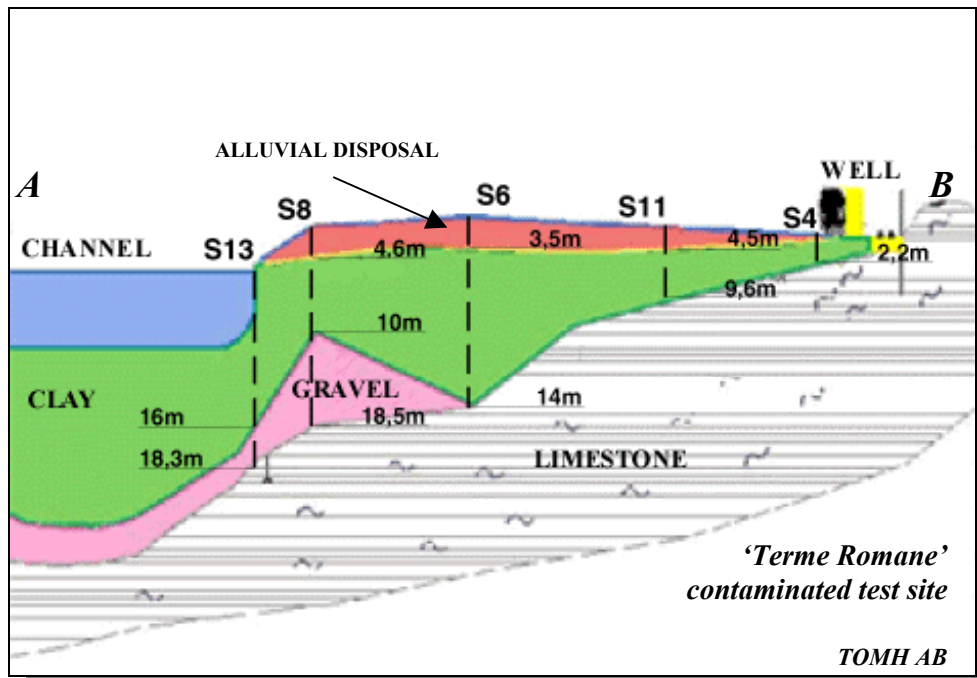
υψώματα στην πεδιάδα που μόλις πλησίαζαν τα 2m δημιουργήθηκαν υψώματα που σήμερα φτάνουν τα 5-6m).

Υδρογεωλογικά ο χώρος ρύπανσης χαρακτηρίζεται από την παρουσία θερμών πηγών, με τη θερμοκρασία του νερού να φτάνει τους 38-40°C στην επιφάνεια. Το νερό των θερμών πηγών περιέχει διαλυμένα χημικά στοιχεία (S^{-2} , Cl^{-} , SO_4^{-2}) και κατά την άνοδό του προς την επιφάνεια διέρχεται διαμέσου ρωγματομένων ασβεστολίθων. Από χημικές αναλύσεις διαπιστώθηκε ότι το νερό που διαπερνά το χώρο ρύπανσης έχει υποστεί μόλυνση, καθώς σε δείγματα αυτού εντοπίστηκαν βακτηρίδια. Αξίζει να σημειωθεί ότι το επίπεδο του νερού που προέρχεται από τις θερμές πηγές επηρεάζεται από τα ρεύματα υφάλμυρου καναλιού, το οποίο βρίσκεται βόρεια της περιοχής '*Terme Romane*'. Γεωλογικές μελέτες απέδειξαν ότι η παρουσία των απορριμμάτων επιδρά αρνητικά στη χημική και βακτηριακή ποιότητα των θερμών υδάτων.

6.3 Προηγούμενες έρευνες και τύποι απορριμμάτων

Οι έρευνες που πραγματοποιήθηκαν από το 1970 έως το 2000 στην υπό μελέτη περιοχή για την οριοθέτηση του χώρου ρύπανσης περιλαμβάνουν:

- ✓ Μία προκαταρκτική μελέτη απέδειξε την παρουσία στάχτης-τέφρας στην ευρύτερη περιοχή της '*Terme Romane*' και όχι μονάχα στο χώρο πλησίον του θερμοηλεκτρικού εργοστασίου. Οι χημικές αναλύσεις από 9 σταθμούς έδειξαν αυξημένες συγκεντρώσεις ορισμένων βαρέων μετάλλων στα ανατολικά της περιοχής, καθώς και αυξημένες συγκεντρώσεις πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων σε όλα σχεδόν τα δείγματα. Η παρουσία των υδρογονανθράκων οφείλεται στην ύπαρξη στάχτης-τέφρας από το θερμοηλεκτρικό σταθμό.
- ✓ Σεισμικές διασκοπήσεις, προκειμένου να προσδιοριστεί τόσο το βάθος και η κλίση των ασβεστολίθων, όσο και οι περιοχές ρωγμάτωσης με την παρουσία των θερμών πηγών (εικόνα 6.2). Παράλληλα πραγματοποιήθηκαν έρευνες που επικεντρώνονταν στον καθορισμό της πορείας ανόδου των θερμών υδάτων, καθώς και στις χημικές αναλύσεις αυτών. Έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή απέδειξαν την παρουσία αργίλων σημαντικής έκτασης και πάχους 20m περίπου. Αναδεικνύεται επίσης η ύπαρξη ενός χαλικώδους ορίζοντα πάχους 5-10m, ο οποίος καταλαμβάνει την οροφή του ασβεστολιθικού σχηματισμού και συνιστά το υπόστρωμα με το μέγιστο βάθος (OGS, 1970).



Εικόνα 6.2: Σχηματική απεικόνιση των γεωλογικών στρωμάτων που αποτελούν το χώρο ρύπανσης (OGS, 1970). Οι γεωτρήσεις S13, S8, S6, S11 και S4 (εικόνα 6.5) δίδουν πληροφορίες για τη γεωλογία και τα πάχη των στρωμάτων της περιοχής (CSIM, 2000).

- ✓ Γεωφυσικές έρευνες, με την πραγματοποίηση τριών γεωηλεκτρικών γραμμών μελέτης, για τον καθορισμό των γεωλογικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους κοντά στο θερμοηλεκτρικό εργοστάσιο (Πανεπιστήμιο της Τεργέστης, 1984).
- ✓ Χημικές και βακτηριολογικές αναλύσεις του νερού των θερμών πηγών (Τμήμα Υγείας του Πανεπιστημίου της Τεργέστης, 1986).
- ✓ Γεωλογικές έρευνες, με την πραγματοποίηση 40 γεωτρήσεων μέχρι 4m βάθος. Από τις έρευνες προσδιορίζονται, μονάχα οπτικά, τρεις διαφορετικοί τύποι απορριμμάτων (Ambiente S.p.A., 1998):
 - Αστικά στερεά απορρίμματα: ανατολικά του χώρου ρύπανσης, ανάμεσα στο κανάλι και στο θερμοηλεκτρικό σταθμό, είναι εμφανής η ύπαρξη απορριμμάτων που αποτελούνται από πλαστικό, χαρτί, γυαλί, μέταλλα, βαφές ακόμα και βακτήρια. Το πάχος των αστικών απορριμμάτων φτάνει τα 4-5m και η διάταξή τους χαρακτηρίζεται από εναλλαγές στρωμάτων απορριμμάτων (από δέκατα σε εκατοστά του μέτρου) ακόμα και με στάχτες.
 - Στάχτες: βόρεια του θερμοηλεκτρικού σταθμού παρατηρούνται παρεμβολές από γκρι στάχτες-τέφρες (απόθεση ENEL), με μέγεθος που ποικίλλει από δέκατο του μέτρου μέχρι μέγιστο των 2-3m. Στο χώρο που βρίσκεται πλησίον του

θερμοηλεκτρικού σταθμού παρατηρούνται στην επιφάνεια μεγάλοι όγκοι τσιμέντου, οι οποίοι προέρχονται από κατεδάφιση βιομηχανικών μονάδων.

- Σωρείες: στην περιοχή βόρεια του θερμοηλεκτρικού σταθμού είναι εμφανείς σωρείες, οι οποίες έχουν μορφή και διαστάσεις ανάλογες με αυτές ενός φορτίου φορτηγού. Οι σωρείες αποτελούνται από βιομηχανικά απορρίμματα, σκωρίες χυτηρίων και υλικά εκσκαφών.
- ✓ Στα μέσα του Φεβρουαρίου 2000 πραγματοποιήθηκε η Α' φάση της δειγματοληψίας εδάφους (κάθε 1m σε βάθος) για τον προσδιορισμό του είδους της ρύπανσης. Διεξήχθησαν 15 γεωτρήσεις (εικόνα 6.5), προκειμένου να διαπιστωθούν το βάθος του ασβεστολιθικού υποστρώματος, οι στρωματογραφικές ενότητες, οι διαστάσεις και η κατανομή της ρύπανσης. Εγκαταστάθηκαν επιπλέον 6 πιεζομετρικοί σταθμοί (εικόνα 6.6), από τους οποίους συλλέγονταν πληροφορίες για την κατεύθυνση του υπογείου νερού, σε περιόδους ελάχιστης και μέγιστης συγκέντρωσης υδάτων, καθώς και για την εξάπλωση της ρύπανσης κατά μήκος των γραμμών μελέτης.

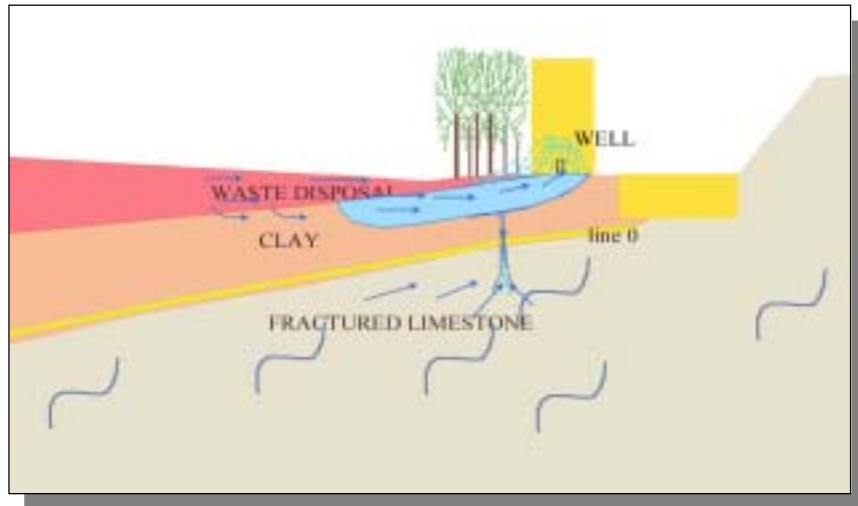
Όσον αφορά τις χημικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την Α' και Β' φάση της έρευνας, αυτές απέδειξαν υψηλή συγκέντρωση ορισμένων βαρέων μετάλλων, όπως *As*, *Cd*, *Cr*, *Cu*, *Pb* και *Zn*. Τα συγκεκριμένα μέταλλα απαντώνται κυρίως σε δείγματα από στάχτες-τέφρες, που προέρχονται από το πρώτο στρώμα των σταχτών.

Συγκρίνοντας λοιπόν τις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων και στις δύο φάσεις της δειγματοληψίας, αποφασίστηκε η εστίαση της έρευνας στο ασβεστολιθικό-αργιλώδες στρώμα. Στο επίπεδο αυτό τοποθετήθηκε η υποθετική γραμμή μηδέν, η οποία αντιστοιχεί στη ρύπανση από τα απορρίμματα (εικόνα 6.3).

Ως προς τις βακτηριαδιακές αναλύσεις, διαπιστώθηκε στα δείγματα η παρουσία του βακτηριδίου '*Vibrio Cholerae*', χαρακτηριστικού των υφάλμυρων υδάτων που παρεισδύουν από το κανάλι εντός της περιοχής μελέτης. Παράλληλα, εντοπίστηκαν υψηλές συγκεντρώσεις στρεπτόκοκκων, γεγονός που υποδεικνύει ρύπανση ανθρωπογενούς προέλευσης. Το συγκεκριμένο είδος ρύπανσης οφείλεται στη διείσδυση υδάτων, καθώς αυτά αντλούνταν μέσα σε υλικά εκφόρτωσης.

Από τη συγκεκριμένη έρευνα προσδιορίστηκαν τελικά οι διαστάσεις των απορριμμάτων. Οι στάχτες-τέφρες από το θερμοηλεκτρικό σταθμό βρίσκονται υπό τη μορφή σκόνης, τα στερεά αστικά απορρίμματα έχουν μέγεθος 2cm έως 1 m και

τα υλικά κατεδάφισης ποικίλλουν σε διαστάσεις από 2cm έως αρκετά μέτρα. Το χρώμα όλων των απορριμμάτων είναι μαύρο, ενώ δεν αναδεικνύουν καμία χαρακτηριστική οσμή (CSIM, 2000).



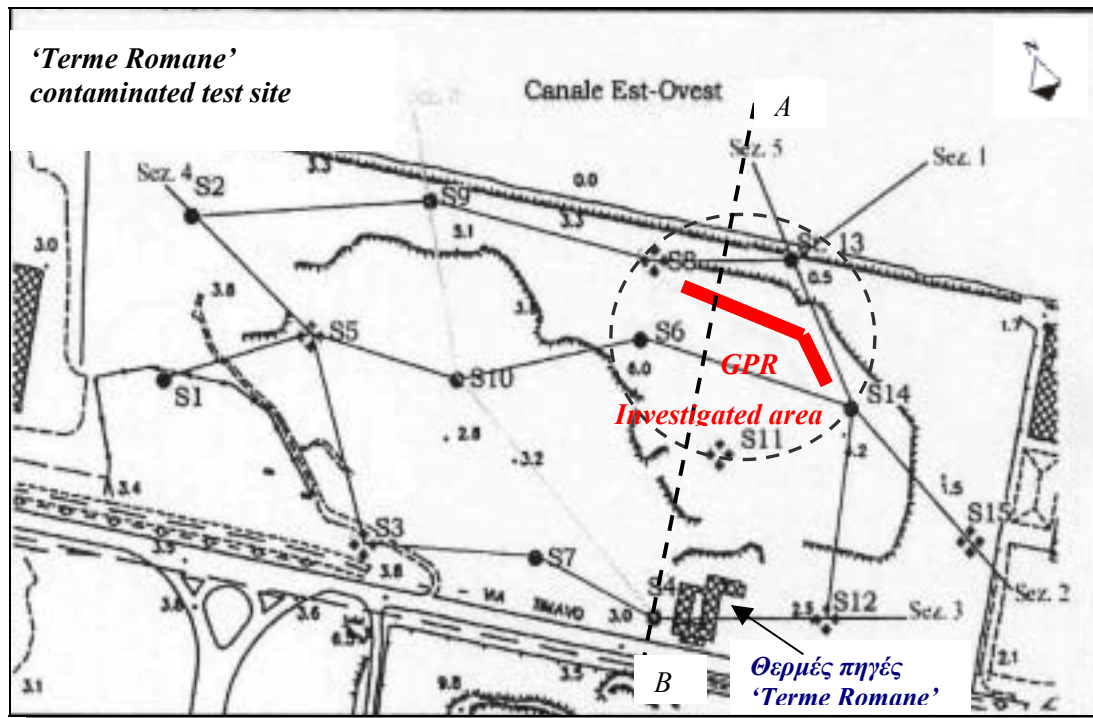
Εικόνα 6.3: Γεωλογία της περιοχής ρύπανσης στην οποία απεικονίζεται η υποθετική γραμμή μηδέν (line 0) για τα απορρίμματα (CSIM, 2000).

6.4 Γεωφυσική διασκόπηση με υπεδάφειο ραντάρ

Τον Οκτώβριο του 2000 πραγματοποιήθηκε από το Πανεπιστήμιο της Τεργέστης γεωφυσική έρευνα με υπεδάφειο ραντάρ, πλησίον του καναλιού και βορειοανατολικά του χώρου ρύπανσης 'Terme Romane' (εικόνες 6.4-6.5). Στόχος της μελέτης ήταν η ανίχνευση και οριοθέτηση της ρυπογόνου περιοχής για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων των προηγούμενων ερευνών.



Εικόνα 6.4: Διεξαγωγή έρευνας υπεδάφειου ραντάρ με το σύστημα μονάδων RAMAC/GPR, βορειοανατολικά της περιοχής ρύπανσης 'Terme Romane', Monfalcone.



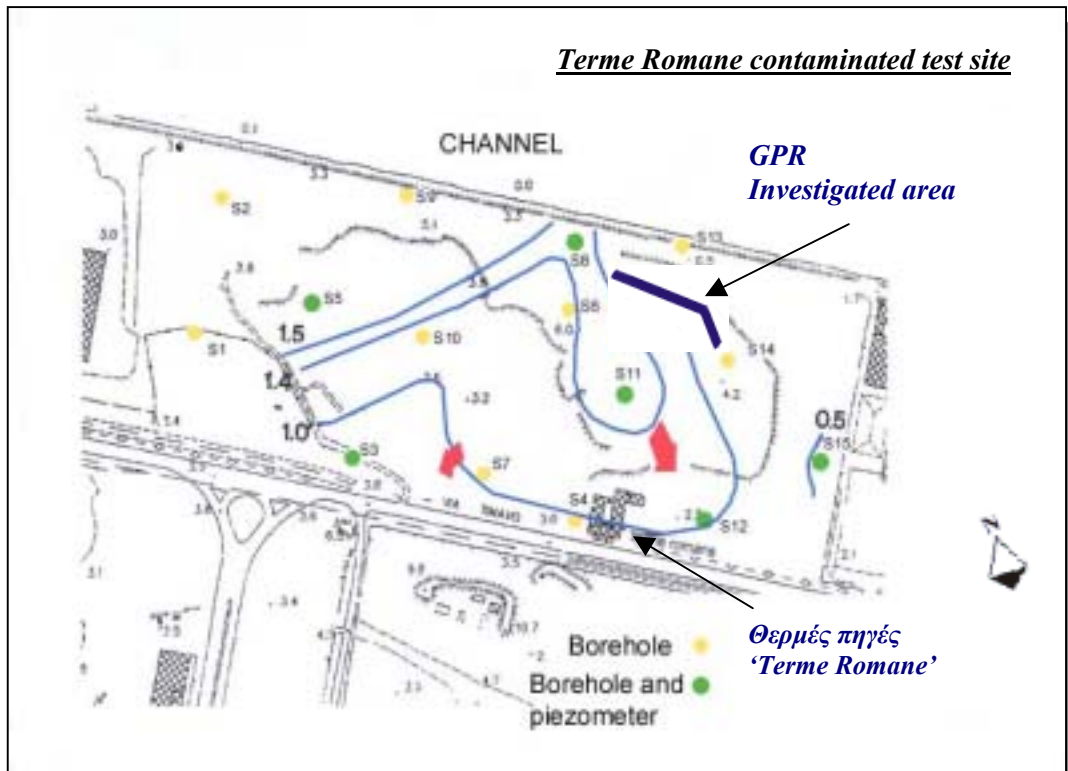
Εικόνα 6.5: Απεικόνιση της περιοχής μελέτης, πλησίον του καναλιού Α-Δ, στην οποία πραγματοποιήθηκε η έρευνα με υπεδάφειο ραντάρ. Οι γεωτρήσεις S8, S13, S14, S11 δίδουν πληροφορίες για τη γεωλογία και υδρογεωλογία της υπό μελέτη περιοχής (CSIM, 2000).

6.4.1 Γεωλογία της υπό μελέτη περιοχής

Σύμφωνα με τις μελέτες της Α' και Β' φάσης δειγματοληψίας εδάφους που προαναφέρθηκαν, οι γεωτρήσεις S8 και S11, οι οποίες βρίσκονται πλησίον της γραμμής μελέτης του γεωραντάρ στην περιοχή ρύπανσης (εικόνα 6.5), είναι ανάμεσα σε αυτές που τοποθετήθηκαν πιεζόμετρα. Από τις μετρήσεις, που ενδεικτικά αναφέρονται στον πίνακα 6.1, εξάγονται συμπεράσματα για την κίνηση του υπογείου νερού και σχεδιάζονται χάρτες, όπου απεικονίζονται οι ισοφρεατικές γραμμές (εικόνα 6.6).

	6/6	7/6	9/6	12/6	14/6	20/6	29/6	3/7	6/7	9/7
Πιεζόμετρα:	Βάθος σε m (από την επιφάνεια)									
S8	2,88	2,91	2,93	2,93	3,04	3,16	3,25	3,19	3,02	2,92
S11	3,07	3,08	3,11	3,15	3,21	3,36	3,45	3,33	3,23	3,11
Πιεζόμετρα:	Βάθος σε m (απόλυτο υψόμετρο)									
S8	1,409	1,379	1,359	1,359	1,249	1,129	1,039	1,099	1,269	1,369
(4,289m)										
S11	1,558	1,548	1,518	1,478	1,418	1,268	1,178	1,298	1,398	1,518
(4,628m)										

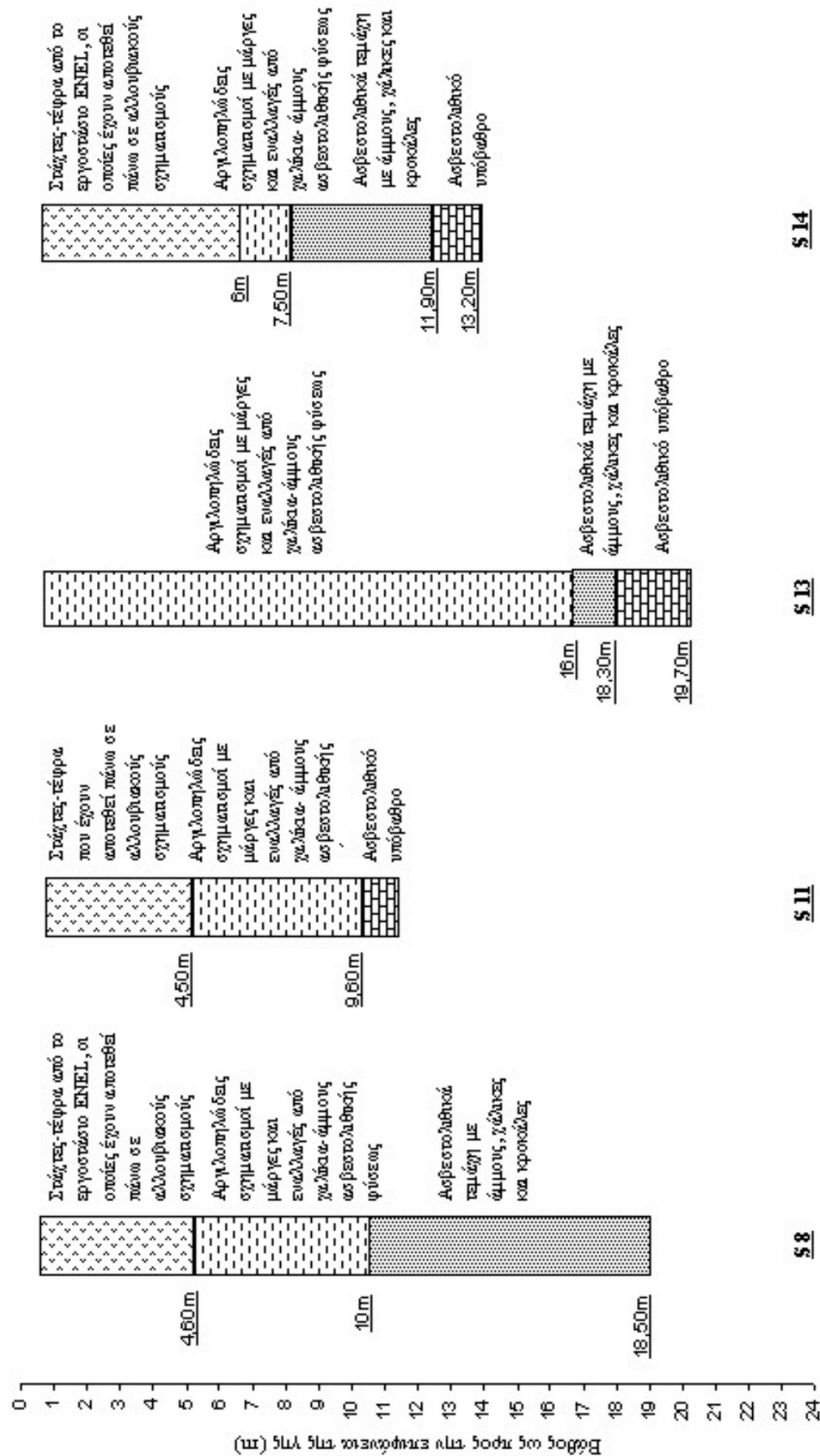
Πίνακας 6.1: Πιεζομετρικές μετρήσεις στις γεωτρήσεις S8 και S11 κατά την περίοδο 6/6 έως 9/7 του 2000 (σε παρένθεση δίδονται τα απόλυτα υψόμετρα των S8, S11) (CSIM, 2000).



Εικόνα 6.6: Ισοφρεατικός χάρτης που απεικονίζει την κατεύθυνση του νερού στην περιοχή μελέτης την περίοδο της μέγιστης συγκέντρωσης υδάτων. Φαίνονται τα σημεία πραγματοποίησης των 15 γεωτρήσεων (S1-S15) και των 6 πιεζομετρικών σταθμών (με πράσινο χρώμα) (CSIM, 2000).

Στη σελίδα που ακολουθεί, παρατίθενται γεωλογικά στοιχεία από γεωτρήσεις (S8, S13, S14, S11) που πραγματοποιήθηκαν το Φεβρουάριο του 2000 περιμετρικά της περιοχής μελέτης γεωραντάρ και βορειοανατολικά του χώρου ρύπανσης 'Terme Romane' (εικόνα 6.5).

ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ (Φεβρουάριος 2000, CSIM)



Έπειτα από πρόσφατη επικοινωνία με τον υπεύθυνο του τμήματος του Πανεπιστημίου της Τεργέστης για την ανίχνευση ρύπανσης στο 'Monfalcone', γνωστοποιήθηκε ότι τον Αύγουστο του 2002 διεξήχθη ακόμα μία γεώτρηση στις ίδιες γραμμές μελέτης όπου πραγματοποιήθηκε και η διασκόπηση με το γεωραντάρ. Η νέα γεώτρηση προσκόμισε επιπλέον πληροφορίες για τη γεωλογία του χώρου μελέτης. Σύμφωνα λοιπόν με τα πρόσφατα στοιχεία, το επιφανειακό τμήμα της περιοχής, στα πρώτα 1,5m, αποτελείται από φερτά υλικά (πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις με πιθανή παρουσία στάχτης - τέφρας από το θερμοηλεκτρικό σταθμό ENEL), ενώ το επόμενο στρώμα χαρακτηρίζεται ως ασβεστούχος ιλύς - άμμος - αργιλοπηλώδη υλικά (*sandy loam*). Η γεώτρηση, μέχρι το βάθος στο οποίο έφτασε, βρισκόταν ακόμα μέσα στο δεύτερο στρώμα και δε συνάντησε κάποιον διαφορετικό σχηματισμό.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η πρόσφατη γεώτρηση δεν ανίχνευσε κάποιο είδος ρύπανσης μέχρι το βάθος στο οποίο έφτασε. Οριοθέτησε μεν τους πρώτους γεωλογικούς σχηματισμούς που συνάντησε (τα πάχη των στρωμάτων δε βρίσκονται σε συμφωνία με αυτά των γεωτρήσεων που προαναφέρονται), αλλά δεν εντόπισε ρυπογόνους παράγοντες, όπως είχε διαπιστωθεί σε προηγούμενες έρευνες. Σύμφωνα με τον υπεύθυνο μελέτης, τα ίχνη από στάχτες-τέφρα που αναφέρονται στο πρώτο στρώμα των φερτών υλικών αποτελούν μονάχα υπόνοιες ρύπανσης και δεν είναι ικανά να οδηγήσουν στο συνολικό χαρακτηρισμό της περιοχής ως ρυπογόνου. Στην παρούσα φάση οι συγκεκριμένες ενδείξεις για ρύπανση δε μπορούν να επιβεβαιωθούν, καθώς απαιτούνται περισσότερες πληροφορίες ¹.

6.4.2 Διεξαγωγή μετρήσεων και συλλογή δεδομένων γεωραντάρ

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων υπεδάφειου ραντάρ χρησιμοποιήθηκε σύστημα μονάδων RAMAC/GPR συνδεδεμένο με κεραίες συχνότητας 250MHz και 500MHz. Οι διασκοπήσεις και για τα δύο ζεύγη κεραιών διεξήχθησαν σε 6 γραμμές μελέτης, με ισαπόσταση διαδοχικών γραμμών 0,5m. Σε κάθε γραμμή μελέτης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αρχικά σε τμήμα μήκους 9m με προσανατολισμό νότου-βορρά και ακολούθως σε τμήμα 20m με προσανατολισμό νοτιανατολικά-βορειοδυτικά,

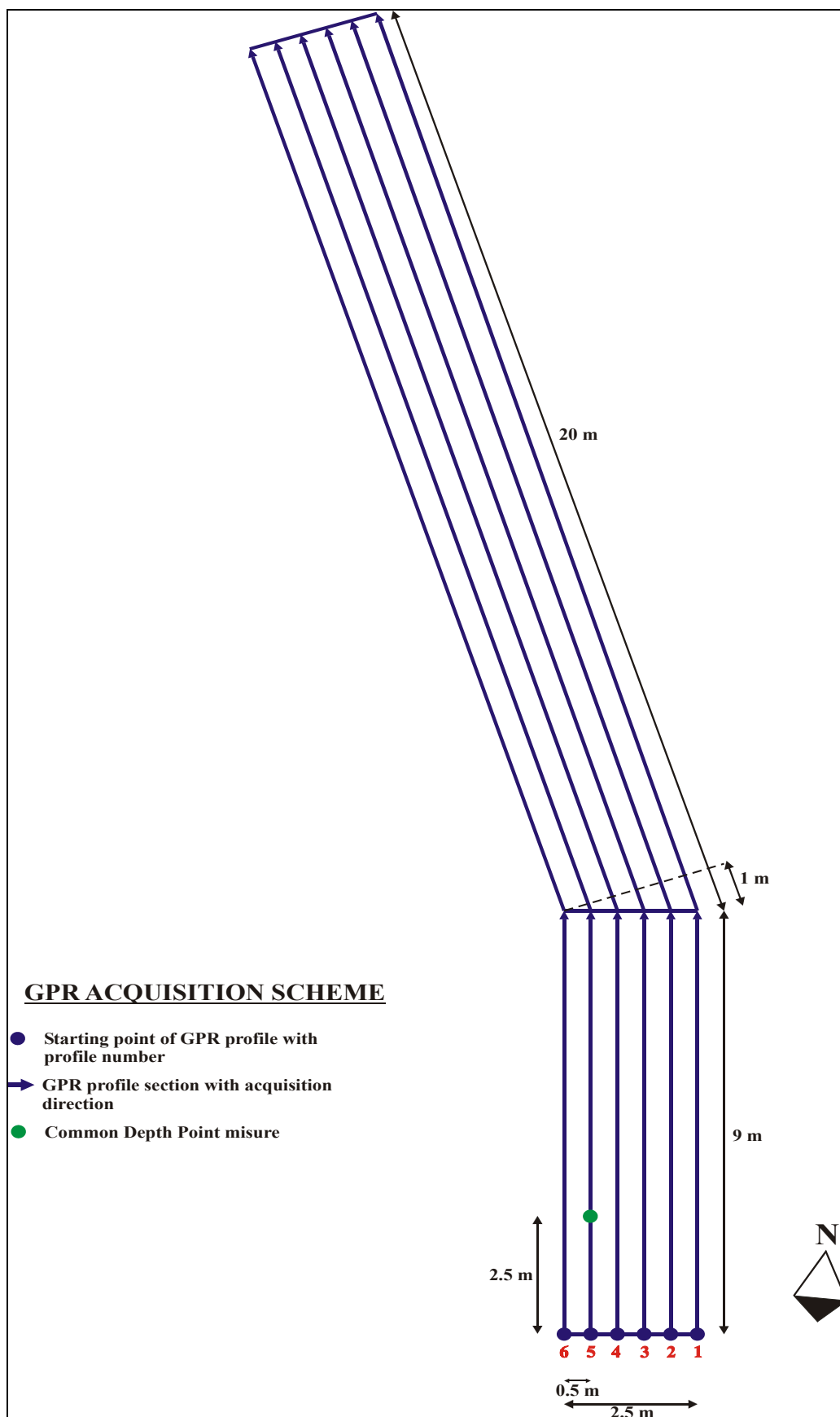
¹ Τα στοιχεία που προσδίδει η νέα γεώτρηση, λόγω της πρόσφατης διεξαγωγής της, λαμβάνονται ως περισσότερο αντιπροσωπευτικά σε σχέση με προηγούμενες γεωτρήσεις.

όπως παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 6.7. Η θέση των γραμμών μελέτης στον ευρύτερο χώρο ρύπανσης 'Terme Romane' φαίνεται στις εικόνες 6.5 και 6.6.

Όσον αφορά τις μετρήσεις με κεραίες συχνότητας 250MHz, συλλέχθηκαν συνολικά 512 δείγματα ανά ίχνος, με διάστημα δειγματοληψίας 0,397nsec (*sample interval*) και απόσταση ιχνών 5cm (*trace interval*). Με τις κεραίες συχνότητας 500MHz συλλέχθηκαν 1024 δείγματα ανά ίχνος, με διάστημα δειγματοληψίας 0,203nsec και απόσταση ιχνών 5cm.

Επιπλέον, μετρήσεις κοινού ενδιαμέσου σημείου (*CMP*) πραγματοποιήθηκαν σε μία γραμμή μελέτης εύρους 30-370cm (*offset range*) με κατεύθυνση βορρά-νότου και σε μία δεύτερη με εύρος 30-430cm και κατεύθυνση ανατολής-δύσης. Για καθεμία από τις δύο γραμμές μελέτης, ελήφθησαν 512 δείγματα ανά ίχνος, με διάστημα δειγματοληψίας 0,397nsec, ενώ το βήμα διασκόπησης (*offset increment*) αυξάνονταν κατά 10cm διατηρώντας πάντα σταθερό το ενδιαμέσο σημείο (εικόνα 6.7). Οι συγκεκριμένες μετρήσεις διεξήχθησαν με κεραία συχνότητας 250MHz, που λειτουργούσε ως πομπός και κεραία συχνότητας 500MHz, ως δέκτης (*multi fold*).

Όλα τα δεδομένα καταγραφής από την πραγματοποίηση των μετρήσεων γεωραντάρ μετατρέπονται σε μορφή *SEG-Y*.



Εικόνα 6.7: Γεωμετρία των γραμμών μελέτης του υπεδάφειου ραντάρ. Η θέση των γραμμών στον ευρύτερο χώρο ρύπανσης 'Terme Romane' φαίνεται στις εικόνες 6.5 - 6.6.

6.5 Επεξεργασία δεδομένων υπεδάφειου ραντάρ

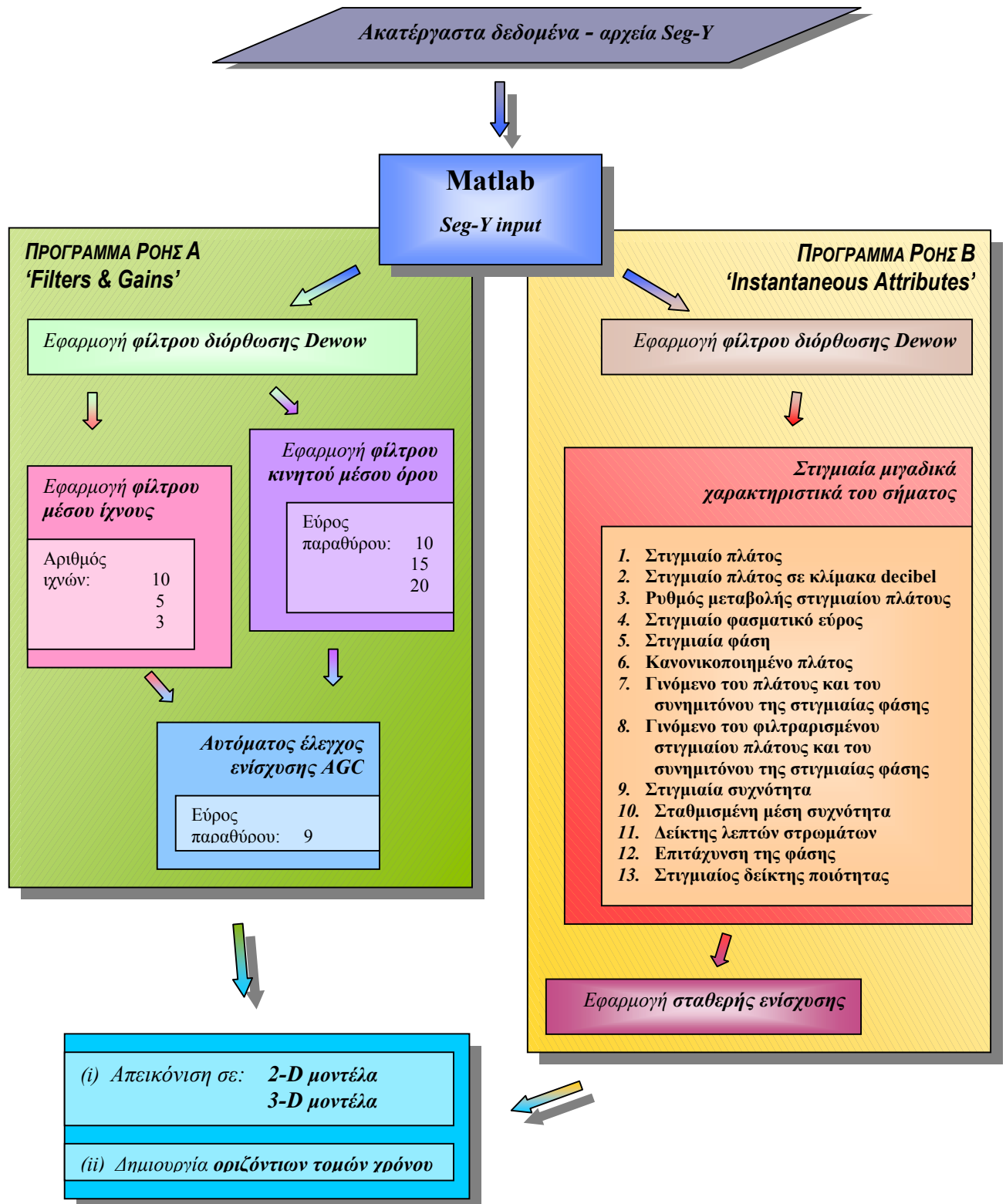
Η επεξεργασία των δεδομένων από τις μετρήσεις γεωραντάρ στην περιοχή ρύπανσης 'Terme Romane' πραγματοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων (Πολυτεχνείο Κρήτης). Βασικό αντικείμενο είναι η εφαρμογή τεχνικών μαθηματικής επεξεργασίας στις καταγραφές (αρχικό σήμα) του υπεδάφειου ραντάρ. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ευρέως και χωρίς προβλήματα το λογισμικό πακέτο επεξεργασίας δεδομένων 'Matlab' της εταιρείας Mathworks[®], στο οποίο εισήχθησαν αρχεία σε μορφή SEG-Y.

Η επεξεργασία των δεδομένων γεωραντάρ μπορεί να διακριθεί σε δύο ενότητες:

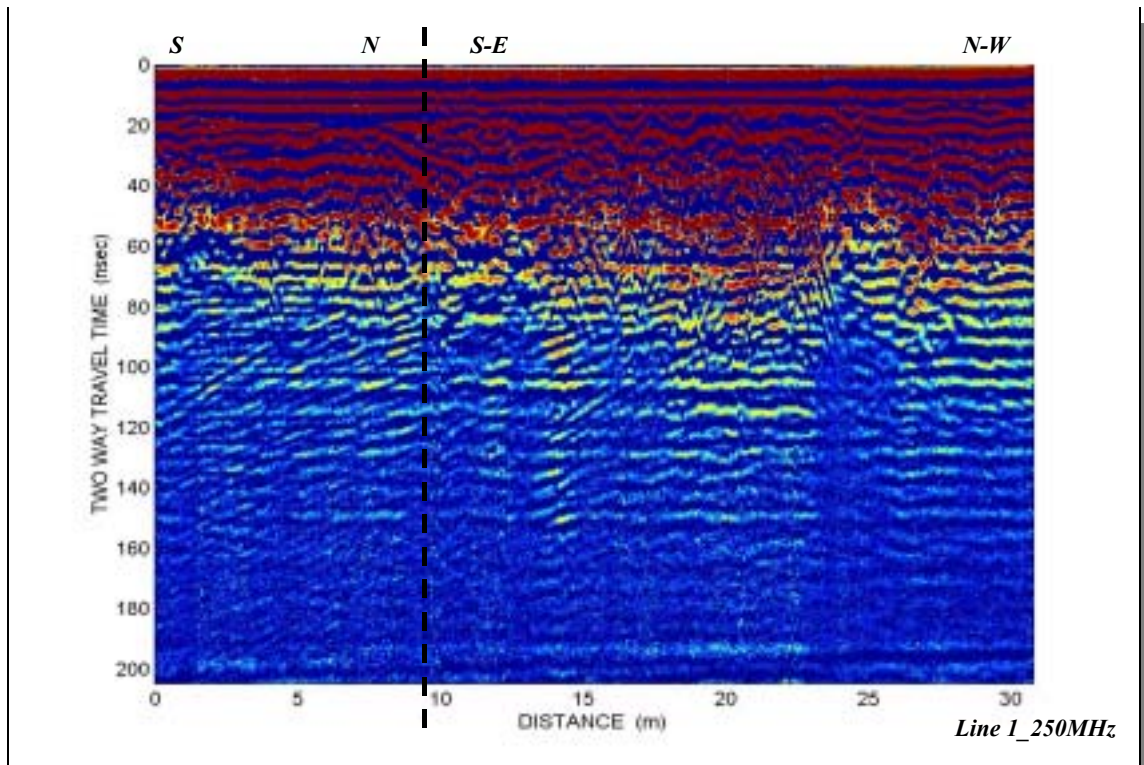
- *Ενότητα 1:* Πραγματοποιείται μαθηματική επεξεργασία των δεδομένων των τομών ανάκλασης (250MHz & 500MHz GPR profiles) με σκοπό την ενίσχυση του αρχικού σήματος -με αντίστοιχη μείωση του θορύβου- τον τονισμό ορισμένων χαρακτηριστικών και ανωμαλιών (όπως οριζόντιοι και κεκλιμένοι ανακλαστήρες) και τη γενικότερη βελτίωση της ποιότητας απεικόνισης των δεδομένων (βλ. Κεφάλαιο 5). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται τόσο σε δισδιάστατα, όσο και σε τρισδιάστατα μοντέλα, ενώ με χρήση του προγράμματος 'Transform' παράγονται οριζόντιες τομές χρόνου (*time slices*) σε περιοχές ιδιαίτερου ενδιαφέροντος.
- *Ενότητα 2:* Τα δεδομένα από τις μετρήσεις κοινού ενδιάμεσου σημείου (*Multi fold GPR profiles*) επεξεργάζονται προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στα γεωλογικά στρώματα.

6.5.1 Μαθηματική επεξεργασία δεδομένων τομών ανάκλασης

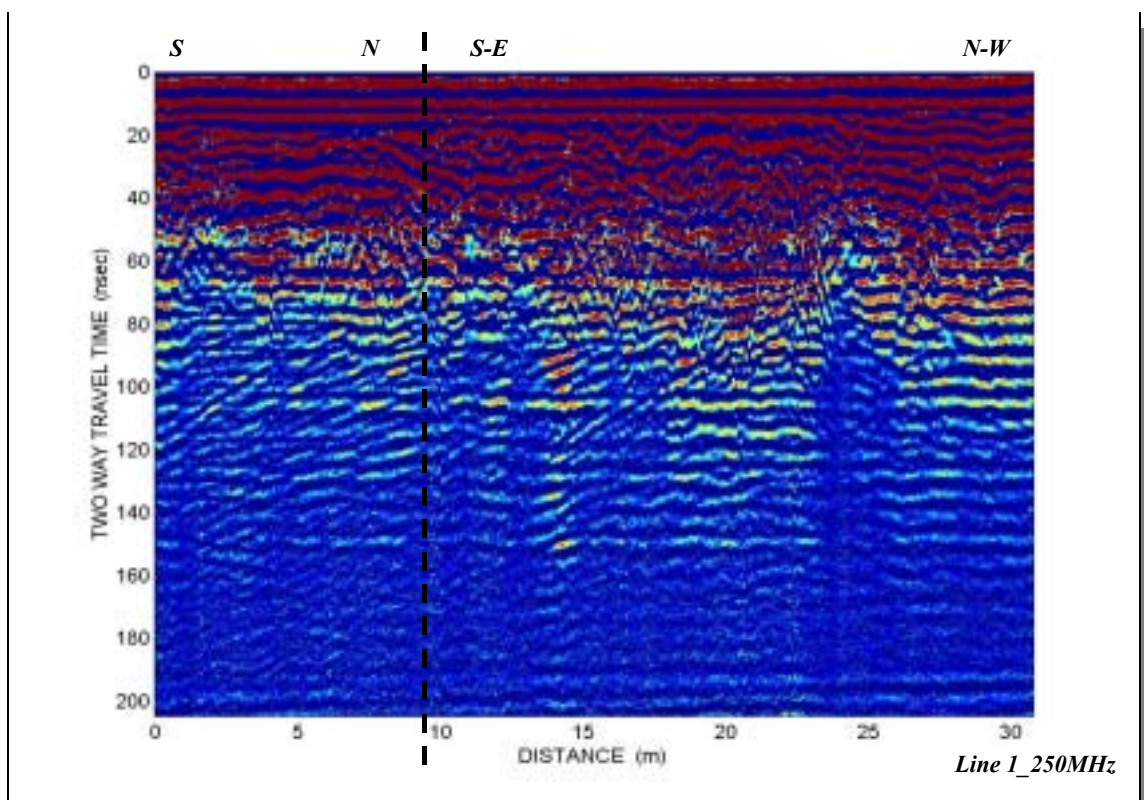
Για την επεξεργασία των δεδομένων των τομών ανάκλασης δημιουργήθηκαν δύο προγράμματα ροής τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα 6.8 και εφαρμόστηκαν στο σύνολο των στοιχείων που συλλέχθηκαν από τις κεραίες συχνότητας 250MHz, αλλά και 500MHz. Ωστόσο, λόγω του πλήθους των δεδομένων, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει παρουσίαση αποτελεσμάτων της επεξεργασίας δεδομένων μονάχα για την πρώτη γραμμή μελέτης με κεραίες συχνότητας 250MHz, ως αντιπροσωπευτικό δείγμα της συνολικής εργασίας που εκπονήθηκε.



Εικόνα 6.8: Διάγραμμα ροής της μαθηματικής επεξεργασίας των δεδομένων των τομών ανάκλασης (250MHz & 500MHz GPR profiles, Terme Romane contaminated test site). Το θεωρητικό υπόβαθρο των αλγορίθμων (filters, gains, instantaneous attributes) που εφαρμόζονται στα ακατέργαστα δεδομένα (καταγραφές γεωραντάρ) δίδεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5. Στις εικόνες 6.9 έως 6.35 παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα εφαρμογής των δύο προγραμμάτων ροής μαθηματικής επεξεργασίας (GPR line 1_data 250MHz).

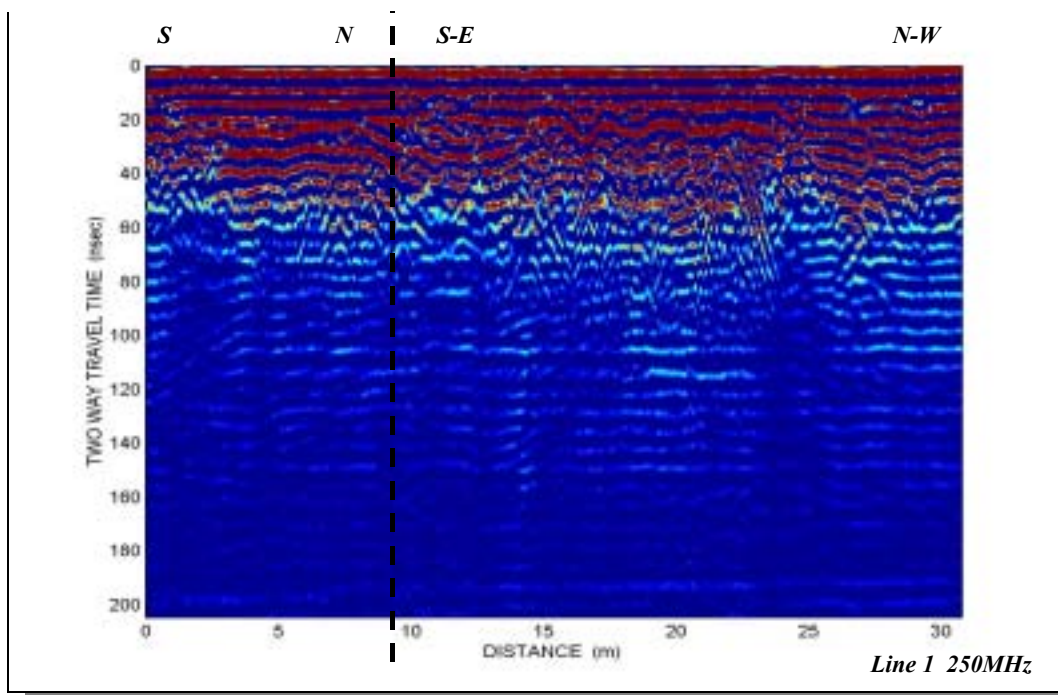


Εικόνα 6.9: Απεικόνιση των καταγραφών γεωραντάρ με τη βοήθεια του λογισμικού 'Matlab'. Τα δεδομένα δεν έχουν υποστεί κανένα είδος επεξεργασίας (ακατέργαστα δεδομένα - *Raw data*).

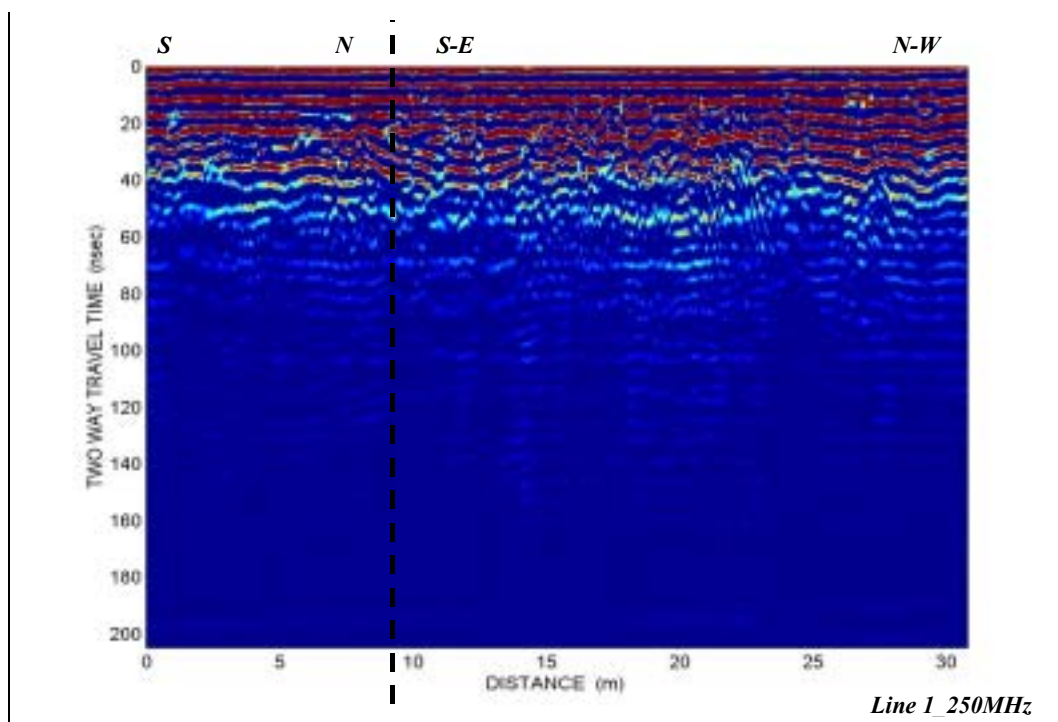


Εικόνα 6.10: Αποτέλεσμα εφαρμογής του φίλτρου διόρθωσης Dewow στα ακατέργαστα δεδομένα (εξομάλυνση κατά τη διεύθυνση του χρόνου). Διακρίνονται οι ισχυρές πρώτες καταγραφές έως τα 60ns, δύο ισχυροί οριζόντιοι ανακλαστήρες στα 60 και 110ns αντίστοιχα, καθώς και κεκλιμένες ανακλάσεις στην περιοχή εξασθένησης των σημάτων, κάτω από τα 60ns. {*Raw data > Dewow*}

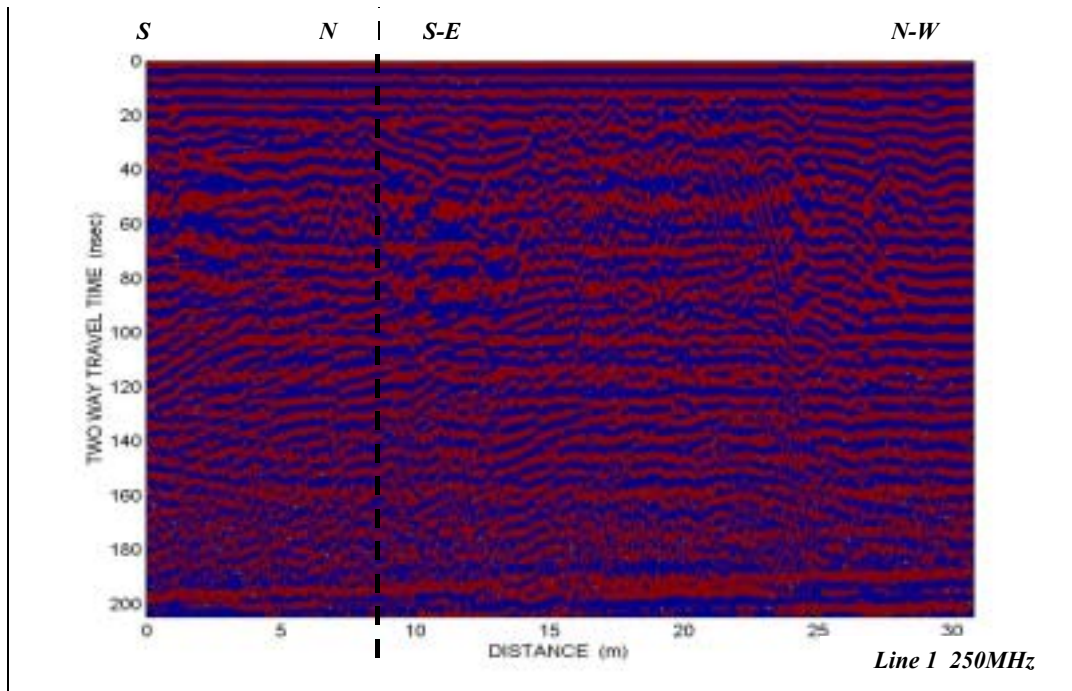
✓ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΡΟΗΣ Α: 'Filters & Gains'



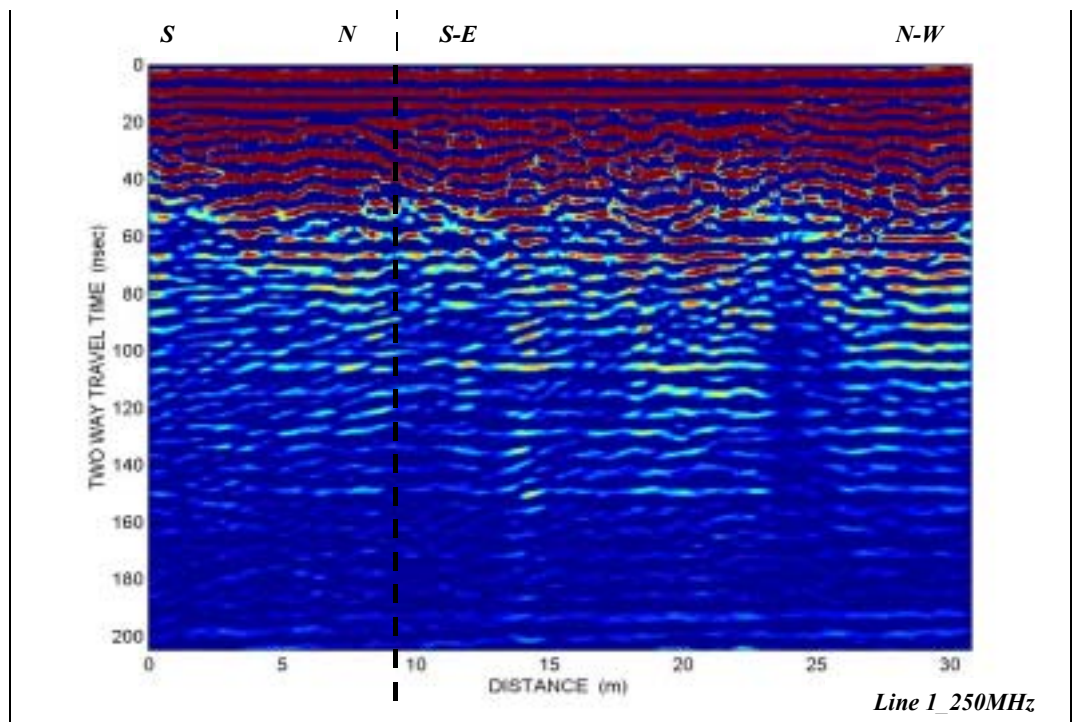
Εικόνα 6.11: Αποτέλεσμα εφαρμογής του φίλτρου κινητού μέσου όρου, με εύρος παραθύρου 10 (4nsec), στο αποτέλεσμα της εικόνας 6.10. Το φίλτρο αυτό επενεργεί κατά μήκος των ιχνών (εξομάλυνση κατά τη διεύθυνση του χρόνου), τονίζοντας τις κεκλιμένες ανακλάσεις. Αποτέλεσμα της περίθλασης των κυμάτων γίνεται εμφανές στην περιοχή μεταξύ 30-60ns. {Raw data > Dewow > down the trace average (window width: 10)}



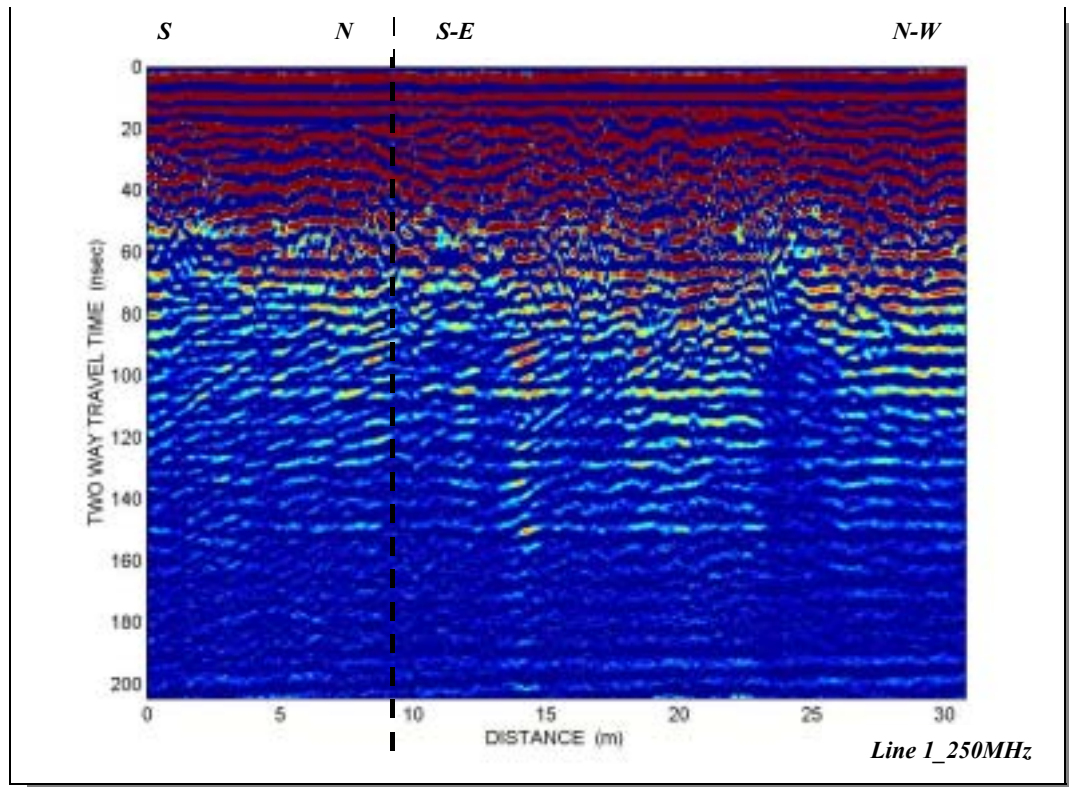
Εικόνα 6.12: Αποτέλεσμα εφαρμογής του φίλτρου κινητού μέσου όρου με εύρος παραθύρου 20 (8nsec). Οι οριζόντιοι ανακλαστήρες εξομαλύνονται περισσότερο με αύξηση του εύρους παραθύρου, γεγονός που αποτυπώνεται ιδιαίτερα στους μεγάλους χρόνους καταγραφής. {Raw data > Dewow > down the trace average (window width: 20)}



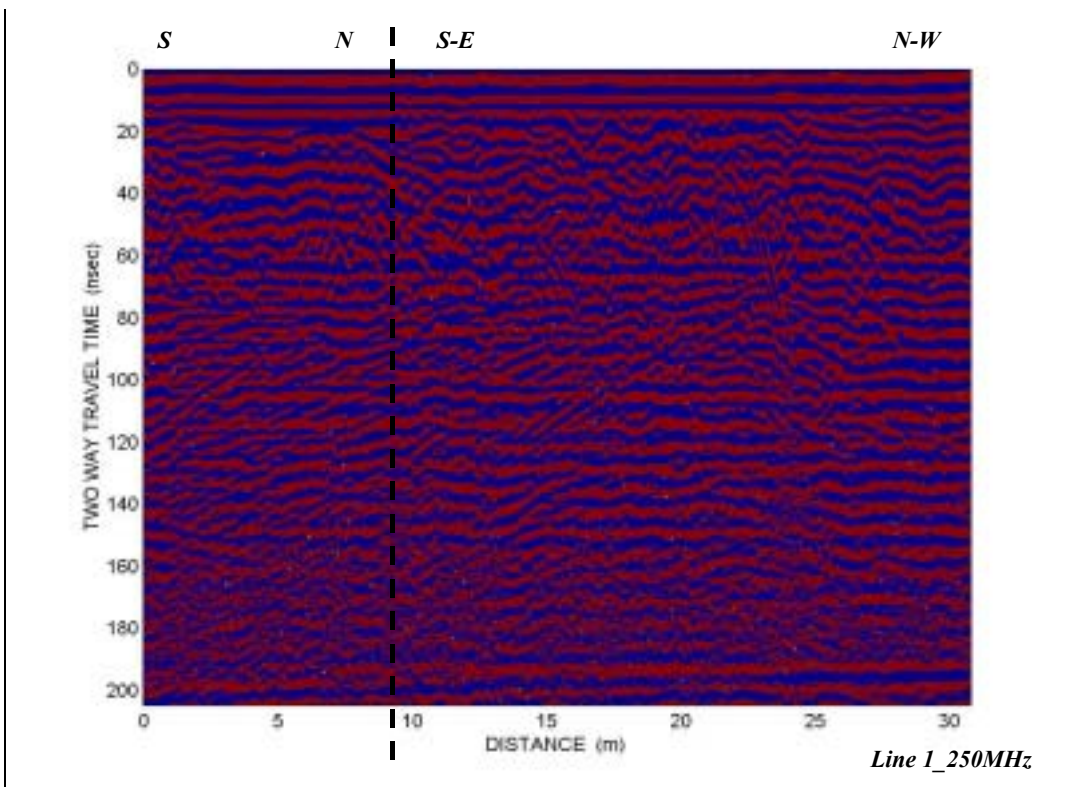
Εικόνα 6.13: Αποτέλεσμα του αυτόματου ελέγχου ενίσχυσης AGC, με εύρος παραθύρου 9 (3,6ns), στο αποτέλεσμα της εικόνας 6.12. Τα σήματα καταγραφής έχουν ισοσταθμιστεί, με τις πρώτες καταγραφές να έχουν υποστεί μικρή έως μηδενική ενίσχυση, ενώ τις καταγραφές στους μεγάλους χρόνους να έχουν ενισχυθεί σημαντικά. Οι ανακλάσεις διακρίνονται σε όλο το μήκος της τομής. {Raw data > Dewow > down the trace average (window: 20) > AGC Gain (window: 9)}



Εικόνα 6.14: Αποτέλεσμα εφαρμογής του φίλτρου μέσου ίχνους, με αριθμό ίχνων 10, μετά τη διόρθωση Dewow (εικόνα 6.10). Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιεί δεδομένα που ανήκουν σε γειτονικά ίχνη, με αποτέλεσμα να εξομαλύνει την εικόνα τονίζοντας μικρής κλίσης και οριζόντιους ανακλαστήρες. Οι οριζόντιες ανακλάσεις διακρίνονται καλύτερα σε σχέση με την εικόνα 6.10 (60nsec και 110nsec), ενώ το αποτέλεσμα της περίθλασης των κυμάτων (περιοχή 30-60nsec) έχει απαλειφθεί. {Raw data > Dewow > trace to trace average (traces: 10)}

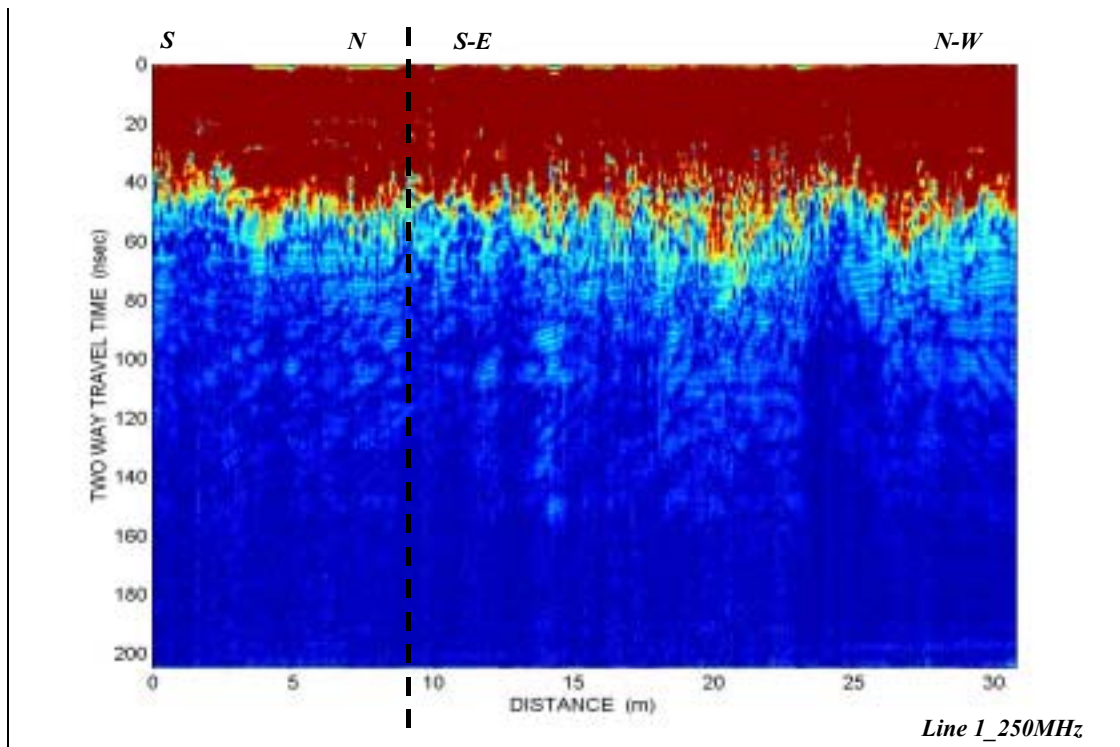


Εικόνα 6.15: Αποτέλεσμα εφαρμογής του φίλτρου μέσου ίχνους με αριθμό ίχνών 3. Τόσο οι οριζόντιες ανακλάσεις (60 και 110nsec), όσο και οι κεκλιμένες (κάτω από 60nsec) αποτυπώνονται καθαρά. {Raw data > Dewow > trace to trace average (traces: 3)}

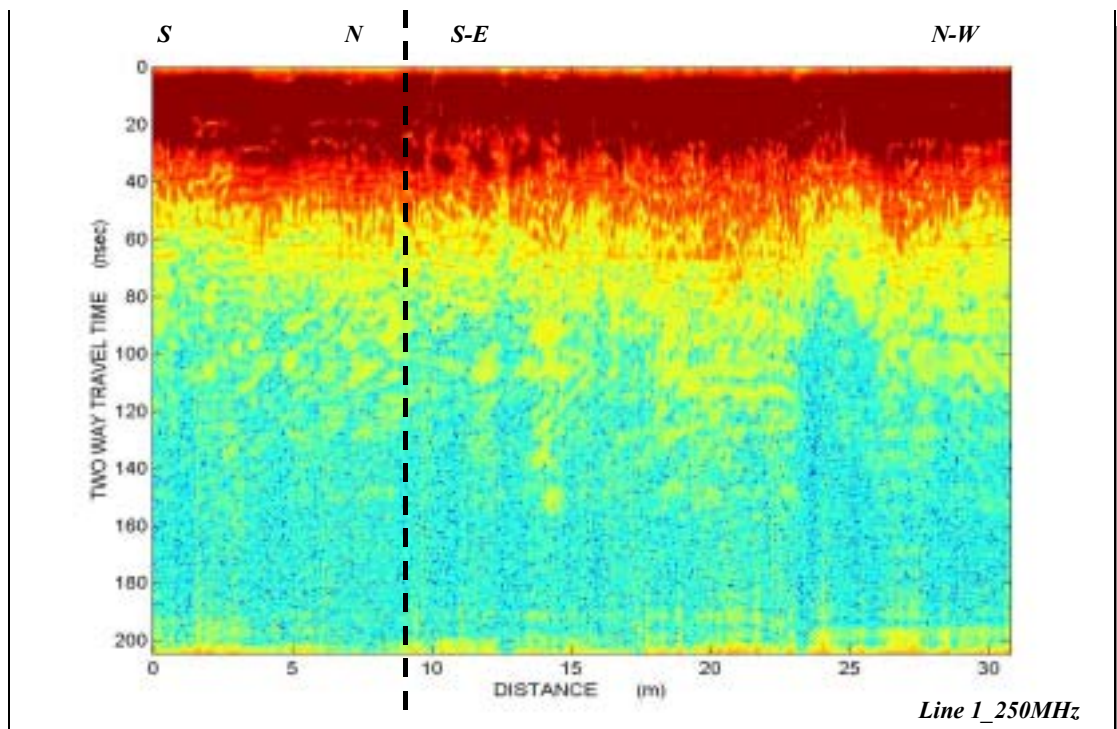


Εικόνα 6.16: Αποτέλεσμα του αυτόματου ελέγχου ενίσχυσης AGC, με εύρος παραθύρου 9 (3,6nsec), στο αποτέλεσμα της εικόνας 6.15. Οι καταγραφές έχουν ισοσταθμιστεί. {Raw data > Dewow > trace to trace average (traces: 3) > AGC Gain (window: 9)}

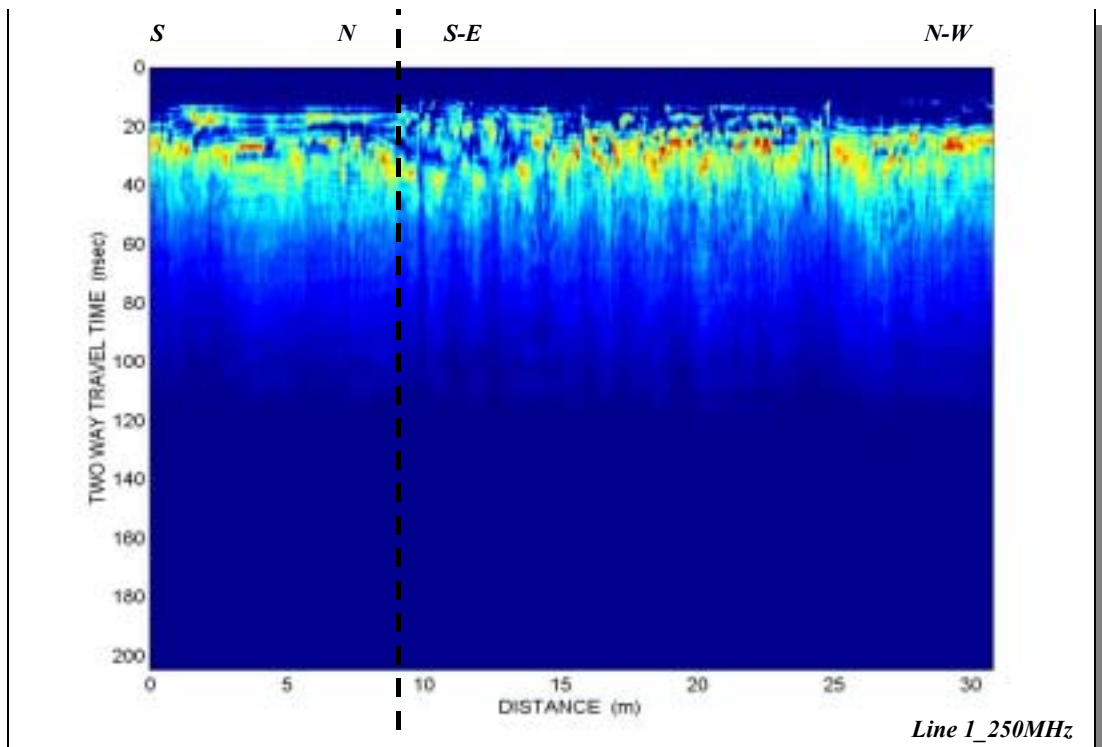
✓ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΡΟΗΣ Β: 'INSTANTANEOUS ATTRIBUTES'



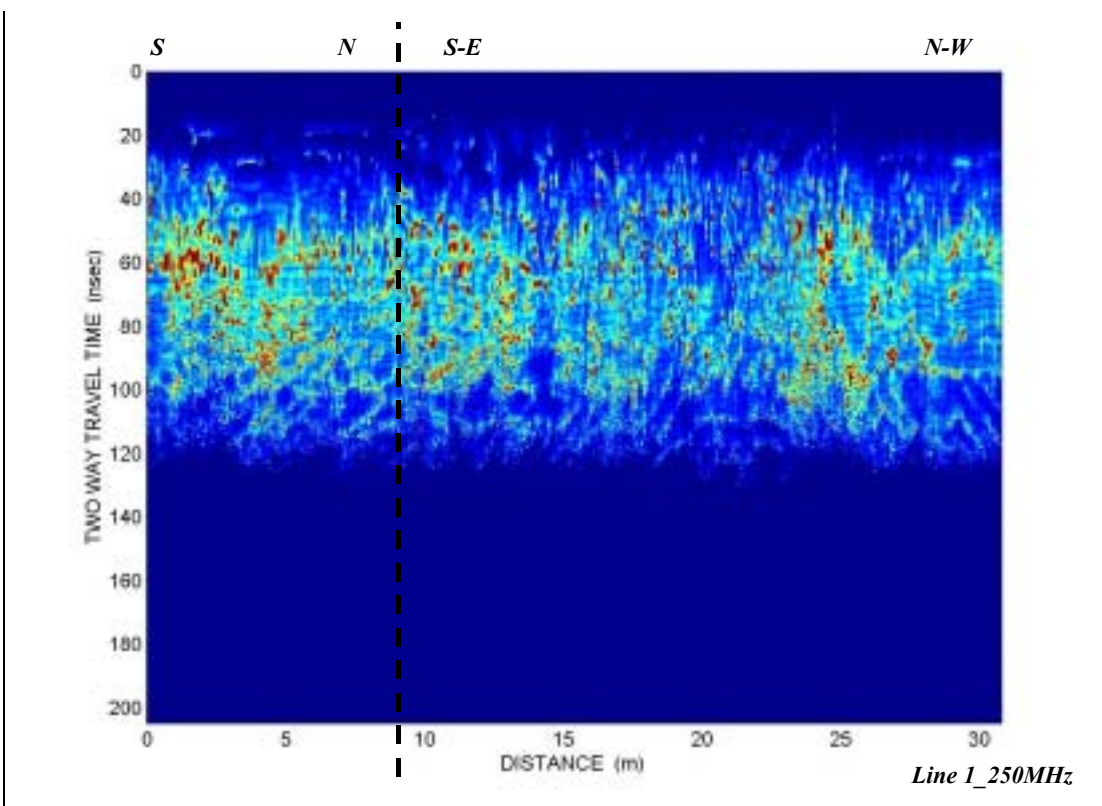
Εικόνα 6.17: Το στιγμιαίο πλάτος των δεδομένων μετά τη διόρθωση Dewow (εικόνα 6.10). Ουσιαστικά εκφράζει την ανακλώμενη ισχύ των κυμάτων, αναδεικνύοντας έτσι τις ισχυρές πρώτες καταγραφές έως τα 60nsec. {Raw data > Dewow > Trace Envelope > Constant Gain}



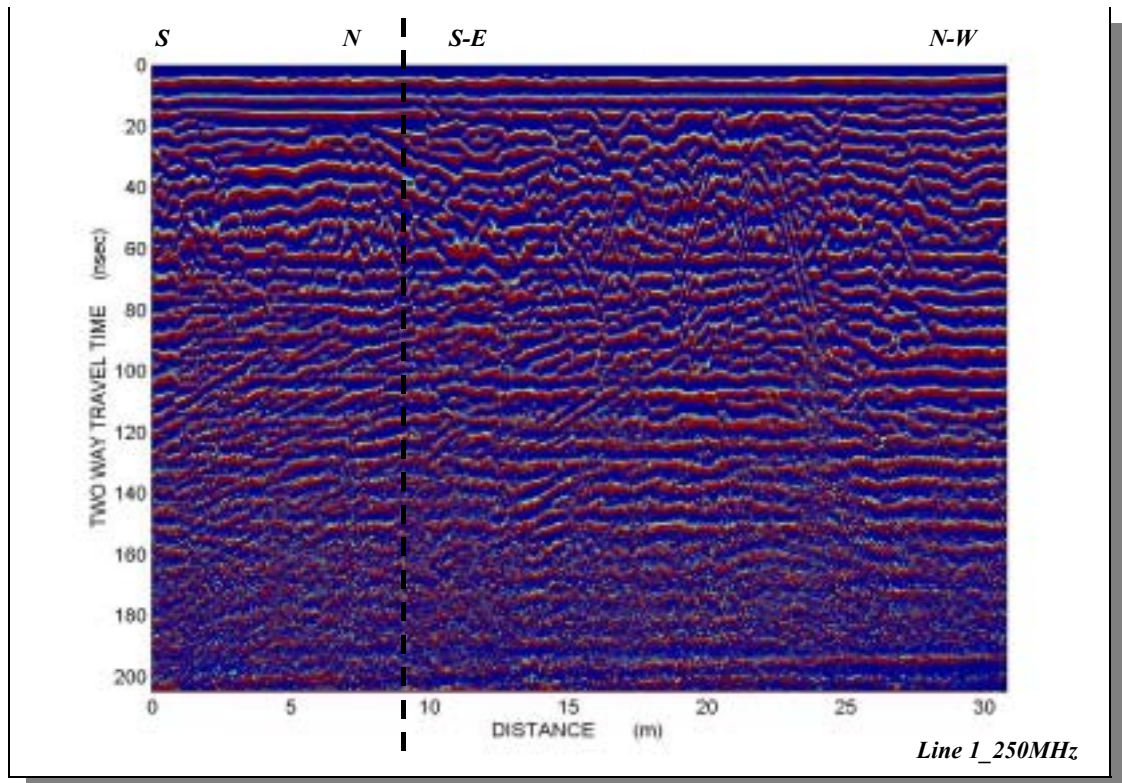
Εικόνα 6.18: Το στιγμιαίο πλάτος των δεδομένων σε κλίμακα 'decibel'. Ανακτώνται πληροφορίες για ανακλάσεις σε χρόνους καταγραφής στην περιοχή κάτω από τα 30 nsec, ενώ στα 60nsec διακρίνεται οριζόντιος ανακλαστήρας. {Raw data > Dewow > Trace Envelope > dB based Reflection Strength > Constant Gain}



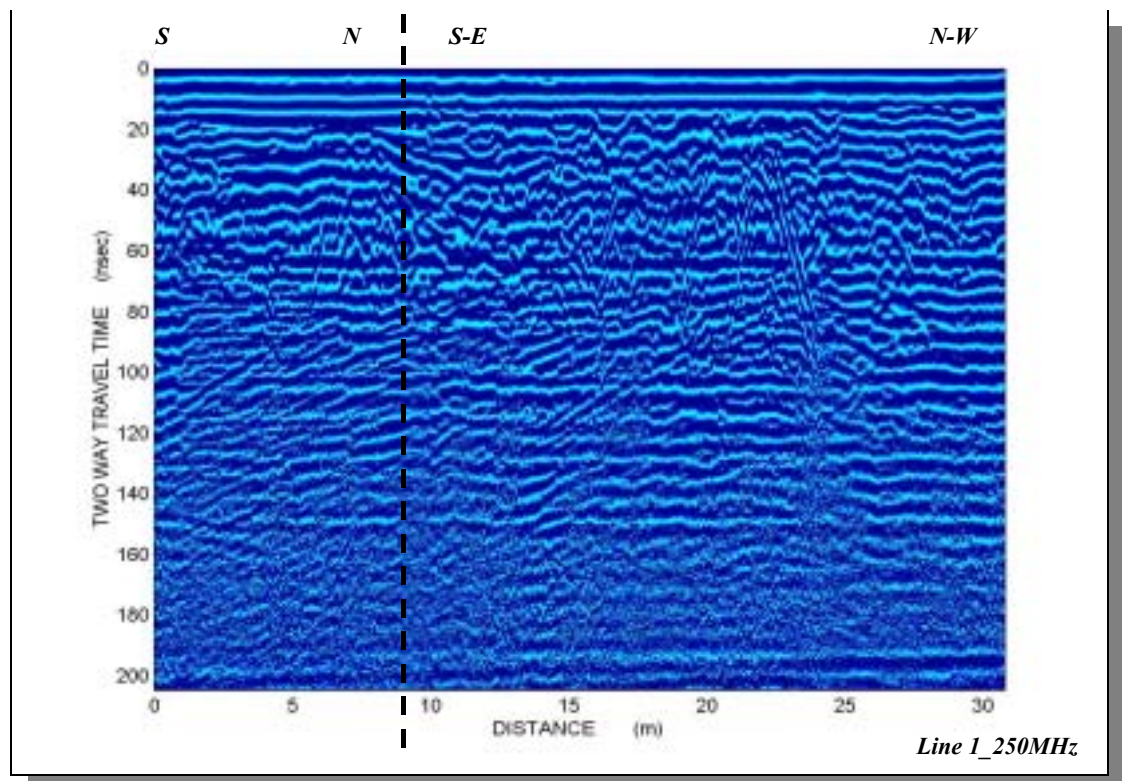
Εικόνα 6.19: Ο ρυθμός μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους των δεδομένων. Αναδεικνύεται η μεταβολή της ανακλώμενης ισχύος, καθώς και πιθανές περιοχές απορρόφησης της ενέργειας των κυμάτων. {Raw data > Dewow > Trace Envelope > Time Derivative of the Envelope > Constant Gain}



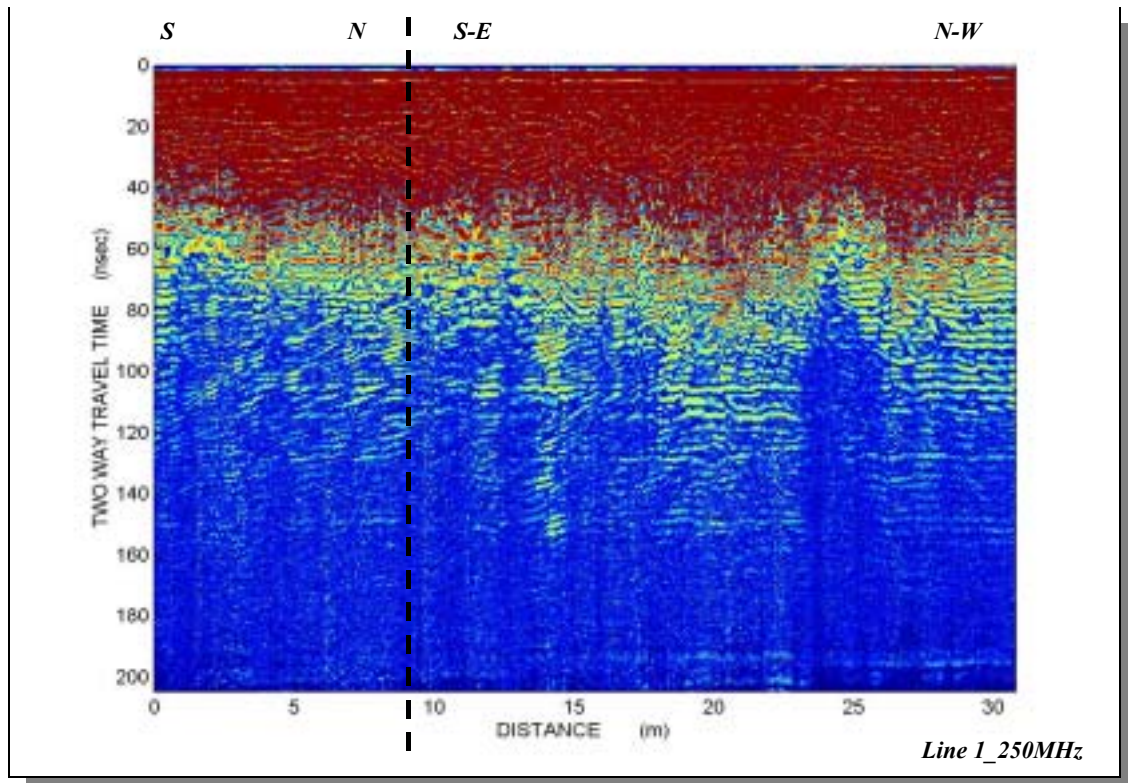
Εικόνα 6.20: Το στιγμιαίο φασματικό εύρος των δεδομένων. Συνδυάζοντας το αποτέλεσμα των εικόνων 6.17 και 6.19, ανακτώνται επιπλέον πληροφορίες στην περιοχή 60-110nsec. {Raw data > Dewow > Trace Envelope & Time Derivative of the Envelope > Instantaneous Band Width > Constant Gain}



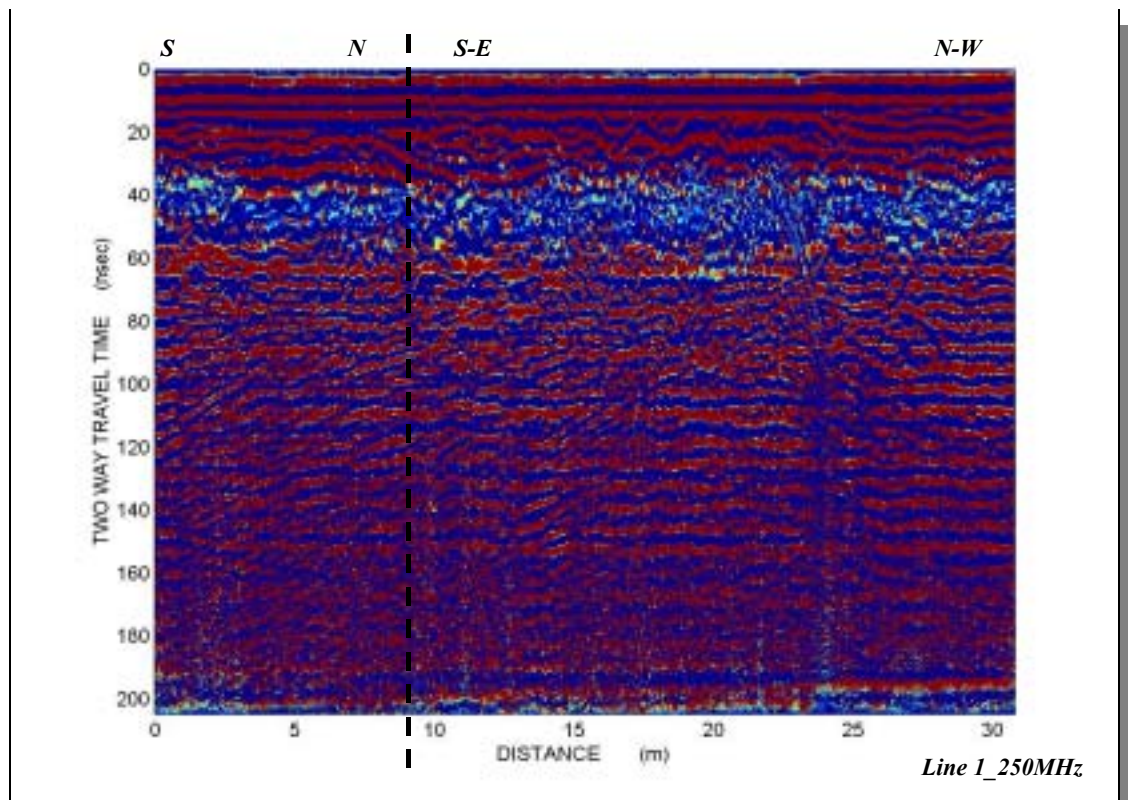
Εικόνα 6.21: Η στιγμιαία φάση των δεδομένων μετά τη διόρθωση Dewow. Αναδεικνύεται η πλευρική συνέχεια των ανακλαστήρων, ενώ αντίθετα δεν παρέχονται πληροφορίες για την ισχύ των ανακλάσεων. Κάτω από τα 60nsec διακρίνονται κεκλιμένες ανακλάσεις. {Raw data > Dewow > Instantaneous Phase > Constant Gain}



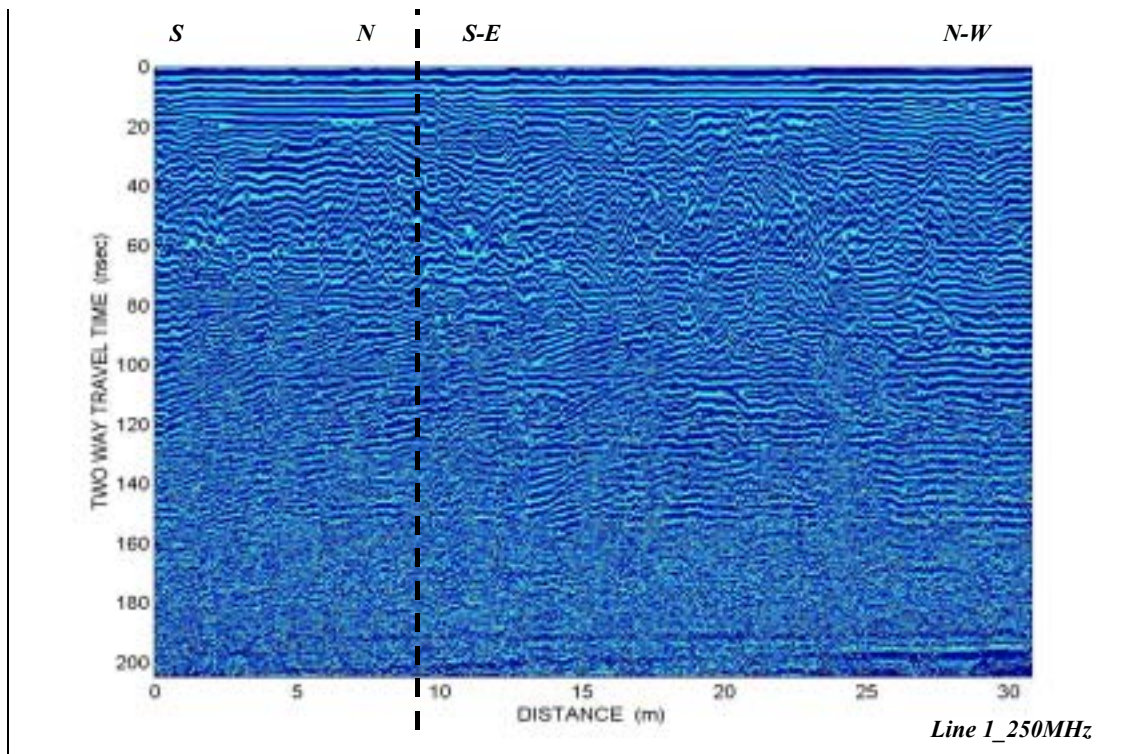
Εικόνα 6.22: Το κανονικοποιημένο πλάτος των δεδομένων. Περιέχει όλες τις λεπτομέρειες της στιγμιαίας φάσης χωρίς, όμως, να περιλαμβάνει τις απότομες μεταβολές (εικόνα 6.21). {Raw data > Dewow > Instantaneous Phase > Normalized Envelope > Constant Gain}



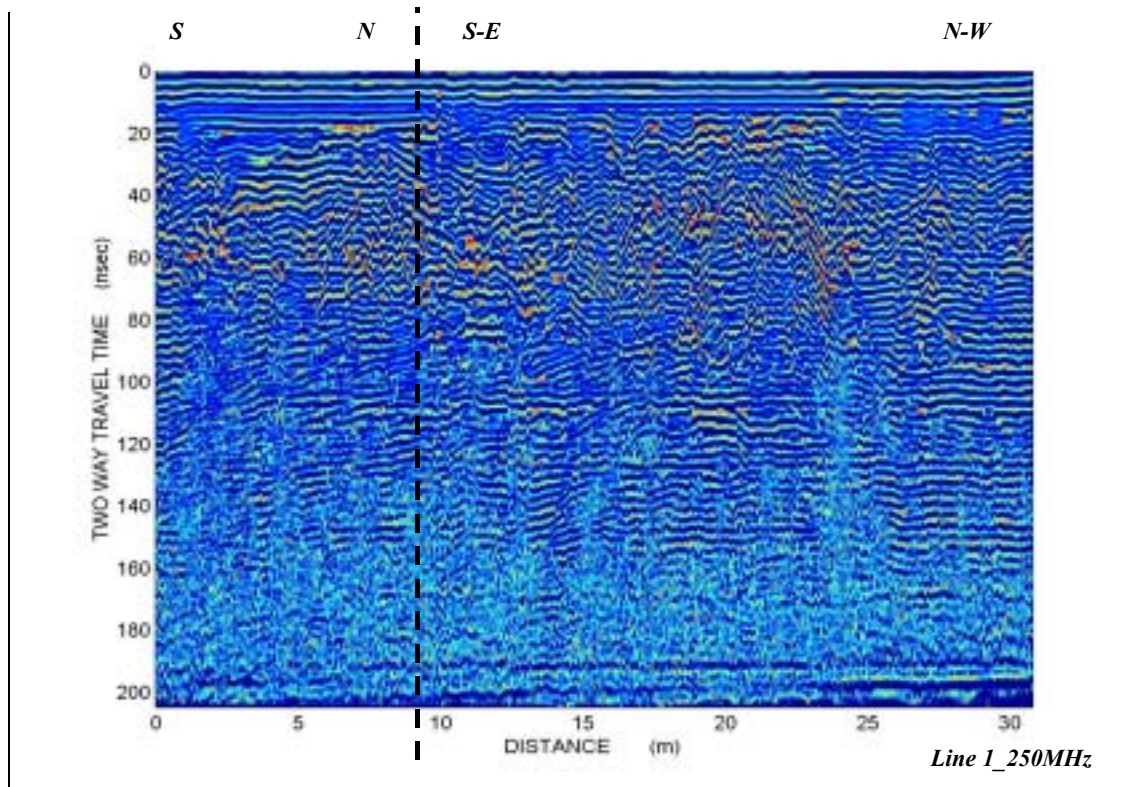
Εικόνα 6.23: Αποτέλεσμα εφαρμογής αλγορίθμου που υπολογίζει το γινόμενο του πλάτους (εικόνα 6.9) και του συνημιτόνου της στιγμιαίας φάσης (κανονικοποιημένο πλάτος) (εικόνα 6.22). $\{Product\ of\ real\ Amplitude\ and\ cosine\ of\ Instantaneous\ Phase\ >\ Constant\ Gain\}$



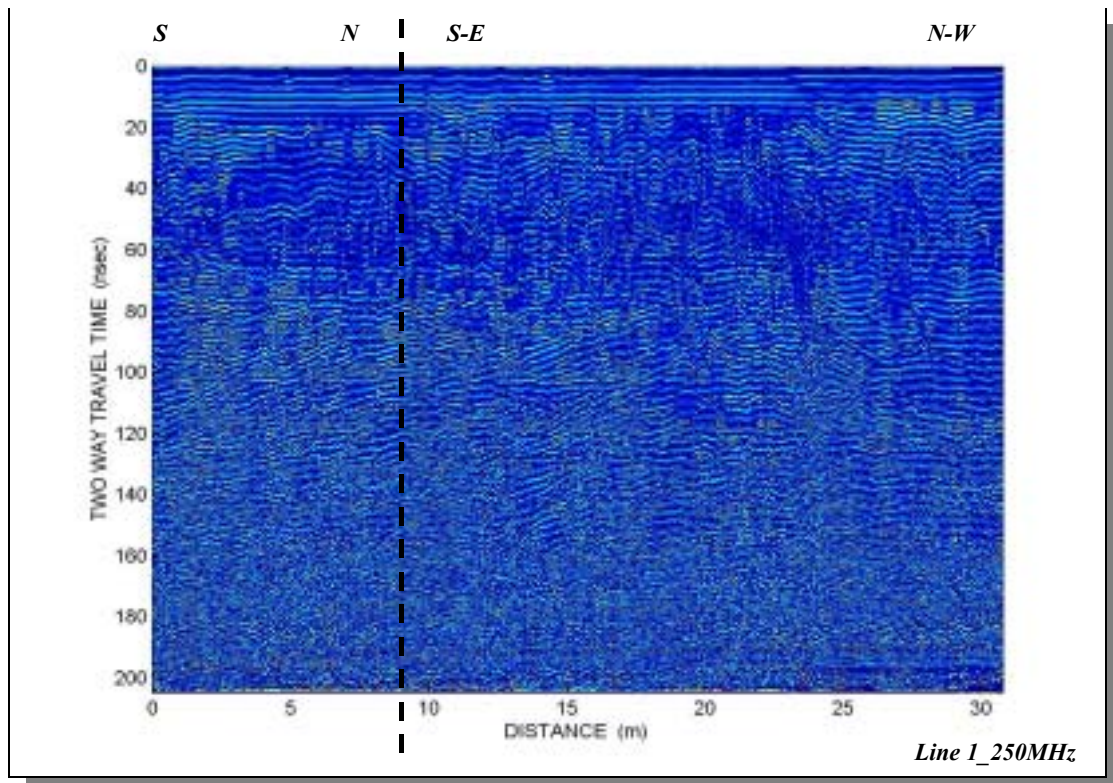
Εικόνα 6.24: Αποτέλεσμα εφαρμογής του αλγορίθμου που υπολογίζει το γινόμενο του φιλτραρισμένου στιγμιαίου πλάτους (εικόνα 6.17) και του συνημιτόνου της στιγμιαίας φάσης (εικόνα 6.22). $\{Product\ of\ filtered\ Instantaneous\ Amplitude\ and\ cosine\ of\ Phase\ >\ Constant\ Gain\}$



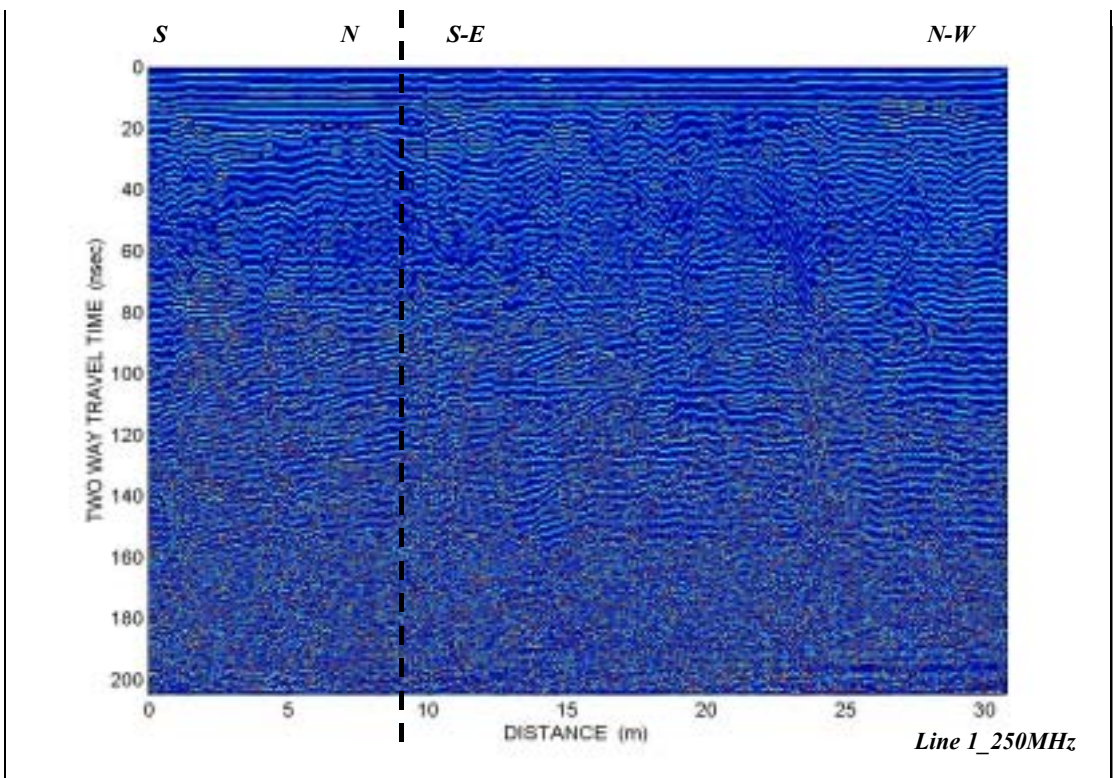
Εικόνα 6.25: Η στιγμιαία συχνότητα των δεδομένων (ρυθμός μεταβολής στιγμιαίας φάσης). Εκφράζει το μέτρο της συχνότητας του ανακλώμενου παλμού, αναδεικνύοντας λεπτομερώς τις αλλαγές στη λιθολογία, τη μεταβολή του πάχους των στρωμάτων και την ύπαρξη ασυνεχειών. {Raw data > Dewow > Instantaneous Phase > Instantaneous Frequency > Constant Gain}



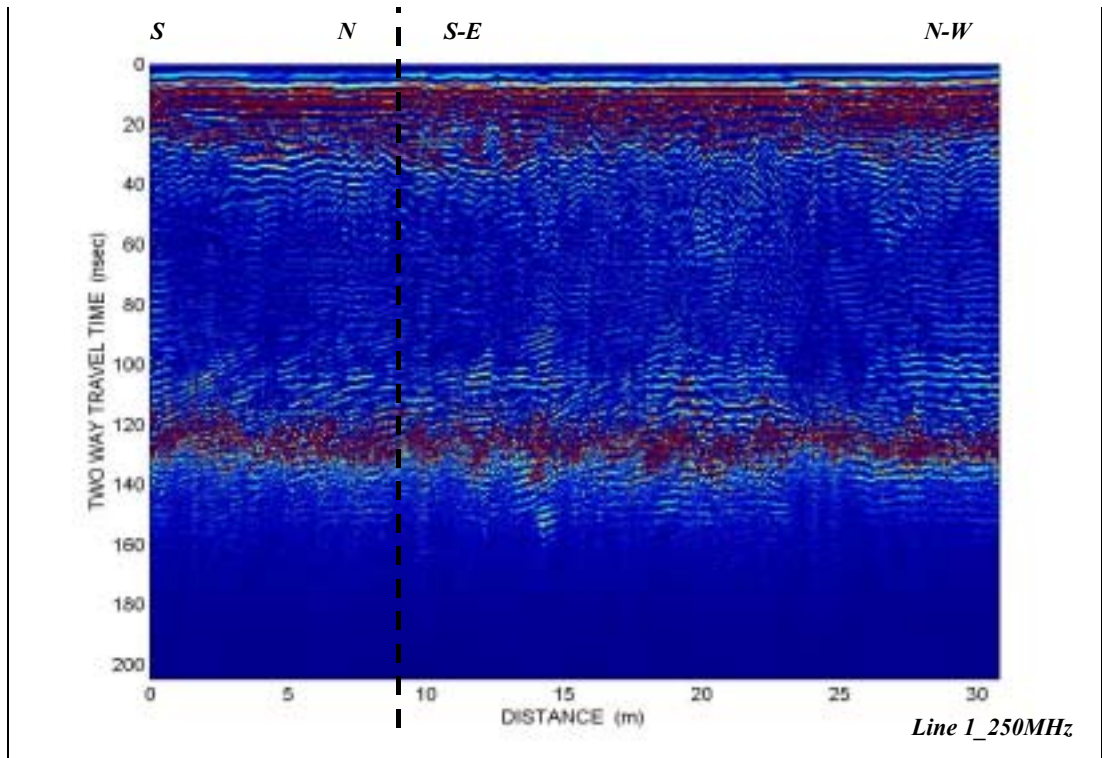
Εικόνα 6.26: Η σταθμισμένη μέση συχνότητα των δεδομένων. Η εικόνα 6.25 έχει εξομαλυνθεί με τη βοήθεια του στιγμιαίου πλάτους (εικόνα 6.17). {Raw data > Dewow > Instantaneous Frequency & Trace Envelope > Weighted Mean Frequency > Constant Gain}



Εικόνα 6.27: Αποτέλεσμα εφαρμογής του αλγορίθμου δείκτη λεπτών στρωμάτων. Το αποτέλεσμα της διαφοράς της στιγμιαίας συχνότητας (εικόνα 6.25) από τη σταθμισμένη μέση τιμή της (εικόνα 6.26), αναδεικνύει ανακλάσεις που σχετίζονται με λεπτά στρώματα. {Raw data > Dewow > Instantaneous Frequency & Weighted Mean Frequency > Thin Bed Indicator > Constant Gain}



Εικόνα 6.28: Η επιτάχυνση της φάσης των δεδομένων (ρυθμός μεταβολής της στιγμιαίας συχνότητας). Οι λεπτοί ανακλαστήρες αναδεικνύονται. {Raw data > Dewow > Instantaneous Phase > Instantaneous Frequency > Acceleration of the Phase > Constant Gain}



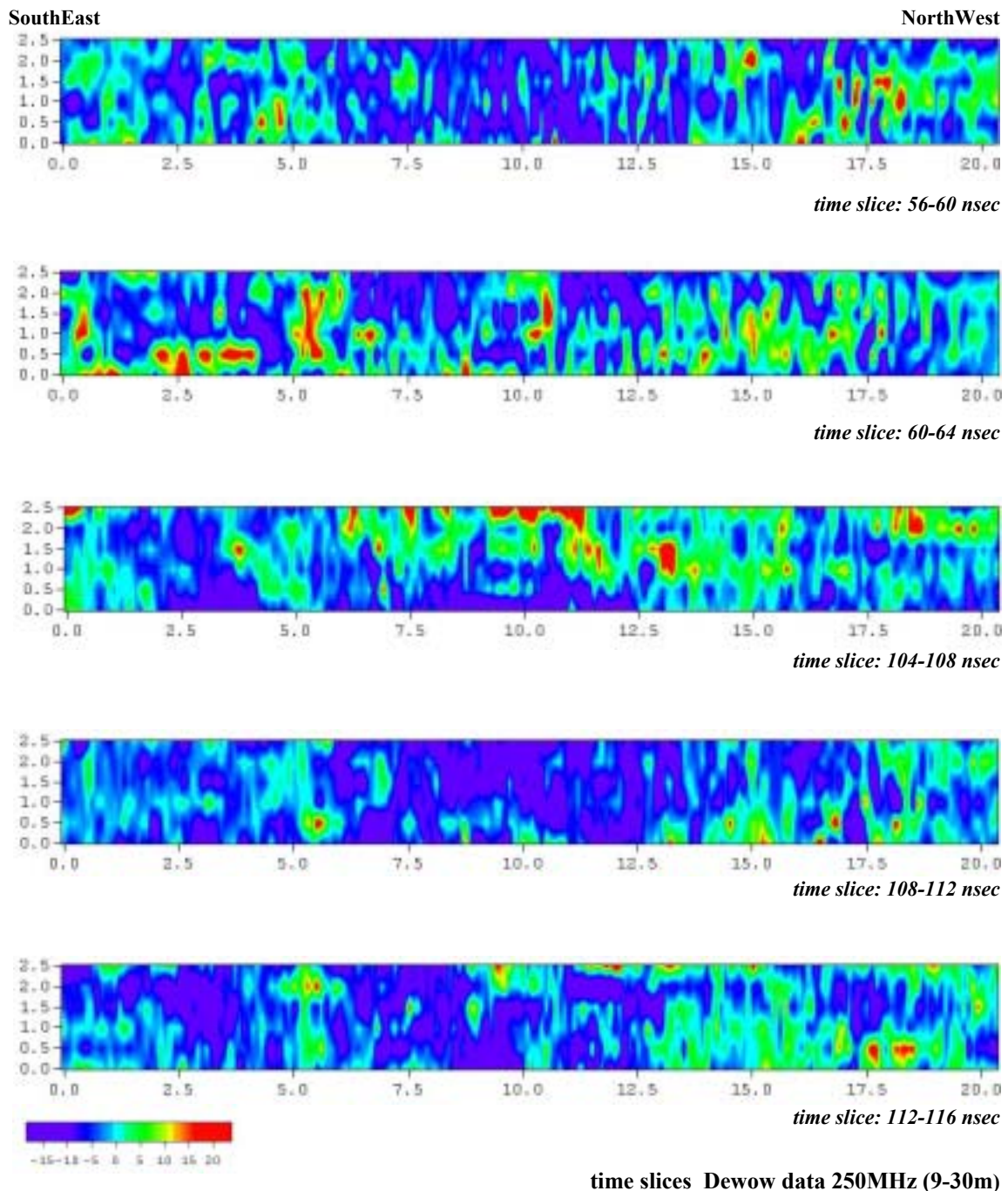
Εικόνα 6.29: Ο στιγμιαίος δείκτης ποιότητας των δεδομένων. Συνδυάζοντας το αποτέλεσμα των εικόνων 6.25 και 6.20, αναδεικνύονται τοπικές ανωμαλίες σε πιθανές περιοχές εξασθένησης των κυμάτων. {Raw data > Dewow > Instantaneous Frequency & Instantaneous Band Width > Instantaneous Q/Quality Factor > Constant Gain}

Συνοψίζοντας τις πληροφορίες που λαμβάνονται από τα αποτελέσματα της μαθηματικής επεξεργασίας των καταγραφών, γίνεται εμφανής μία περιοχή ισχυρών ανακλάσεων για 0-60nsec, ενώ αντίθετα η περιοχή 60-200nsec χαρακτηρίζεται από εξασθένηση των σημάτων με το βάθος. Παράλληλα, στα 60nsec και 110nsec αναδεικνύονται δύο ισχυροί οριζόντιοι ανακλαστήρες, ενώ κεκλιμένες ανακλάσεις και περιθλώμενα κύματα παρουσιάζονται στις περιοχές χρόνων 60-150nsec και 30-60nsec αντίστοιχα.

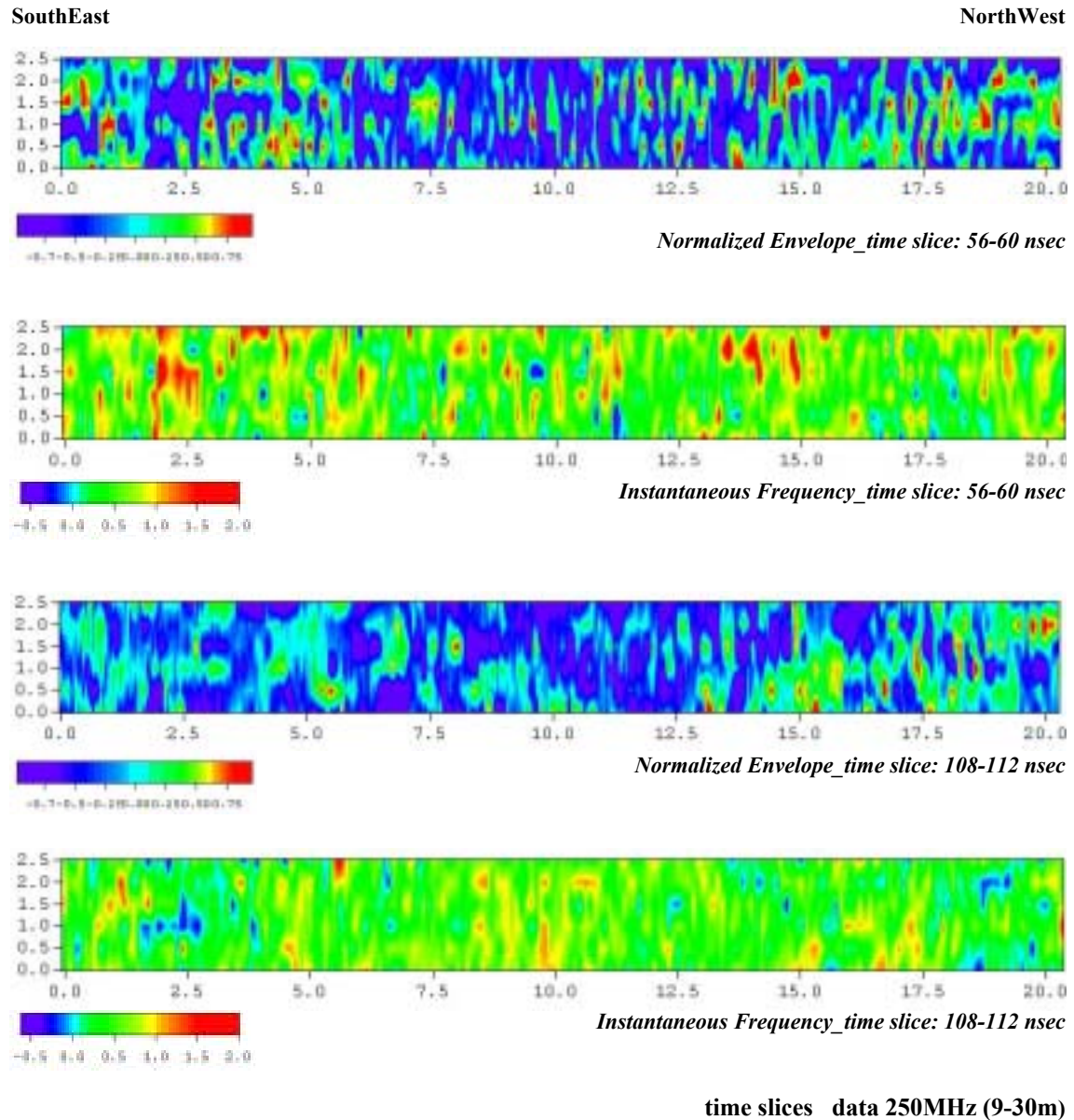
Σημειώνεται ότι οι διαπιστώσεις αυτές γίνονται στο σύνολο των δεδομένων καταγραφής με κεραίες συχνότητας 250MHz (1-6 γραμμές μελέτης). Οι μετρήσεις με κεραίες συχνότητας 500MHz δεν δίδουν αξιόλογες πληροφορίες, επιβεβαιώνοντας όμως την ύπαρξη των δύο ισχυρών οριζόντιων ανακλαστήρων σε αντίστοιχους χρόνους.

Με βάση επομένως τις παραπάνω διαπιστώσεις, η περαιτέρω ανάλυση και ερμηνεία των καταγραφών γεωραντάρ επικεντρώνεται στις άνωθεν περιοχές ενδιαφέροντος.

✓ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΤΟΜΩΝ ΧΡΟΝΟΥ: 'Time Slices'

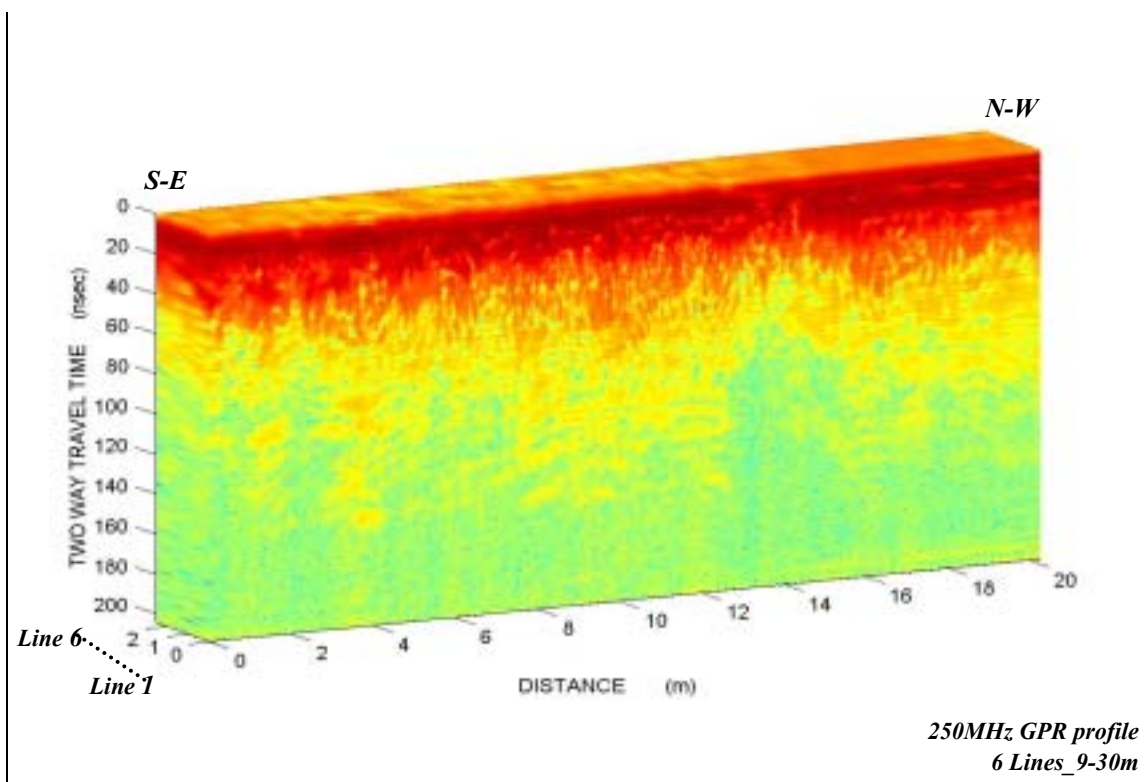


Εικόνα 6.30: Οριζόντιες τομές των δεδομένων που έχουν επεξεργαστεί με το φίλτρο διόρθωσης Dewow σε χρόνους καταγραφής που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Οι τομές παρήχθησαν για τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στο δεύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης του γεωραντάρ (9-30m_250MHz GPR profiles), όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 6.7. Η τιμή 0,0 στον κατακόρυφο άξονα αντιστοιχεί στην πρώτη γραμμή μελέτης (οι άξονες εκφράζουν οριζόντια απόσταση σε m). Οι ανωμαλίες στις καταγραφές γεωραντάρ (για δεδομένη χρονική στιγμή σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης) αποτυπώνονται στις οριζόντιες τομές με μεταβολές στο χρωματισμό. Η χρωματική διακύμανση κατά μήκος των τομών στην περιοχή χρόνων γύρω στα 60nsec και 110nsec είναι πολύ μικρή (επικρατεί μπλε-μοβ), γεγονός που συμφωνεί με την παρουσία των δύο ισχυρών οριζόντιων ανακλάσεων που αναδεικνύονται στους αντίστοιχους χρόνους καταγραφής στα προηγούμενα αποτελέσματα.

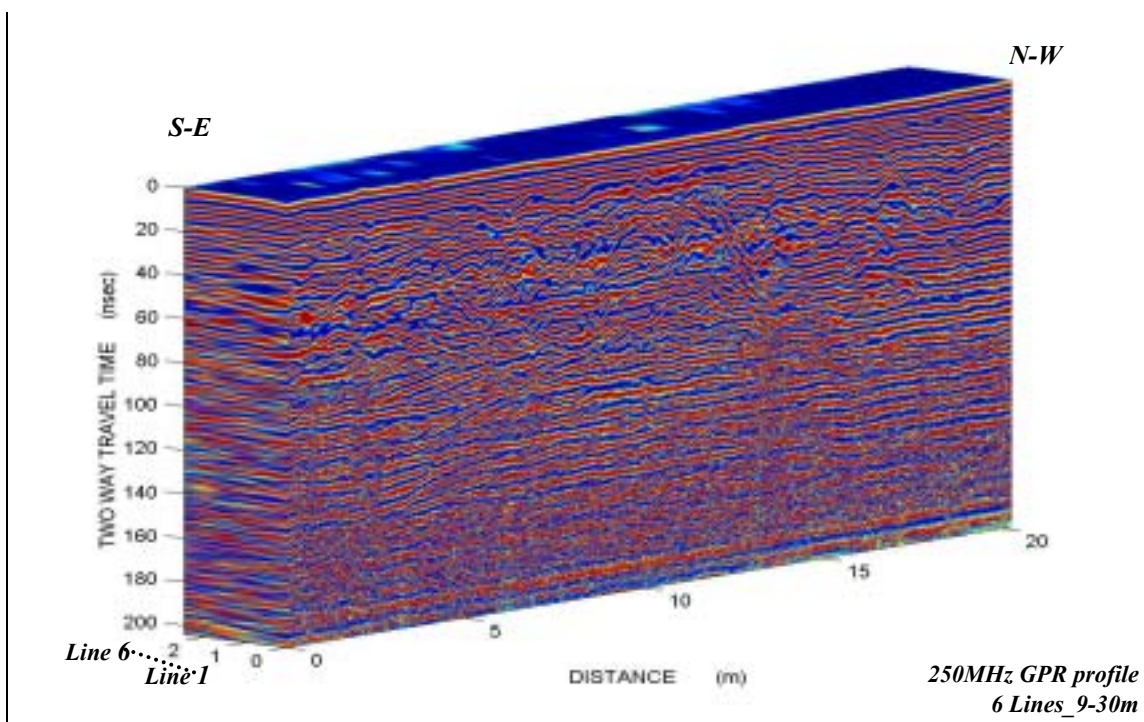


Εικόνα 6.31: Οριζόντιες τομές του κανονικοποιημένου πλάτους και της στιγμιαίας συχνότητας των δεδομένων σε χρόνους καταγραφής που σχετίζονται με εμφάνιση ισχυρών οριζόντιων ανακλάσεων. Οι τομές παρήχθησαν για τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στο δεύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης (9-30m_250MHz GPR profiles, εικόνα 6.7). Η τιμή 0,0 στον κατακόρυφο άξονα αντιστοιχεί με την πρώτη γραμμή μελέτης (οι άξονες των τομών εκφράζουν οριζόντια απόσταση σε m). Παρατηρούμε ότι στην περιοχή χρόνων γύρω στα 60nsec και 110nsec η χρωματική διακύμανση κατά μήκος των οριζόντιων τομών τόσο του κανονικοποιημένου πλάτους (επικρατεί μπλε-μοβ), όσο και της στιγμιαίας συχνότητας των δεδομένων (επικρατεί πράσινο) είναι πολύ μικρή. Το γεγονός αυτό μπορεί να συσχετιστεί με την παρουσία των δύο ισχυρών οριζόντιων ανακλαστήρων στους αντίστοιχους χρόνους καταγραφής των τομών ανάκλασης γεωραντάρ (σε συμφωνία με τις οριζόντιες τομές χρόνου της εικόνας 6.30, Dewow_time slices).

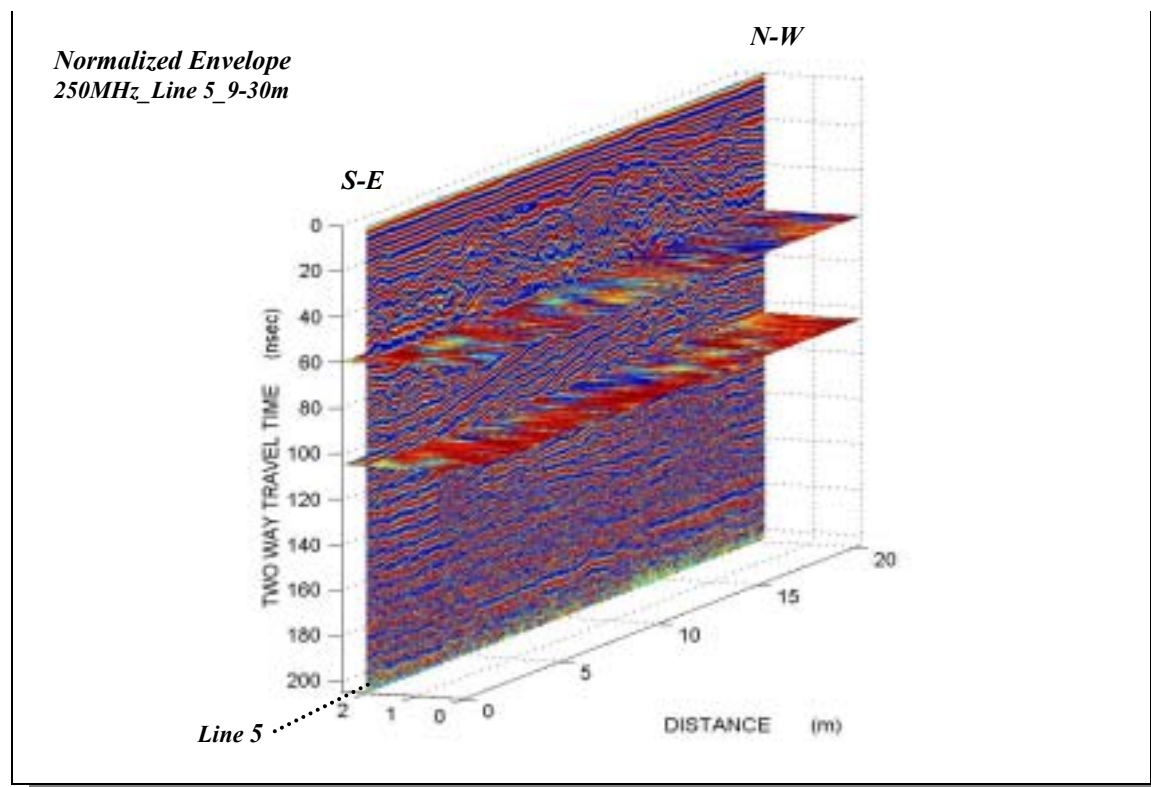
✓ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ: '3-D models'



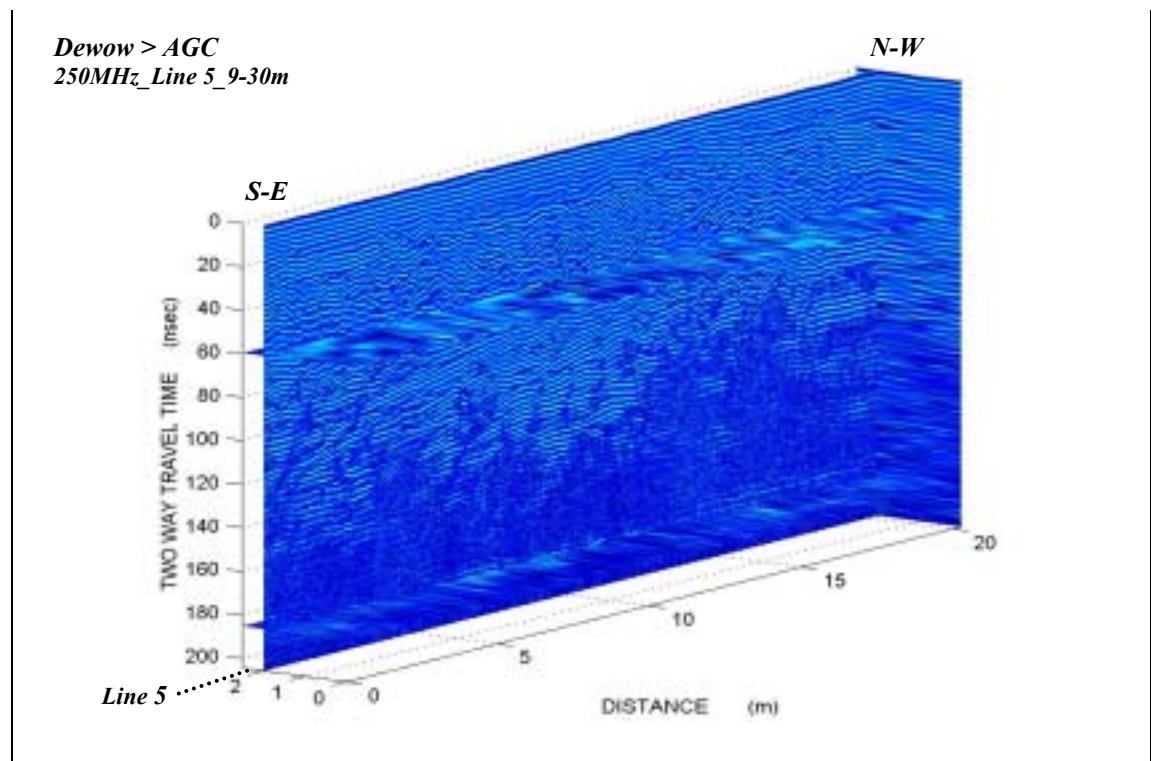
Εικόνα 6.32: Τρισδιάστατη απεικόνιση του στιγμιαίου πλάτους των δεδομένων σε κλίμακα 'decibel', στο δεύτερο τμήμα (9-30m) της υπό μελέτη περιοχής. {Raw data > Dewow > Trace Envelope > dB based Reflection Strength > Constant Gain}



Εικόνα 6.33: Τρισδιάστατη απεικόνιση του κανονικοποιημένου πλάτους των δεδομένων στο τμήμα 9-30m της υπό μελέτη περιοχής. {Raw data > Dewow > Instantaneous Phase > Normalized Envelope > Constant Gain}



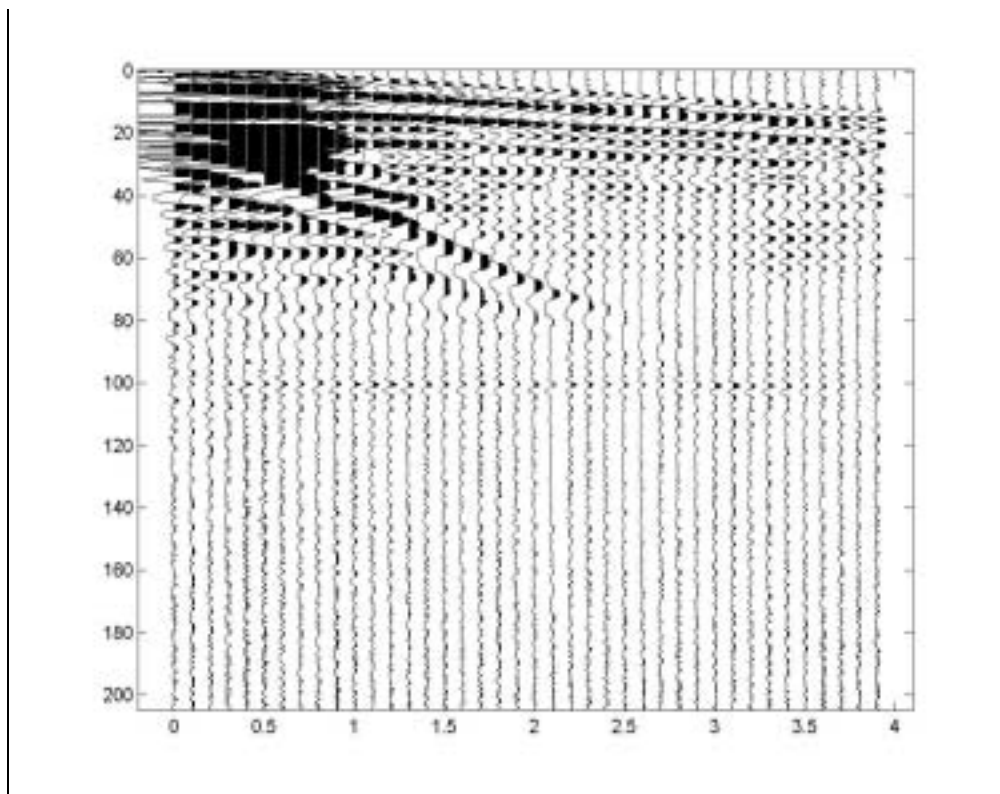
Εικόνα 6.34: Απεικόνιση του κανονικοποιημένου πλάτους των δεδομένων της 5^{ης} γραμμής μελέτης (τμήμα 9-30m) σε τρισδιάστατο μοντέλο. Στα 60ns και 110ns αναδεικνύονται οι καταγραφές και για τις 6 γραμμές γεωραντάρ (ύπαρξη ισχυρών οριζόντιων ανακλάσεων, βλ. εικόνες 6.22 /6.33).



Εικόνα 6.35: Απεικόνιση των δεδομένων μετά από διόρθωση Dewow και ενίσχυση AGC της 5^{ης} γραμμής μελέτης (τμήμα 9-30m) σε τρισδιάστατο μοντέλο. Στα 60ns, αλλά και στα 20m φαίνονται οι καταγραφές και για τις 6 γραμμές. Διακρίνονται οι ισχυρές πρώτες καταγραφές έως τα 60ns, καθώς και κεκλιμένες ανακλάσεις στην περιοχή εξασθένησης των σημάτων, κάτω από τα 60ns.

6.5.2 Επεξεργασία δεδομένων για τον υπολογισμό ταχυτήτων

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, κατά την πορεία τους στο υπέδαφος, διέρχονται διαμέσου των γεωλογικών στρωμάτων με διαφορετικές ταχύτητες. Η μέθοδος του κοινού ενδιάμεσου σημείου (*Common Midpoint*) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε συνάρτηση με το βάθος (§4.6). Προκειμένου, επομένως, να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τις μέσες ταχύτητες διάδοσης (*RMS*) των γεωλογικών σχηματισμών στην περιοχή μελέτης, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των δεδομένων που ελήφθησαν με τη μέθοδο κοινού ενδιάμεσου σημείου (*Multi fold GPR profiles*). Με τη συγκεκριμένη μέθοδο, διεξήχθησαν δύο γραμμές μελέτης *CMP*, με κατεύθυνση ανατολής-δύσης και βορρά-νότου αντίστοιχα (βλ. §6.4.2).

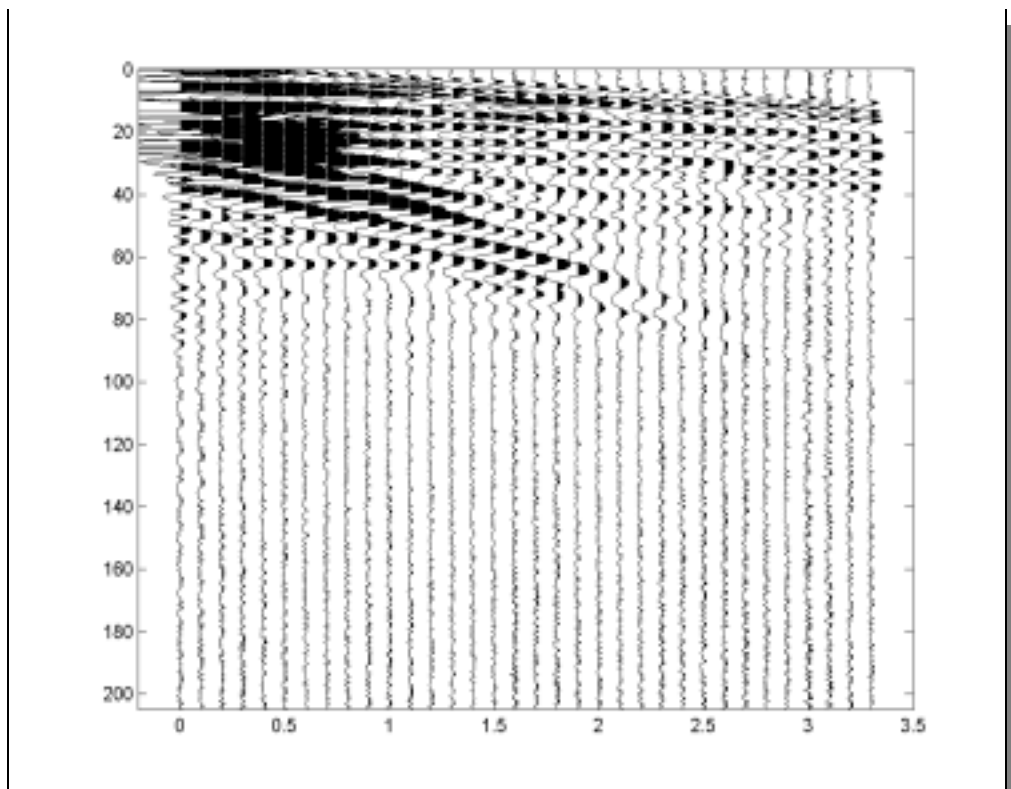


Εικόνα 6.36: Μετρήσεις κοινού ενδιάμεσου σημείου στη γραμμή μελέτης με κατεύθυνση ανατολής- δύσης. Ο οριζόντιος άξονας εκφράζει την απόσταση πομπού - δέκτη (σε m) και ο κατακόρυφος το διπλό χρόνο διαδρομής του σήματος (σε nsec).

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα επεξεργασίας των δεδομένων των τομών ανάκλασης (εικόνες 6.9 έως 6.35), διαπιστώνονται δύο περιοχές χρόνων καταγραφής ιδιαίτερου ενδιαφέροντος. Η περιοχή έως τα 60nsec χαρακτηρίζεται από ισχυρές

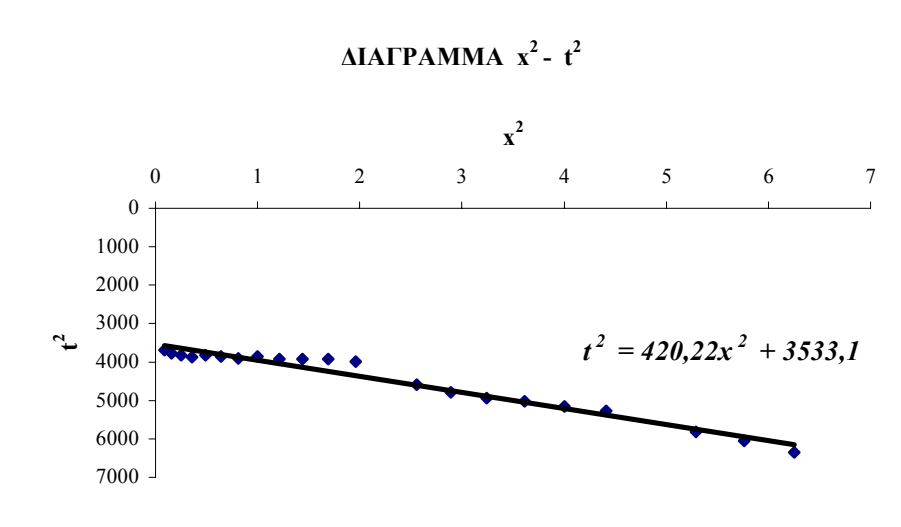
ανακλάσεις, ενώ για χρόνους μεγαλύτερους των 60nsec παρατηρείται σημαντική εξασθένιση των σημάτων με το βάθος. Ωστόσο, τα στοιχεία που δίδουν τόσο οι μετρήσεις *CMP* (εικόνες 6.36 και 6.37), όσο και οι καταγραφές στις τομές ανάκλασης δεν επαρκούν για τον προσδιορισμό των μέσων ταχυτήτων διάδοσης των κυμάτων για χρόνους μεγαλύτερους των 60nsec. Για το λόγο αυτό, η ανάλυση των μετρήσεων γεωραντάρ για την εκτίμηση των ταχυτήτων *RMS*, επικεντρώνεται ιδιαίτερα στην περιοχή χρόνων καταγραφής έως τα 60nsec, θεωρώντας ότι η μέση ταχύτητα διάδοσης δε μεταβάλλεται σημαντικά για χρόνους μεγαλύτερους.

Αναλύοντας τις εικόνες 6.36 και 6.37, παρατηρείται ότι για χρόνους καταγραφής μεγαλύτερους των 60nsec, οι μετρήσεις κοινού ενδιάμεσου σημείου στις δύο γραμμές μελέτης, δεν προσδίδουν επαρκή στοιχεία για την εκτίμηση της ταχύτητας των κυμάτων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο μικρό εύρος των γραμμών μελέτης (30-430cm για τη γραμμή με κατεύθυνση ανατολής-δύσης και 30-370cm για τη γραμμή με κατεύθυνση βορρά-νότου), με αποτέλεσμα να μην προκαλούνται αξιόλογες μεταβολές στις καταγραφές για τη συγκεκριμένη περιοχή χρόνων.



Εικόνα 6.37: Μετρήσεις κοινού ενδιάμεσου σημείου στη γραμμή μελέτης με κατεύθυνση βορρά - νότου (εικόνα 6.7). Ο οριζόντιος άξονας εκφράζει την απόσταση πομπού - δέκτη (σε m) και ο κατακόρυφος το διπλό χρόνο διαδρομής του σήματος (σε nsec).

Για χρόνους καταγραφής *μικρότερους των 60nsec*, κατά την επεξεργασία των μετρήσεων κοινού ενδιαμέσου σημείου για τον υπολογισμό της ταχύτητας χρησιμοποιούνται ανακλώμενα κύματα που καταγράφονται σε χρόνους 60-80nsec. Σε πρώτο στάδιο τα δεδομένα απεικονίζονται σε άξονες x (απόσταση πομπού-δέκτη, m) και y (διπλός χρόνος διαδρομής σήματος, nsec). Στη συνέχεια, επιλέγονται τα κύματα ανάκλασης που αντιστοιχούν στους χρόνους 60-80nsec και απόσταση πομπού-δέκτη 0,3-2,5m (βλ. εικόνα 6.36) και υπολογίζεται η κλίση της ευθείας που προκύπτει σε διάγραμμα $x^2 - t^2$ με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (διάγραμμα που ακολουθεί).



Από την κλίση της ευθείας εύκολα μπορεί να προσδιοριστεί η μέση ταχύτητα (*RMS*) εφαρμόζοντας τη σχέση:

$$\text{κλίση} = \frac{1}{u_{RMS}^2} \Rightarrow u_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{\text{κλίση}}} \quad (6.1)$$

Συνεπώς, για χρόνους καταγραφής *μικρότερους των 60nsec* η μέση ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων υπολογίζεται *0,05m/nsec*.

Στα αποτελέσματα επεξεργασίας των τομών ανάκλασης (εικόνες 6.9-6.11), στην περιοχή χρόνων 30-60nsec, παρατηρούμε ότι αναδεικνύονται κύματα περίθλασης. Επομένως, με ανάλυση των περιθλώμενων κυμάτων είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η μέση ταχύτητα για χρόνους καταγραφής *μικρότερους των 30nsec*. Επιλέγεται, έτσι, ο ένας εκ των δύο κλάδων των κυμάτων περίθλασης και εφαρμόζεται η διαδικασία που περιγράφηκε (σχέση 6.1) για χρόνους 30-60nsec και οριζόντια απόσταση 22,5-24m

(βλ. εικόνα 6.11). Η μέση ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων υπολογίζεται $0,1\text{m/nsec}$.

Σημειώνεται ότι οι ταχύτητες που υπολογίζονται με την παραπάνω διαδικασία είναι οι μέσες ταχύτητες (*RMS*) των κυμάτων για τις δύο περιοχές χρόνων καταγραφής του γεωραντάρ.

Θα πρέπει ωστόσο να επισημανθεί, ότι η σημαντική μείωση που παρατηρείται στις δύο ταχύτητες *RMS* (από $0,1\text{m/nsec}$ σε $0,05\text{m/nsec}$) δεν δικαιολογείται από τη διαφορά στους χρόνους διαδρομής των σημάτων, αλλά μπορεί να ερμηνευτεί λαμβάνοντας υπόψη πιθανή παρουσία γεωλογικής διεπιφάνειας και τον παράγοντα 'εδαφική υγρασία'. Τα επιφανειακά τμήματα του υπεδάφους δεν χαρακτηρίζονται από μεγάλα ποσοστά υγρασίας και κατά κύριο λόγο θεωρούνται ξηρά. Όσο όμως αυξάνει το βάθος, ο βαθμός κορεσμού του εδάφους σε νερό γίνεται μεγαλύτερος, μέχρι να συναντηθεί σε κάποιο σημείο ο υδροφόρος ορίζοντας, οπότε λαμβάνει χώρα πλήρης κορεσμός του σε νερό (100%). Στη συγκεκριμένη επομένως περίπτωση, η μείωση της ταχύτητας είναι πιθανόν να οφείλεται κατά ένα μέρος στην αύξηση της υγρασίας με το βάθος, γεγονός που ευνοείται και από τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στη βορειοανατολική Ιταλία.

Για τον ίδιο λόγο, πρέπει να σημειωθεί ότι αναμένεται έστω μία μικρή περαιτέρω μείωση της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων και για χρόνους καταγραφής μεγαλύτερους από 60nsec . Παρόλ' αυτά, λόγω των ανεπαρκών στοιχείων κατά την ανάλυση των μετρήσεων *CMP*, καθώς και των διαπιστώσεων από τις ενδείξεις στις καταγραφές των τομών ανάκλασης (ζώνη εξασθένισης των σημάτων), θεωρείται ότι η μέση ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων για χρόνους καταγραφής μεγαλύτερους των 60nsec δε μεταβάλλεται σημαντικά.

Συμπερασματικά, βάσει των παρατηρήσεων που προαναφέρθηκαν, η ερμηνεία των καταγραφών γεωραντάρ για την εκτίμηση των μέσων ταχυτήτων διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (*RMS*) στα γεωλογικά στρώματα της περιοχής μελέτης, δίδει τελικά τα ακόλουθα αποτελέσματα για τις περιοχές ενδιαφέροντος:

<i>Χρόνοι καταγραφής:</i>	<i>Μέση ταχύτητα (RMS):</i>
<i>περιοχή έως τα 30nsec</i>	<i>$0,1\text{ m/nsec}$</i>
<i>περιοχή μετά τα 30nsec</i>	<i>$0,05\text{ m/nsec}$</i>

6.6 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων επεξεργασίας γεωραντάρ

6.6.1 Αποτελέσματα γεωραντάρ

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων από τη γεωφυσική διασκόπηση με υπεδάφειο ραντάρ (βλ. εικόνες 6.38 έως 6.41), γίνονται οι εξής διαπιστώσεις στην υπό μελέτη περιοχή:

- *Περιοχή καταγραφής χρόνων: 0-60nsec* (250MHz & 500MHz GPR profiles)
 - ✓ Η περιοχή χαρακτηρίζεται από ισχυρές ανακλάσεις των σημάτων.
 - ✓ Στην περιοχή χρόνων 30-60nsec γίνεται εμφανές το αποτέλεσμα της περίθλασης των κυμάτων, με μορφή υπερβολών με τα κοίλα προς τα κάτω.
 - ✓ Αναδεικνύεται ένας ισχυρός οριζόντιος ανακλαστήρας γύρω στα 60nsec.

Μέση ταχύτητα (RMS): 0,05 m/nsec (Multi fold GPR profiles)
- *Περιοχή καταγραφής χρόνων: 60-200nsec* (250MHz & 500MHz GPR profiles)
 - ✓ Η περιοχή χαρακτηρίζεται από εξασθένιση των σημάτων με το βάθος.
 - ✓ Στην περιοχή χρόνων 60-150nsec εμφανίζονται κεκλιμένες ανακλάσεις.
 - ✓ Αναδεικνύεται ένας ισχυρός οριζόντιος ανακλαστήρας γύρω στα 110nsec.

Μέση ταχύτητα (RMS): 0,05 m/nsec (Multi fold GPR profiles)
- Τα αποτελέσματα των οριζόντιων τομών χρόνου συμφωνούν με τις ενδείξεις για την παρουσία των δύο ισχυρών οριζόντιων ανακλάσεων στα 60nsec και 110nsec αντίστοιχα. (Time slices)

Για την εκτίμηση του βάθους των ισχυρών οριζόντιων ανακλάσεων που παρατηρούνται προκύπτει:

- ✓ *Οριζόντιος ανακλαστήρας στα 60nsec:*

$$RMS = 0,05 \text{ m/nsec} = 5 \text{ cm/nsec}$$

$$ΒΑΘΟΣ = ΧΡΟΝΟΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ * RMS = \frac{1}{2} * 60nsec * 0,05 \text{ m/nsec}$$

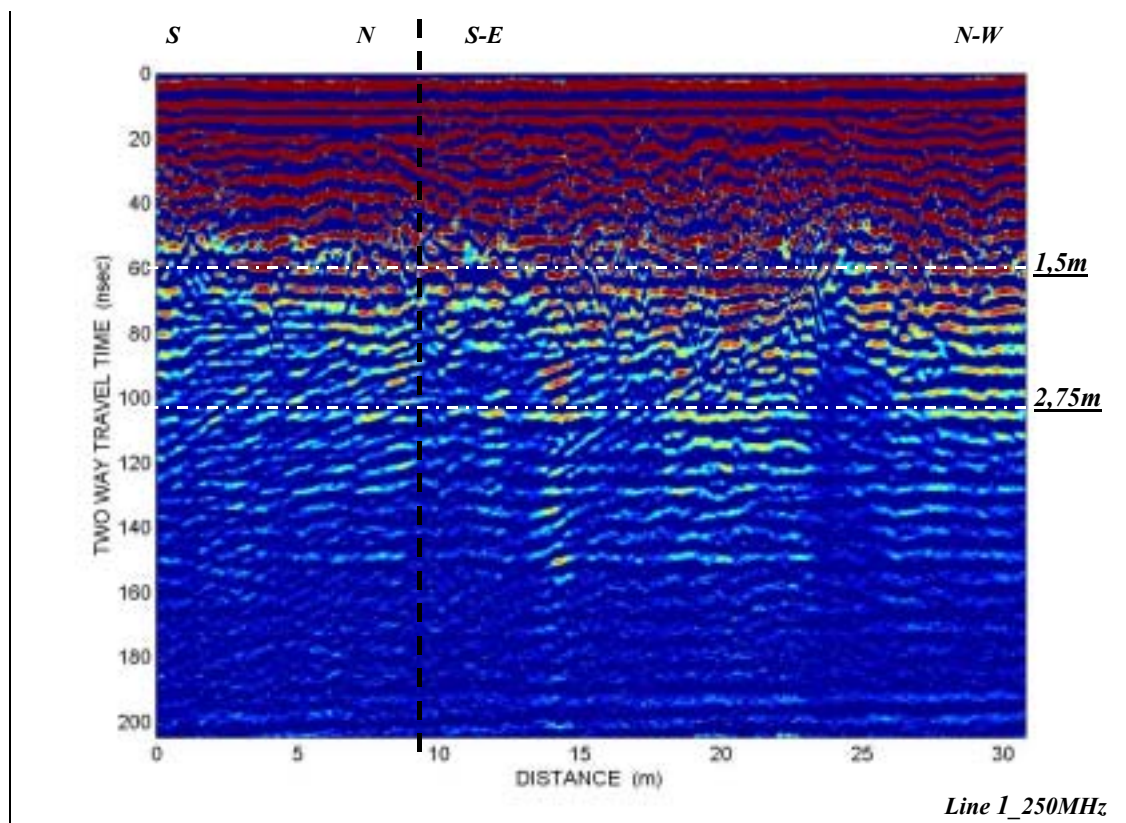
$$\Rightarrow \text{ΒΑΘΟΣ} = 1,5 \text{ m (από την επιφάνεια του εδάφους)}$$

- ✓ *Οριζόντιος ανακλαστήρας στα 110nsec:*

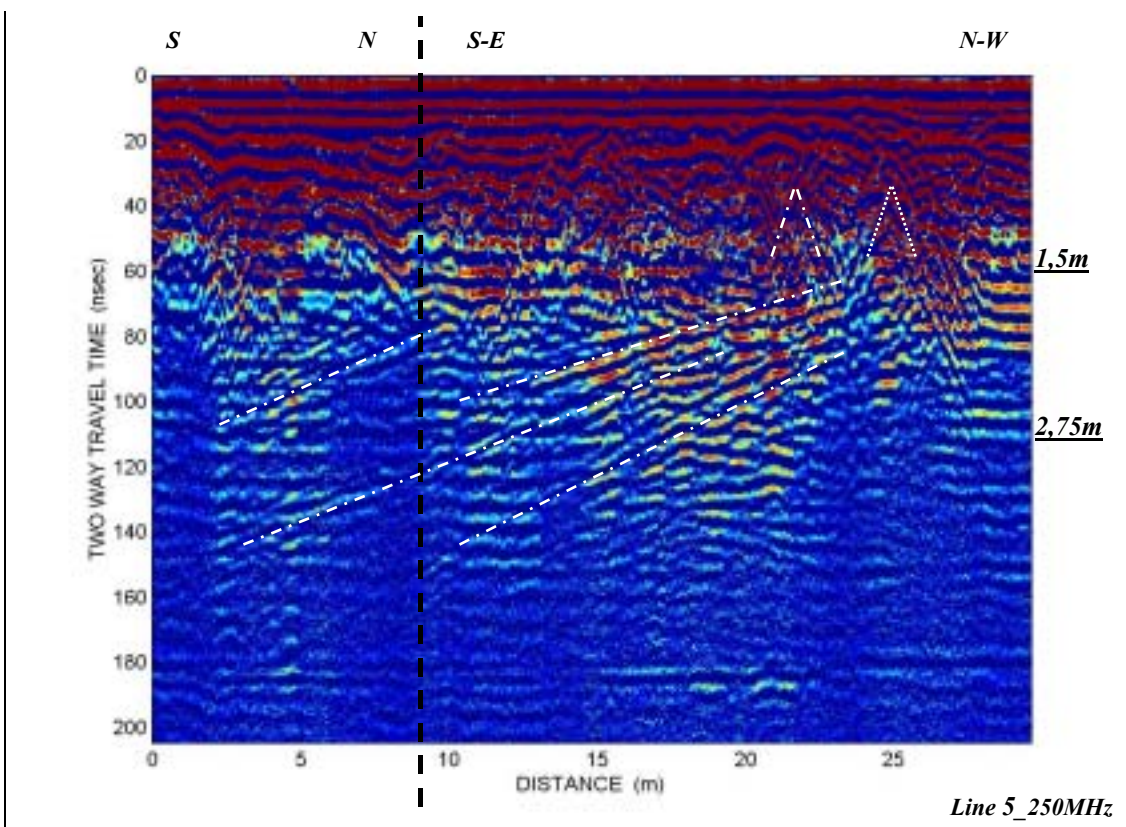
$$RMS = 0,05 \text{ m/nsec} = 5 \text{ cm/nsec}$$

$$ΒΑΘΟΣ = ΧΡΟΝΟΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ * RMS = \frac{1}{2} * 110nsec * 0,05 \text{ m/nsec}$$

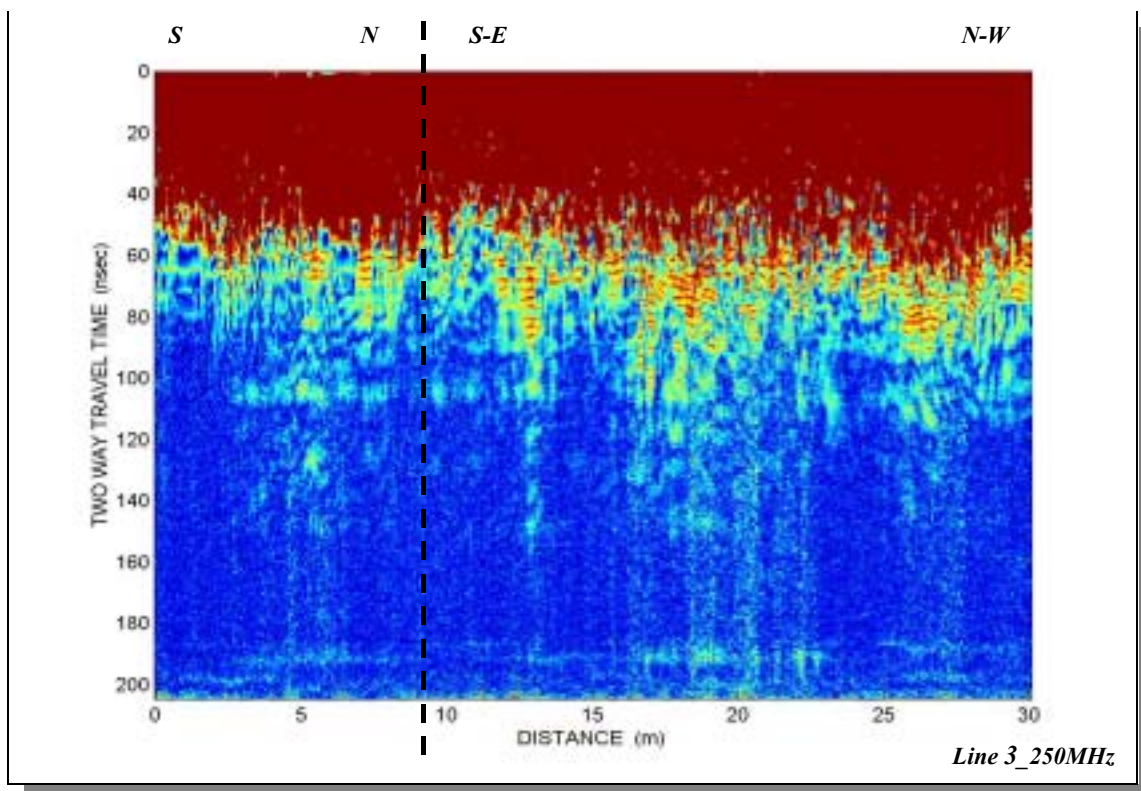
$$\Rightarrow \text{ΒΑΘΟΣ} = 2,75 \text{ m (από την επιφάνεια του εδάφους)}$$



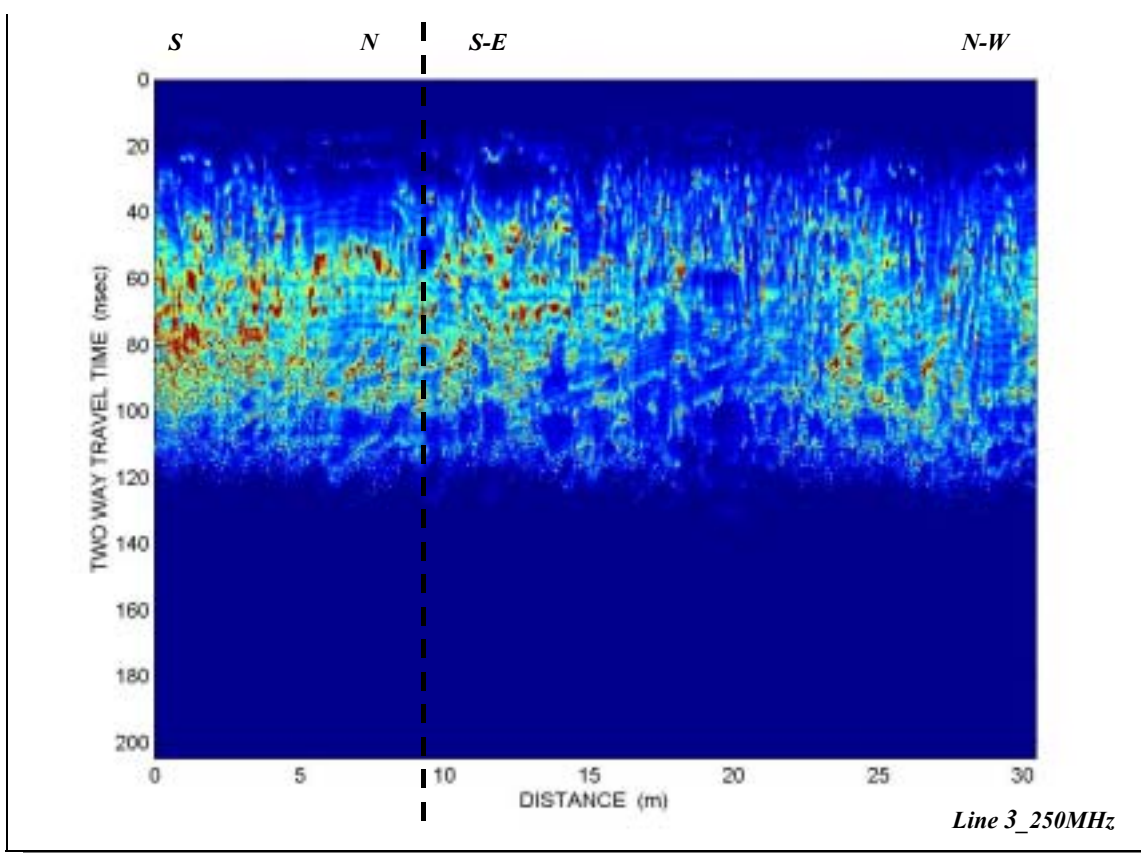
Εικόνα 6.38: Αποτέλεσμα γεωφυσικής διασκόπησης γεωραντάρ στην περιοχή 'Terme Romane'.
 {GPR Line 1_250MHz: Raw data > Dewow > trace to trace average (traces: 3)}



Εικόνα 6.39: Αποτέλεσμα γεωφυσικής διασκόπησης γεωραντάρ στην περιοχή 'Terme Romane'.
 {GPR Line 5_250MHz: Raw data > Dewow > down the trace average (window: 10)}



Εικόνα 6.40: Αποτέλεσμα γεωφυσικής διασκόπησης γεωραντάρ στην περιοχή 'Terme Romane'.
 {GPR Line 3_250MHz: Raw data > Dewow > Trace Envelope > Constant Gain}



Εικόνα 6.41: Αποτέλεσμα γεωφυσικής διασκόπησης γεωραντάρ στην περιοχή 'Terme Romane'.
 {GPR Line 3_250MHz: Raw data > Dewow > Trace Envelope & Time Derivative of the Envelope > Instantaneous Band Width > Constant Gain}

6.6.2 Αποτελέσματα άλλων ερευνών

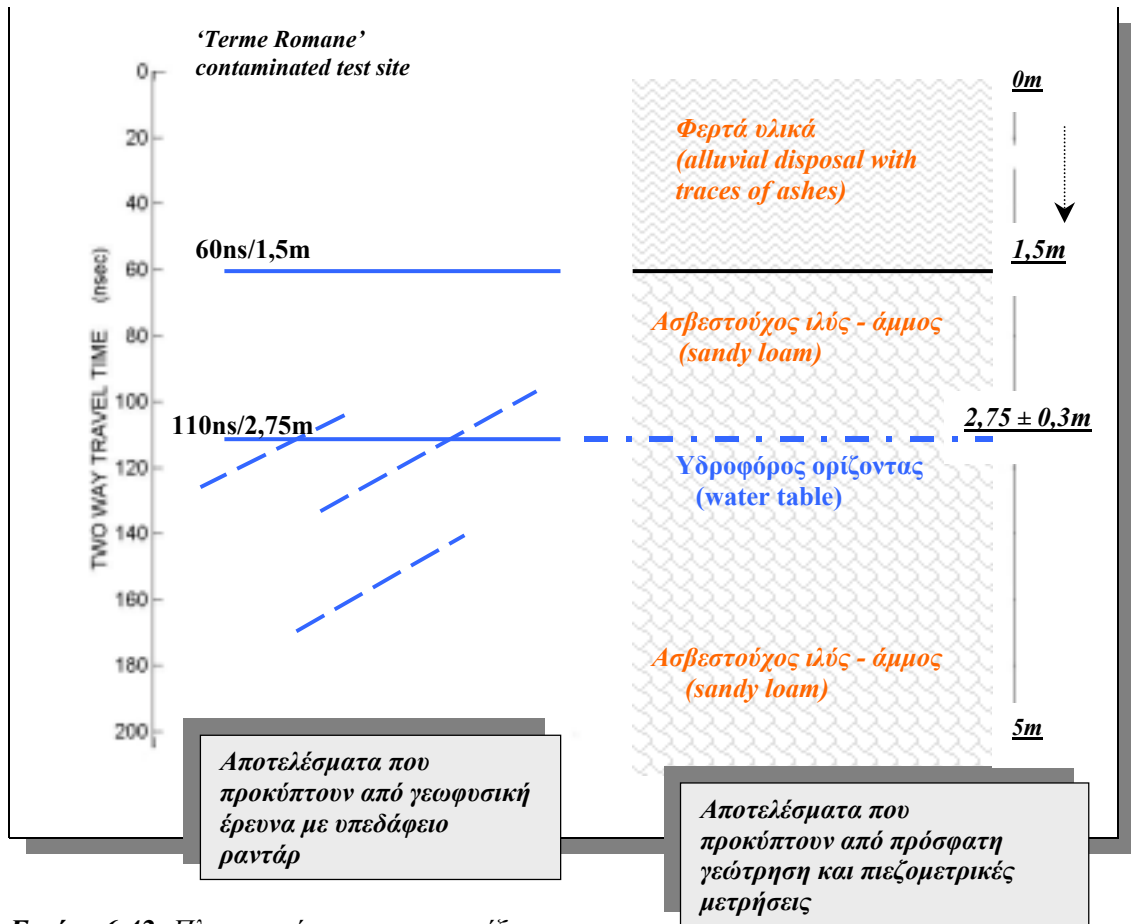
Συνοψίζοντας τα στοιχεία από άλλες έρευνες στην υπό μελέτη περιοχή (§6.4.1), προσκομίζονται οι εξής πληροφορίες για τη γεωλογία και τη στρωματογραφία του υπεδάφους:

- Σύμφωνα με πληροφορίες από γεώτρηση που διεξήχθη τον Αύγουστο του 2002 στην περιοχή διασκόπησης, το επιφανειακό τμήμα της περιοχής, στα πρώτα 1,5m, αποτελείται από φερτά υλικά (πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις με παρουσία στάχτης-τέφρας από θερμοηλεκτρικό σταθμό), ενώ το στρώμα που ακολουθεί χαρακτηρίζεται ως ασβεστούχος ιλύς - άμμος - αργιλοπηλώδη υλικά (*sandy loam*).
- Από τις πιεζομετρικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τον Ιούνιο του 2000 σε γεωτρήσεις πλησίον της περιοχής μελέτης γεωραντάρ (εικόνα 6.6), ο υδροφόρος ορίζοντας κυμαίνεται σε βάθος από 2,75m έως 3m από την επιφάνεια του εδάφους (πίνακας 6.1).

6.6.3 Συσχέτιση και ερμηνεία αποτελεσμάτων

Διαπιστώνεται ότι τόσο τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ, όσο και των προηγούμενων ερευνών στην υπό μελέτη περιοχή, μπορούν να συσχετιστούν κατά την ερμηνεία τους ως εξής (εικόνα 6.42):

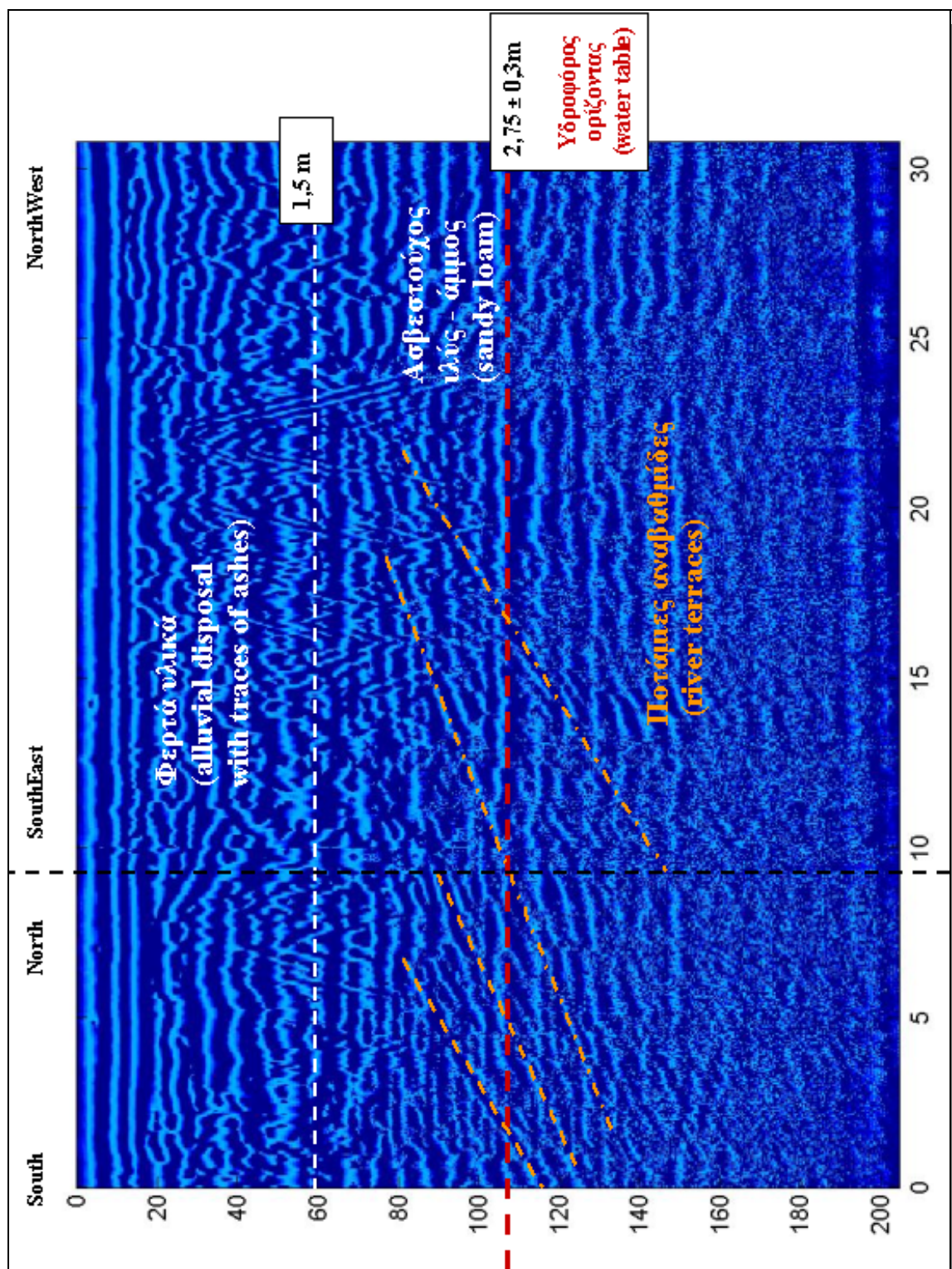
- ✓ Ο ισχυρός οριζόντιος ανακλαστήρας στα 60nsec που αναδεικνύεται στις καταγραφές γεωραντάρ, συμφωνεί με την παρουσία διεπιφάνειας που παρατηρείται στα 1,5m, όπως αποτυπώνεται από τις γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν (πυθμένας των αλλουβιακών αποθέσεων με ενδείξεις από στάχτες-τέφρα).
- ✓ Το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα όπως καταγράφεται από τις πιεζομετρικές μετρήσεις ($2,75 \pm 0,3\text{m}$), αντιστοιχεί στη δεύτερη ισχυρή ανάκλαση που παρατηρείται στα 110nsec στις τομές υπεδάφειου ραντάρ.
- ✓ Περιοχές ρύπανσης δεν διαπιστώθηκαν, συμπέρασμα που αντισταθίζεται με παλαιότερες έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στον ίδιο χώρο (βλ. §6.3). Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη διαπίστωση επιβεβαιώνεται από πρόσφατη διεξαγωγή γεώτρησης (Αύγουστος 2002) (βλ. υποσημείωση 1, §6.4.1).



Εικόνα 6.42: Πληροφορίες που προσκομίζονται από διαφορετικές έρευνες στην περιοχή 'Terme Romane', Monfalcone.

- ✓ Η παρουσία των κεκλιμένων ανακλάσεων (περιοχή 60-150nsec, αμμώδης ασβεστόλιθος), μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι η περιοχή μελέτης του γεωραντάρ βρίσκεται πλησίον καναλιού (εικόνα 6.5). Οι κεκλιμένες ανακλάσεις αποδίδονται γεωλογικά με τον όρο 'ποτάμιες αναβαθμίδες - river terraces' (οφείλονται στην απόθεση προσχώσεων με το χρόνο πάνω στην κοίτη του καναλιού). Το γεγονός ότι αποτυπώνονται με διαφορετική κλίση και ο προσανατολισμός τους σε σχέση με το κανάλι δε συμφωνεί, οφείλεται στη μετατόπιση είτε της ροής είτε της κοίτης του καναλιού με την πάροδο του χρόνου.
- ✓ Όσον αφορά τις περιθλάσεις των κυμάτων που παρατηρούνται στην περιοχή χρόνων καταγραφής 30 έως 60nsec, αυτές αποτελούν ένδειξη για την ύπαρξη μεταλλικών αντικειμένων. Στη συγκεκριμένη περιοχή είναι πιθανόν να βρίσκονται θαμμένοι σωλήνες ή καλώδια, τα οποία προκαλούν τις χαρακτηριστικές αυτές ανωμαλίες.

Εν κατακλείδι, αναφέρουμε ότι οι ισχυρές πρώτες καταγραφές που χαρακτηρίζουν την περιοχή χρόνων 0 έως 60nsec στις καταγραφές του γεωραντάρ, χαρτογραφούν το επιφανειακό τμήμα της περιοχής, στα πρώτα 1,5m (φερτά υλικά με ενδείξεις από στάχτες-τέφρα), ενώ η περιοχή εξασθένισης των σημάτων εντοπίζεται στο σχηματισμό που υπόκειται (ασβεστούχος ιλύς - άμμος). Όσον αφορά τη ρύπανση της περιοχής, δεν διαπιστώθηκαν πιθανοί ρυπογόνοι παράγοντες ούτε στην επεξεργασία που παρατίθεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, αλλά ούτε και σε πρόσφατη γεώτρηση που πραγματοποιήθηκε στο χώρο μελέτης. Οι ενδείξεις από τέφρα-στάχτη που αναφέρονται στο πρώτο στρώμα των φερτών υλικών και η πιθανή παρουσία μεταλλικών αντικειμένων, τα οποία προκαλούν φαινόμενα περιθλάσεων στα σήματα του γεωραντάρ, αποτελούν απλά υπόνοιες για ρύπανση και οποιαδήποτε επιβεβαίωσή τους απαιτεί συλλογή περισσότερων και ασφαλέστερων πληροφοριών.



Εικόνα 6.43: Ερμηνεία αποτελεσμάτων διασκόπησης υπεδάφειου ραντάρ στην περιοχή 'Terme Romane', Monfalcone.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα

Μετά την περάτωση της διπλωματικής εργασίας, προκύπτουν αξιόλογα συμπεράσματα σχετικά με τη συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στην ανίχνευση ρύπανσης εδαφών και υπογείων νερών και την ανάδειξη περιβαλλοντικών προβλημάτων μέσω μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης. Παράλληλα, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα των τεχνικών μαθηματικής επεξεργασίας, που εφαρμόζονται στις αρχικές καταγραφές του γεωραντάρ.

Η αποτελεσματικότητα των γεωφυσικών μεθόδων στη μελέτη περιβαλλοντικών προβλημάτων εξαρτάται άμεσα από την αντίθεση στις φυσικές ιδιότητες που δημιουργείται μεταξύ των στρωμάτων του υπεδάφους, των ακέραιων πετρωμάτων και της ρύπανσης που μελετάται. Μόνο όταν διαπιστώνεται μία αξιόλογη αντίθεση ανάμεσα στις φυσικές ιδιότητες που εξετάζονται, είναι δυνατόν να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα. Ακόμα επομένως και στην περίπτωση που εφαρμόζεται η κατάλληλη τεχνική, εάν διαπιστώνεται μικρή διαφορά μεταξύ των ιδιοτήτων του υπεδάφους και του στρώματος που περιέχει ίχνη ρύπανσης, είναι πολύ πιθανόν να μην προκύψουν αξιόλογες μετρήσεις. Η συνδυασμένη επομένως εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης πλεονεκτεί, καθώς με τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την καθεμία ξεχωριστά, οδηγούμαστε σε ασφαλέστερα συμπεράσματα και περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Οι συνθήκες διεξαγωγής μίας έρευνας με υπεδάφειο ραντάρ και η σωστή συλλογή-καταγραφή των δεδομένων αποτελούν σημαντικές παραμέτρους για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου στην ανίχνευση εστιών ρύπανσης. Η συχνότητα των κεραιών που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, ρυθμίζεται κατάλληλα ώστε να προκύπτουν πληροφορίες σχετικά με τη διεισδυτική ικανότητα του υπεδάφειου ραντάρ και να προσδιορίζονται ρυπογόνοι στόχοι (είτε σε μικρό βάθος με μεγάλη διακριτική ικανότητα είτε σε μεγάλο βάθος και μικρή διακριτική ικανότητα).

Τα στοιχεία του γεωραντάρ μπορούν να παρέχουν από την επιφάνεια αξιόπιστες πληροφορίες για την αγωγιμότητα και το βαθμό κορεσμού σε νερό του υπεδάφους, αποφεύγοντας με τον τρόπο αυτό το πυκνό δίκτυο γεωτρήσεων. Αντίστοιχα, από την επεξεργασία στοιχείων που προέρχονται κυρίως από το υπεδάφειο ραντάρ και τις ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις, προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με την εμφάνιση ρύπανσης πάνω από ανώμαλη ζώνη αγωγιμότητας. Στην περίπτωση αυτή, τα σήματα του γεωραντάρ εμφανίζονται ως σκιαγραφημένες ζώνες (*shadow zones*) και συμπίπτουν με τις περιοχές ρύπανσης υδρογονανθράκων (*ρύποι LNAPL*). Αποτελέσματα μελετών αποδεικνύουν τη συνεισφορά της τεχνικής του γεωραντάρ στη μελέτη των ιδιοτήτων του υπεδάφους και στην περιγραφή της μετανάστευσης ρύπων *NAPL (free phase - vapor phase)*. Είναι μάλιστα χαρακτηριστικό ότι το 48%-100% των παραγόντων ρύπανσης ανιχνεύονται από το υπεδάφειο ραντάρ.

Σε κάθε περίπτωση επομένως, τονίζεται η συμβολή της τεχνικής του γεωραντάρ τόσο στον καθορισμό των ορίων ρυπογόνου περιοχής, όσο και στον προσδιορισμό του είδους της ρύπανσης. Όταν υπάρχει, μάλιστα, συνδυασμένη εφαρμογή γεωφυσικών τεχνικών, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι ιδιαίτερα αξιόπιστα και ασφαλή.

Η γεωφυσική διασκόπηση που διεξήχθη με την τεχνική του υπεδάφειου ραντάρ στο ‘*Monfalcone*’ της βόρειας Ιταλίας, δεν αποκόμισε ασφαλή συμπεράσματα για την ύπαρξη ρύπανσης στο χώρο μελέτης. Μετά από επεξεργασία των δεδομένων που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης, δεν διαπιστώθηκαν ρυπογόνοι παράγοντες. Το γεγονός μάλιστα αυτό επιβεβαιώνεται από γεωλογικά στοιχεία, που προσκομίζονται από τη διεξαγωγή πρόσφατης γεώτρησης στην υπό μελέτη περιοχή. Αν και μέσω των αποτελεσμάτων της παρούσας επεξεργασίας δεν μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα και να αξιολογηθεί η εφαρμογή της μεθόδου στην ανίχνευση υπεδάφειας ρύπανσης, επιτεύχθει ικανοποιητική

συσχέτιση τους με τα αποτελέσματα πρόσφατων γεωλογικών μελετών στον ίδιο χώρο ρύπανσης.

Μετά την εφαρμογή τεχνικών επεξεργασίας στις αρχικές καταγραφές γεωραντάρ, επιτεύχθει η βελτίωση της ποιότητας απεικόνισης των σημάτων, η εκτίμηση των ταχυτήτων διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στα γεωλογικά στρώματα, η οριοθέτηση περιοχών ισχυρών ανακλάσεων και τελικά ο προσδιορισμός των γεωλογικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης (στρωμάτωση και βάθος υδροφόρου ορίζοντα).

Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα και τη συμβολή των τεχνικών μαθηματικής επεξεργασίας, που εφαρμόζονται στις αρχικές καταγραφές του γεωραντάρ, με εφαρμογή φίλτρων αναδεικνύονται πιθανές γεωλογικές ανωμαλίες (οριζόντιες-κεκλιμένες ανακλάσεις, περιθλώμενα κύματα), ενώ με χρήση στιγμιαίων μιγαδικών χαρακτηριστικών ανακτώνται επιπλέον πληροφορίες και επιβεβαιώνονται οι αρχικές ενδείξεις.

Διαπιστώνεται ότι η αποτελεσματικότητα της μεθόδου για ασφαλή και αξιόπιστα συμπεράσματα εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την αποτελεσματικότητα της τεχνικής επεξεργασίας του σήματος καταγραφής. Συνεπώς, με τη ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη της ψηφιακής ανάλυσης εικόνας, το υπεδάφειο ραντάρ καθίσταται χρήσιμο εργαλείο συλλογής και ερμηνείας δεδομένων, διαρκώς εξελισσόμενο και με συνεχώς αυξανόμενο πλήθος εφαρμογών και δυνατοτήτων.

7.2 Προτάσεις

Όσον αφορά την εφαρμογή της μεθόδου του υπεδάφειου ραντάρ στην περιοχή ‘*Monfalcone*’ της βόρειας Ιταλίας, μπορούν να τεθούν υπό συζήτηση κάποιες προτάσεις, προκειμένου τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από πιθανή επανάληψη διασκόπησης στον ίδιο χώρο μελέτης να είναι ασφαλέστερα και να αντιπροσωπεύουν μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής έρευνας.

Καταρχήν θα πρέπει να σημειωθεί ότι από την παρούσα εφαρμογή της τεχνικής του υπεδάφειου ραντάρ, δεν προκύπτουν στοιχεία που αποδεικνύουν ρύπανση της περιοχής. Προηγούμενες φυσικά έρευνες αναφέρουν την ύπαρξη ρύπανσης, όμως πρόσφατη γεώτρηση που διεξήχθη, πιστοποιεί το αποτέλεσμα που προκύπτει στην παρούσα γεωφυσική διασκόπηση. Στο σημείο αυτό τονίζεται η ασαφής πληροφόρησή

μας σχετικά με ύπαρξη ή όχι ρύπανσης στην περιοχή μελέτης, αλλά και γενικά οι αντικρουόμενες πληροφορίες από παλαιότερες και πρόσφατες γεωτρήσεις. Σε κάθε περίπτωση πάντως, απαιτούνται περισσότερα στοιχεία (αξιόπιστες γεωτρήσεις), προκειμένου να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα. Σημαντική βοήθεια θα αποτελούσε άλλωστε η πραγματοποίηση χημικών αναλύσεων.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι διασκοπήσεις γεωραντάρ και για τα δύο ζεύγη κεραιών που χρησιμοποιήθηκαν (250MHz & 500MHz), διεξήχθησαν σε περιορισμένη περιοχή μελέτης (30m x 2,5m). Συνεπώς τα δεδομένα που ελήφθησαν, δεν μπορούν θεωρηθούν ιδιαίτερα αντιπροσωπευτικά για τον ευρύτερο χώρο ρύπανσης. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν με κεραίες 250MHz χρησιμοποιήθηκαν ευρέως και συνέβαλλαν κατά κύριο λόγο στην ερμηνεία των μετρήσεων, ενώ από τα δεδομένα των 500MHz δεν προέκυψαν αξιόλογες πληροφορίες. Θα μπορούσαν επομένως να πραγματοποιηθούν μετρήσεις με κεραίες μικρότερης συχνότητας (π.χ. 100MHz) για να επιτευχθεί μεγαλύτερη διεισδυτική ικανότητα. Παράλληλα, οι μετρήσεις κοινού ενδιαμέσου σημείου θα έπρεπε να διεξαχθούν σε μεγαλύτερο εύρος γραμμών μελέτης, προκειμένου να διαφωτίσουν για τη μέση ταχύτητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε μεγαλύτερους χρόνους καταγραφής.

Τέλος, θα πρέπει να τονισθεί ότι η τεχνική του υπεδάφειου ραντάρ δεν είναι σε θέση να προσκομίσει αρκετά στοιχεία για τη ρύπανση του υπεδάφους όταν εφαρμόζεται μόνη της. Για τη μελέτη της ρύπανσης είναι απαραίτητο να συνδράμουν περισσότερες επιστήμες (γεωλογία - υδρογεωλογία - χημεία), αλλά και διαφορετικές γεωφυσικές μέθοδοι και γεωτρήσεις, προκειμένου στο τέλος να συνεκτιμηθούν τα επιμέρους στοιχεία και να προκύψει ένα ασφαλές αποτέλεσμα.

Προτείνεται, επομένως, ο συνδυασμός και εφαρμογή περισσότερων γεωφυσικών μεθόδων στην εν λόγω περιοχή, όπως η τεχνική της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, οι σεισμικές μέθοδοι ή ακόμα και η διεξαγωγή μετρήσεων υπεδάφειου ραντάρ μέσα σε γεωτρήσεις, προκειμένου να διαφωτιστούν καλύτερα τα αποτελέσματα που απορρέουν από την τεχνική του γεωραντάρ.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΟΡΓΑΝΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ ΣΤΟ ΝΕΡΟ

A.1 Ρύποι *LNAPL* (Non-Aqueous Phase Liquids)

Η κατηγοριοποίηση των οργανικών ρύπων στο νερό (*Non-Aqueous Phase Liquids*) είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με ένα απλό σύστημα ταξινόμησης, το οποίο χρησιμοποιεί ως μοναδική παράμετρο την πυκνότητα του ρυπαντή. Η ταξινόμηση αυτή αποτελεί σημαντικό εργαλείο όσον αφορά την κατανόηση και την εκτίμηση της μετανάστευσης των υδρογονανθράκων (Bedient et al., 1994).

Μελέτες αναφέρουν ότι κύριοι τύποι ρύπανσης που απαντώνται στο υπέδαφος είναι οι ακόλουθοι:

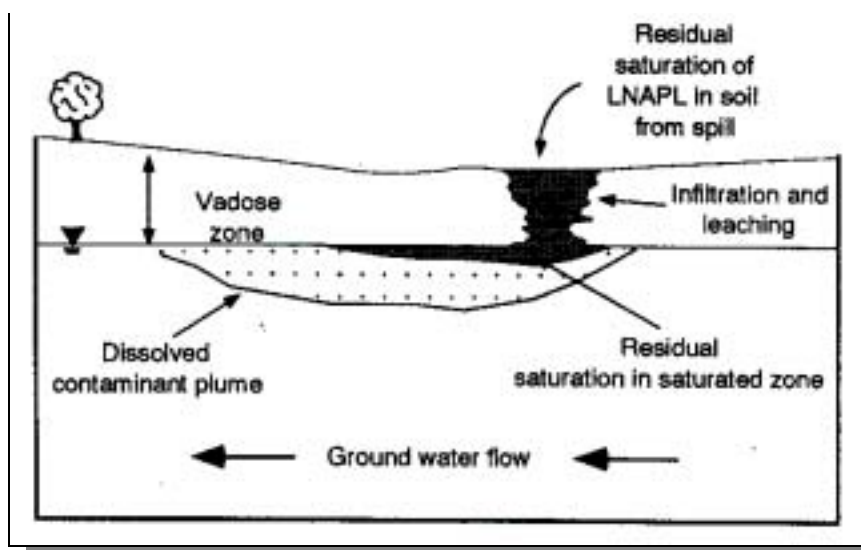
- *LNAPL* (Light Non-Aqueous Phase Liquids), δηλαδή οργανικοί ρύποι με πυκνότητα μικρότερη από αυτή του νερού, όπως είναι η βενζίνη που βασίζεται σε βενζόλιο, τολουόλιο ή ξυλόλιο.
- *DNAPL* (Dense Non-Aqueous Phase Liquids), δηλαδή οργανικοί ρύποι με πυκνότητα μεγαλύτερη από αυτή του νερού, όπως το τριχλωροαιθυλένιο ή τα βαριά πετρέλαια.
- Άλλοι ανόργανοι ρύποι, όπως λευκόχρυσος ή νικέλιο προστιθέμενο στη βενζίνη.

A.1.1 Ρύποι *LNAPL* (Light Non-Aqueous Phase Liquids)

Η ρύπανση αυτού του είδους σχετίζεται κυρίως με την παραγωγή, διύλιση και κατανομή των προϊόντων του πετρελαίου. Οι κυριότερες πηγές ρύπανσης *LNAPL* που απαντούν στο υπόγειο νερό είναι οι διαρροές βενζίνης, κηροζίνης και πετρελαίου ντίζελ. Όταν μία αντίστοιχη ρυπογόνος ουσία ελευθερώνεται στην επιφάνεια, αρχικά

υπό την επίδραση της βαρύτητας, διηθείται προς τα κάτω διαμέσου της ακόρεστης ζώνης. Είναι πιθανόν, όμως, κατά την κατακόρυφη πορεία της να συναντήσει κάποιον υδροφόρο ορίζοντα, οπότε και σχηματίζει ένα στρώμα στη ζώνη των τριχοειδών αγγείων, ακριβώς επάνω από την κορεσμένη ζώνη (εικόνα Α.1). Στη συνέχεια, τα συστατικά του LNAPL αρχίζουν να διαλύονται στο υπόγειο νερό δημιουργώντας μία ζώνη ρύπανσης γνωστή και ως «πλουμίδιο» ή «πλούμιο» (Bedient et al., 1994).

Επειδή το LNAPL δεν εισχωρεί πολύ βαθιά μέσα στον υδροφόρο ορίζοντα και είναι σχετικά βιοδιασπάσιμο, κάτω από κανονικές συνθήκες, αποτελεί ένα περιβαλλοντικό πρόβλημα, που όμως μπορεί να αντιμετωπιστεί καλύτερα σε σχέση με τη ρύπανση DNAPL.



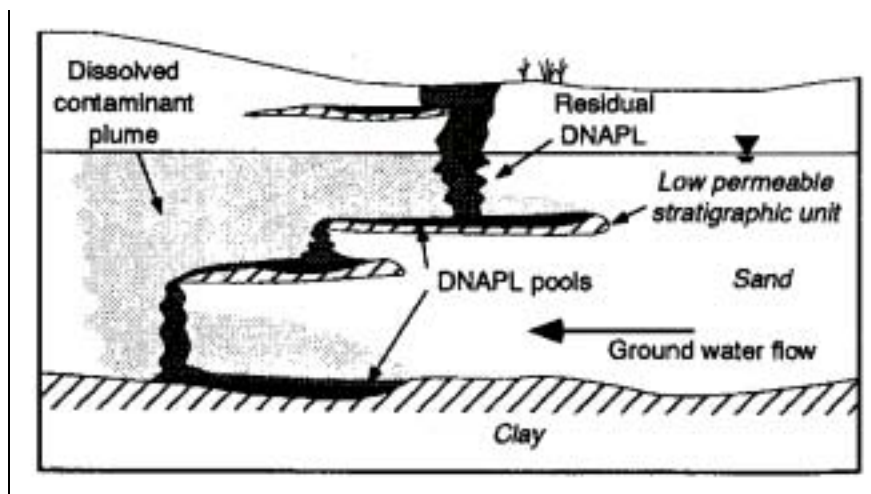
Εικόνα Α.1: Σχεδιάγραμμα κατανομής ρύπανσης LNAPL μέσα στο υπέδαφος (Bedient et al., 1994).

Α.1.2 Ρύποι DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquids)

Το DNAPL σχετίζεται με μία ευρεία ποικιλία βιομηχανικών δραστηριοτήτων, συμπεριλαμβανομένων σχεδόν όλων των διαδικασιών που αφορούν την επεξεργασία χλωριωμένων διαλυτών. Παράλληλα, σχετίζεται με τη βιομηχανία επεξεργασίας ξύλου και πιθανές διαρροές πετρελαίου.

Κατά την έγχυση ρύπανσης DNAPL στην επιφάνεια, παρατηρείται μία κάθετη κίνησή της προς τα κάτω διαμέσου της ακόρεστης ζώνης (*vadose zone*). Εάν έχουν ελευθερωθεί μεγάλες ποσότητες DNAPL, η ρύπανση συνεχίζει την κατακόρυφη μετανάστευση μέχρις ότου είτε εγκλωβιστεί ολόκληρη εντός των εδαφικών πόρων, με

τη μορφή παραμένουσας φάσης (*residual phase*), είτε έως ότου συναντήσει χαμηλής διαπερατότητας στρώματα, οπότε και σχηματίζονται λίμνες DNAPL (*pool phase*) μέσα στο σύστημα εδάφους-ταμιευτήρα (εικόνα Α.2).



Εικόνα Α.2: Σχεδιάγραμμα που απεικονίζει την κατανομή της ρύπανσης DNAPL. Στο σχήμα παριστάνεται ένα στρώμα χαμηλής διαπερατότητας (*low permeable stratigraphic unit*) το οποίο υπερχειλίζει από τη ροή DNAPL. Το σημείο υπερχείλισης μπορεί να βρίσκεται πιο μακριά από την αρχική πηγή ρύπανσης, περιπλέκοντας με τον τρόπο αυτό την ανίχνευση της μετανάστευσης DNAPL (Bedient et al., 1994).

Η ρύπανση DNAPL, κυρίως όταν αποτελείται από χλωριωμένους διαλύτες, εξυγιαίνεται πολύ δυσκολότερα σε σύγκριση με την LNAPL. Μελέτες αναφέρουν ότι ταμιευτήρες μολυσμένοι με μεγάλες ποσότητες DNAPL είναι σχεδόν αδύνατον να αποκατασταθούν, χρησιμοποιώντας ακόμα και τις καλύτερες μεθόδους καθαρισμού του υπογείου νερού. Αυτό συμβαίνει κυρίως για τους ακόλουθους λόγους:

- Οι χλωριωμένοι διαλύτες δεν βιοδιασπώνται γρήγορα με αποτέλεσμα να παραμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα στο υπέδαφος.
- Η μεγαλύτερη πυκνότητα του DNAPL προκαλεί βαθύτερη εξάπλωση της ρυπογόνου ζώνης σε σχέση με το LNAPL.
- Οι χλωριωμένοι διαλύτες εμφανίζουν φυσικές ιδιότητες, οι οποίες επιτρέπουν τόσο την κίνηση διαμέσου μικρών ρωγμών του εδάφους όσο και την εξάπλωσή τους σε μεγάλες αποστάσεις.

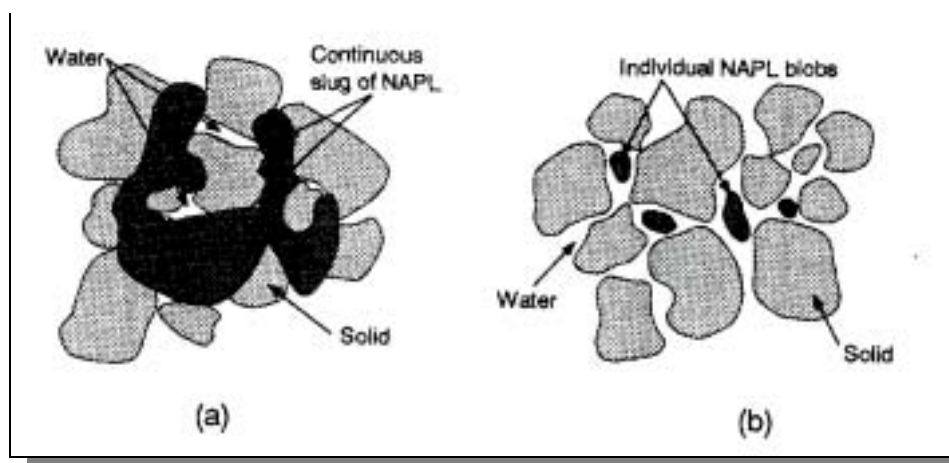
A.2 Κατακόρυφη μετανάστευση DNAPL μέσα στην κορεσμένη ζώνη

Όταν η ρύπανση DNAPL μεταναστεύει διαμέσου της κορεσμένης ζώνης σχηματίζεται ένα σύστημα τριών φάσεων που αποτελείται από το έδαφος, το νερό και το ρυπαντή. Το DNAPL λειτουργεί στο σύστημα αυτό ως μη-διαβρέχουσα φάση, η οποία πρέπει να υπερνικήσει τις δυνάμεις των τριχοειδών φαινομένων προκειμένου να εισχωρήσει εντός ενός πόρου κορεσμένου με νερό (διαβρέχουσα φάση). Η τριχοειδής πίεση, η οποία πρέπει να υπερνικηθεί καλείται «πίεση εισόδου». Εάν οι δυνάμεις που προέρχονται από το συνδυασμό των δυνάμεων βαρύτητας και των δυνάμεων πίεσης (κατευθυντήριες δυνάμεις) του ρυπαντή DNAPL είναι μεγαλύτερες από την πίεση εισόδου, τότε το DNAPL θα διεισδύσει εντός του πόρου. Αντίθετα, εάν οι κατευθυντήριες δυνάμεις συμμετέχουν σε μικρότερο βαθμό, τότε η μάζα του DNAPL θα διασπαστεί σε αναρίθμητες, μεμονωμένες σταγόνες παραμένουσας φάσης, οι οποίες θα βρίσκονται κυρίως στους μεγάλους πόρους του ταμιευτήρα.

A.3 Κίνηση NAPL διαμέσου της ακόρεστης ζώνης (vadose zone)

Η διήθηση NAPL μέσα στην ακόρεστη ζώνη προκαλεί το σχηματισμό ενός συστήματος από τέσσερις φάσεις: αέρα, νερό, έδαφος και τις διάφορες φάσεις του NAPL. Το νερό λειτουργεί ως μία διαβρέχουσα φάση πάνω στο έδαφος, ενώ ο ρυπαντής λειτουργεί με τη σειρά του και ως διαβρέχουσα φάση σε σχέση με τον αέρα και ως μη-διαβρέχουσα σε σχέση με το νερό. Εντούτοις, το NAPL διεισδύει σχετικά εύκολα σε στρώματα των οποίων οι πόροι είναι σε μεγάλο βαθμό κορεσμένοι με νερό. Αυτό συμβαίνει επειδή το NAPL, ως εν μέρει διαβρέχουσα φάση, δεν αντιμετωπίζει αντιστάσεις από τις τριχοειδείς πιέσεις. Εάν η ρύπανση καθίσταται σημαντική, τότε παρατηρείται περαιτέρω μετανάστευση του ρυπαντή σχηματίζοντας είτε μεμβράνες ανάμεσα στην αέρια και υγρή φάση είτε/και σταγόνες NAPL, οι οποίες αντικαθιστούν νερό ή αέρα μέσα στους πόρους (οι χλωριωμένοι διαλύτες δε σχηματίζουν μεγάλες μεμβράνες).

Από τη στιγμή που σταματήσει η τροφοδοσία της ρύπανσης, το 10%-20% των πόρων που βρίσκονται στην ακόρεστη ζώνη καταλαμβάνονται από την παραμένουσα φάση του NAPL με τη μορφή μεμβράνης ή σταγόνων (εικόνα Α.3).



Εικόνα Α.3: (α) Ρύπανση NAPL με τη μορφή ελεύθερης φάσης (free phase).
(β) Παραμένουσα φάση NAPL (residual phase) (Bedient et al., 1994).

Ο βαθμός κορεσμού μίας παραμένουσας φάσης (*residual saturation*) LNAPL ή DNAPL στην κορεσμένη ζώνη είναι συνήθως μεγαλύτερος από αυτόν της μη-κορεσμένης κατά ένα παράγοντα μεταξύ 2 και 5 (Bedient et al., 1994). Οι λόγοι που οδηγούν σε μία υψηλότερη συγκέντρωση της παραμένουσας NAPL μέσα σε εδάφη μπορούν να συνοψιστούν στους εξής:

- Το NAPL συμπεριφέρεται ως μη-διαβρέχον υγρό μέσα στην κορεσμένη ζώνη και επομένως εγκλωβίζεται στους μεγαλύτερους πόρους.
- Το NAPL εμφανίζει την τάση να εξαπλώνεται περισσότερο μέσα στην ακόρεστη ζώνη λόγω των ευνοϊκών συνθηκών που επικρατούν με τις τριχοειδείς πιέσεις.

A.4 Ερμηνεία της συμπεριφοράς LNAPL πάνω στον υδροφόρο ορίζοντα

Η αλληλεπίδραση μεταξύ του νερού, αέρα και LNAPL καθίσταται ιδιαίτερα πολύπλοκη όταν το NAPL πλησιάζει τον υδροφόρο ορίζοντα. Σε ένα ολοκληρωτικά κορεσμένο σύστημα το νερό είναι το διαβρέχον υγρό και το LNAPL η μη-διαβρέχουσα φάση, της οποίας η κίνηση απωθείται από τις τριχοειδείς δυνάμεις. Τα τριχοειδή αγγεία αποτελούν τη μεταβατική ζώνη μεταξύ ενός συστήματος εν μέρει διαβρέχουσας φάσης NAPL (ακόρεστη ζώνη) και μη-διαβρέχουσας φάσης (κορεσμένη ζώνη).

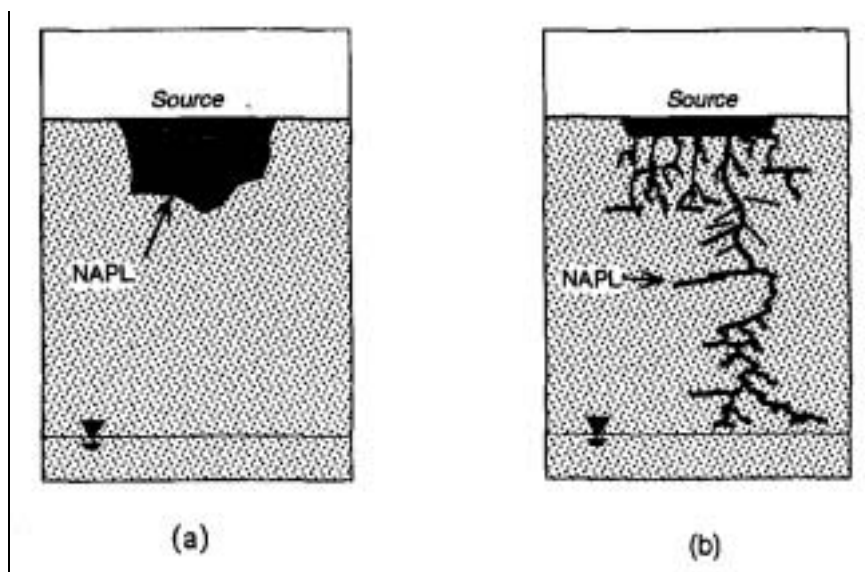
Εάν η πυκνότητα του NAPL είναι μικρότερη από αυτή του νερού, τότε η ρύπανση συσσωρεύεται στην κορυφή των τριχοειδών αγγείων και τελικά θα αρχίσει να ρέει σε πολύ λεπτές φέτες. Αντιθέτως, εάν ο ρυθμός ροής του LNAPL μέσω της ακόρεστης

ζώνης είναι αρκετά γρήγορος, τα τριχοειδή αγγεία καταστρέφονται και το LNAPL επιπλέει επάνω στον υδροφόρο ορίζοντα.

A.5 Κίνηση NAPL διαμέσου ρωγμών και ετερογενειών

Πρόσφατες μελέτες επισημαίνουν έναν άλλο τρόπο διάδοσης της ρύπανσης μέσα στο υπέδαφος, διαφορετικό από τον κενό χώρο που αφήνουν οι πόροι μεταξύ τους. Τη διάδοσή αυτή αποτελούν οι μικρορωγμές και οι διάφορες ετερογένειες που παρατηρούνται σε πορώδη μέσα (Bedient et al., 1994). Στις περισσότερες περιπτώσεις το NAPL «προτιμά» τη μετανάστευση διαμέσου του δευτερογενούς πορώδους. Γενικά, πάντως, οι ετερογένειες που παρουσιάζονται στο έδαφος προκαλούν τα ακόλουθα αποτελέσματα στην κίνηση του NAPL:

1. *Αύξηση στο μέγεθος της NAPL ζώνης.* Ακόμα και μικρά ποσά αργίλου (2% κατά βάρος) μπορούν να έχουν δραματικές επιπτώσεις στην μετανάστευση της ρύπανσης δημιουργώντας πολύπλοκες διόδους.
2. *Επιτρέπουν βαθύτερη διείσδυση μέσα στο υπέδαφος.* Μελέτες αναφέρουν ότι ακόμα και μικρά ποσά DNAPL μπορούν να εισχωρήσουν εκατοντάδες πόδια διαμέσου της ακόρεστης ζώνης προτού φτάσουν στον υδροφόρο ορίζοντα (εικόνα A.4b).
3. *Επιδρούν αναποτελεσματικά στην κίνηση της ρύπανσης.* Ταμειυτήρες οι οποίοι υπό κανονικές συνθήκες εμποδίζουν τη ροή της ρύπανσης, χάνουν την αποτελεσματικότητά τους όταν περιέχουν στη μάζα τους ακόμα και μικροσκοπικές ετερογένειες (εικόνα A.4b).



Εικόνα Α.4: (α) Σχηματική αναπαράσταση μετανάστευσης NAPL διαμέσου πρωτογενούς πορώδους. (β) Εξάπλωση ρύπανσης όταν επικρατεί δευτερογενές πορώδες στον σχηματισμό (Bedient et al., 1994).

Η διαδρομή που ακολουθείται από ρυπαντή NAPL, καθώς μεταναστεύει προς το υπέδαφος, επηρεάζεται από πληθώρα παραγόντων που σχετίζονται με τις φυσικές ιδιότητες του ρυπαντή και τη γεωλογία της περιοχής (Bedient et al., 1994).

Οι κυριότεροι από τους παράγοντες αναφέρονται παρακάτω:

- Ο όγκος των NAPL's.
- Οι ιδιότητες του συστήματος έδαφος-ταμιευτήρα, όπως το μέγεθος των πόρων και η διαπερατότητα.
- Οι μικροσκοπικές δομές και ρωγμές που εμφανίζονται σε στρώματα αργίλου και ιλύος.
- Η τοπογραφία και στρωματογραφία στρωμάτων χαμηλής διαπερατότητας.
- Οι ιδιότητες του ρυπαντή, όπως η πυκνότητα, το ιξώδες, η διαβρεχτότητα και η επιφανειακή τάση.
- Ο χρόνος που διήρκεσε το συμβάν.
- Η περιοχή διήθησης, από το σημείο εισόδου της ρύπανσης μέχρι το υπέδαφος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ FOURIER - HILBERT

B.1 Μετασχηματισμός FOURIER

Έστω ότι $g(t)$ είναι συνάρτηση που περιγράφει το σήμα του γεωραντάρ. Τότε ο μετασχηματισμός Fourier της $g(t)$ είναι (Bracewell 1986, Kulhanek 1976, Papoulis 1962, Πάνας 1987, Spiegel 1977):

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-j\omega t} dt \quad (B.1)$$

Ενώ ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier είναι:

$$g(t) = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (B.2)$$

Είναι εύκολο να αποδειχτεί ότι:

$$g(t) = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} R(\omega)\cos(\omega t)d\omega - (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)\sin(\omega t)d\omega \quad (B.3)$$

όπου:

$$R(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(y)\cos(\omega y)dy \quad (B.4)$$

$$-X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(y)\sin(\omega y)dy \quad (B.5)$$

οι μετασχηματισμοί συνημιτόνου και ημιτόνου αντίστοιχα της $g(t)$.

Τότε προκύπτει ότι:

$$G(\omega) = R(\omega) + jX(\omega) = A(\omega)e^{j\gamma(\omega)} \quad (B.6)$$

όπου:

$$A(\omega) = [R^2(\omega) + X^2(\omega)]^{1/2} \quad (B.7)$$

$$\gamma(\omega) = \tan^{-1}[X(\omega)/R(\omega)] \quad (B.8)$$

το φάσμα του πλάτους και το φάσμα της φάσης αντίστοιχα της $g(t)$.

B.2 Μετασχηματισμός HILBERT

Ο μετασχηματισμός Hilbert είναι μία ειδική μορφή του μετασχηματισμού Fourier. Έστω η συνάρτηση $g(t)$ όπως ορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Ο μετασχηματισμός Hilbert για την $G(t)$ είναι (Yilmaz 1987):

$$G_{Hi}(t) = (1/\pi) \int_{-\infty}^{\infty} [g(t')/(t'-t)]dt' = (-1/\pi t)*g(t) \quad (B.9)$$

όπου $*$ το σύμβολο της συνέλιξης. Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Hilbert είναι:

$$g(t) = -(1/\pi) \int_{-\infty}^{\infty} [G_{Hi}(t')/(t'-t)]dt' = -(-1/\pi t)*G(t) \quad (B.10)$$

Παράδειγμα: Ανάλυση σύνθετου ίχνους

Έστω ένα ίχνος της μορφής: $g(t) = A(t)\cos(2\pi vt)$ όπου το $A(t)$ μεταβάλλεται αργά σε σχέση με το $\cos(2\pi vt)$. Τότε το $A(t)$ είναι το στιγμιαίο πλάτος της $g(t)$. Αν το $A(t)$ θεωρηθεί σταθερό ο μετασχηματισμός Hilbert της $g(t)$ είναι $G(t) = -A(t)\sin(2\pi vt)$. Τότε το σύνθετο σήμα είναι το $h(t) = g(t) + jG(t) = A(t)e^{j\pi vt}$. Αν το “ v ” (συχνότητα) δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται αργά τότε η ποσότητα $v_i(t)$ είναι η στιγμιαία συχνότητα, ενώ η ποσότητα $2\pi v_i(t) = d\gamma(t)/dt = d(2\pi vt)/dt$ είναι η στιγμιαία φάση.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Al-Dajani Abdul Fatah, Reppert Phillip (1999). "Ground penetrating radar inversion for fracture orientation". *SEG 1999 Expanded Abstracts*.
2. Al-Nuaimy W., Huang Y., Nakhkash M., Fang M.T.C., Nguyen V.T., Eriksen A. (2000). "Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 43, pp. 157-165.
3. Ambiente S.P.A. (1998). "Bonifica, ripristino e riqualificazione dell' area comunale attigua al canale Est-Ovest Terme Romane". *Relazione tecnico illustrative, Comune die Monfalcone*, pp. 1-14.
4. Annan A.P., Waller W.M., Strangway D.W., Rossiter J.R., Redman J.D., Watts R.D. (1975). "The electromagnetic response of a low-loss, 2-layer, dielectric earth for horizontal electric dipole excitation". *Geophysics*, vol. 40, no 2, pp. 285-298.
5. Aristodemou E., Betts A.T. (2000). "DC resistivity and induced polarisation investigations at a waste disposal site and its environments". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 44, pp. 275-302.
6. Atekwana E.A., Sauck W.A. et Werkema Jr.D.D. (2000). "Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 44, pp. 167-180.
7. Bedient P.B., Rifai H.S., Newell C.J. (1994). "Ground Water Remediation: Transport and Remediation". *Englewood Cliffs, New Jersey*, pp. 349-362.
8. Benson A.K. (1995). "Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, faults, cavities". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 33, pp. 177-193.
9. Benson A.K., Stubben M.A. (1995). "Interval resistivities and very low frequency electromagnetic induction-an aid to detecting groundwater contamination in space and time: a case study". *Environmental Geosciences*, vol. 2, pp. 74-84.

10. Benson A.K., Payne K.L. et Stubben M.A. (1997). "Mapping groundwater contamination using DC resistivity and VLF geophysical methods: a case study". *Geophysics*, vol. 62, pp. 80-86.
11. Bernabini M., Pettineli E. (1995). "Field experiments for characterization of GPR antenna and pulse propagation". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 33, pp. 63-76.
12. Bracewell N.R. (1986). "The Fourier transform and its applications". *Mc Graw-Hill international editions, Stanford*.
13. Brewster A., Annan P., Kueper B., Sandar K. (1995). "Observed migration of a controlled DNAPL release by geophysical methods". *Ground Water Magazine*, vol. 33, no 6, pp. 977-987.
14. Buselli G., Lu Kanglin (2001). "Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 48, pp. 11-23.
15. Cardarelli E. et Bernabini M. (1997). "Two case studies of the determination of parameters of urban waste dumps". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 36, pp. 167-174.
16. Consortium for Industrial Development of Monfalcone (CSIM) (2000). "HYGEIA Project". *Monfalcone, Italy*.
17. Daniels J., Roberts R., Vendl M. (1992). "Site studies of ground penetrating radar for monitoring petroleum product contaminants". *Proceedings of the symposium on the application of Geophysics to engineering and environmental problems*, pp. 597-609.
18. Doll W.E., Nyquist J.E., Beard L.P. et Gamey T. J. (2000). "Case history: Airborne geophysical surveying for hazardous waste site characterization on the Oak Ridge Reservation, Tennessee". *Geophysics*, vol. 65, pp. 1372-1387.
19. Garambois S., Senechal P., Perroud H. (2001). "On the use of combined geophysical methods to assess water content and water conductivity of near-surface formation". *Journal of Hydrology*, vol. 259, pp. 32-48.
20. Geostudio (1996). "Indagine preliminare per lo studio delle risorse geotermiche delle acque delle Terme Romane nel Comune di Monfalcone e loro utilizzazione". *Relazione geologico-tecnica*.

21. Grumman D.L., Jr. and Jeffrey J. Daniels (1995). "Experiments on the Detection of Organic Contaminants in the Vadose Zone". *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, pp. 31-38.
22. Hamran S.E., Gjessing D.T., Hjelmstad J., Aarholt E. (1995). "Ground penetrating synthetic pulse radar: dynamic range and modes of operation". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 33, pp. 7-14.
23. Holt J., Daniels J., Vendl M., Baumgartner F. et Radziviscius S. (1998). "Brownfield site investigation using geophysics: a case history from East Chicago". *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP'98)*, pp. 389-398.
24. Hugenschmidt J., Partl M.N., De Witte H. (1998). "GPR inspection of a mountain motorway in Switzerland". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 40, pp. 95-104.
25. Jol H.M. (1995). "Ground penetrating radar antennae frequencies transmitter powers compared for penetration depth, resolution and reflection continuity". *Geophysical Prospecting*, vol. 43, pp. 693-709.
26. Kalantzis F., Stevens K.M., Kanasewich E.R. et Lodha G.S. (1994). "Ground penetrating radar imaging of nuclear waste repositories". *56th Meet. Eur. Assoc. Explor. Geophys. Extended abstracts, session: P050*.
27. Kulhanek O. (1976). "Introduction to digital filtering in geophysics". *Elsevier, Sweeden*.
28. Lanz E., Maurer H. et Green A.G. (1998). "Refraction tomography over a buried waste disposal site". *Geophysics*, vol. 63, pp. 1414-1433.
29. Lima O.A.L., Sato H.K. et Porsani M.J. (1995). "Imaging industrial contaminant plumes with resistivity techniques". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 34, pp. 93-108.
30. Loke M.H., Barker R.D. (1996). "Practical technique for 3D resistivity surveys and data inversion". *Geophysical Prospecting*, vol. 44, pp. 499-523.
31. Meju M. (2000). "Environmental geophysics: the tasks ahead". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 44, pp. 63-65.
32. Mellett J.S. (1995). "Ground penetrating radar applications in engineering, environmental management and geology". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 33, pp. 157-166.

33. Orlando L. (2002). "Detection and analysis of LNAPL using the instantaneous amplitude and frequency of ground-penetrating radar data". *Geophysical Prospecting*, vol. 50, pp. 27-41.
34. Orlando L. et Marchesi E. (2001). "Georadar as a tool to identify and characterise solid waste dump deposits". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 48, pp. 163-174.
35. Osservatorio Geofisico Sperimentale di Trieste (1970). "Indagini geologiche e geofisiche per le Terme Romane di Monfalcone". *Relazione n.70420*.
36. Papoulis A. (1962). "The Fourier integral and its applications". *Mc Graw-Hill international editions, Brooklyn*.
37. Pulse Ekko 1000Run User Guide Version 1.2.
38. Reynolds J. (1998). "An introduction to applied and environmental geophysics". *John Willey and Sons*.
39. Ross H.P., Mackelprang C.E. et Wright P.M. (1990). "Dipole-dipole electrical resistivity surveys at waste disposal study sites in Northern Utah". In Ward, H. (Ed), *Geotechnical and Environmental Geophysics. Soc. Explor. Geoph.*, vol. 2, pp. 145-152.
40. Sauck W.A. (2000). "A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 44, pp. 151-165.
41. Sauck W.A., Atekwana E.A., Nash M.S. (1998). "High electrical conductivities associated with an LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques". *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 2, pp. 203-212.
42. Seren S.S. et Blaumoser N.H. (1994). "Combined implementation of geophysical methods for the investigation of old waste deposits in alpine area". *56th Meet. Eur. Assoc. Explor. Geophys. Extended abstracts, session: P037*.
43. Spiegel M. (1977). "Αναλυση Fourier (μετάφραση)". *Mc Graw-Hill international editions, New York*.
44. Taner M.T. (1992-2001). "Seismic trace attributes and their projected use in prediction of rock properties and seismic facies". *Attributes Revisited (Revised Sep. 2000), Houston, Texas*. (<http://www.rocksolidimages.com>)
45. Toshioka T., Tsuchida T., Sasahara K. (1995). "Application of GPR to detecting and mapping cracks in rock slopes". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 33, pp. 119-124.

46. Tsoflias G. (1999). "Detection of vertical fractures in geologic formations using the polarization properties of ground penetration radar signal". *SEG 1999, Expanded Abstracts*.
47. United States Environmental Protection Agency (EPA) (2000). "Innovations in Site Characterization: Geophysical Investigation at Hazardous Waste Sites". (EPA-542-R-00-003). (<http://www.epa.gov/tio>)
48. Yilmaz O. (1987). "Investigations in Geophysics: Seismic data processing". *Society of Exploration Geophysicists press*. (<http://www.seg.org>)

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βαφείδης Α. (1994). "Αξιολόγηση σχηματισμών με γεωφυσικές μεθόδους". *Χανιά, σελ. 15-20*.
2. Hamdan H. (2002). "Γεωηλεκτρική διασκόπηση στη λεκάνη του ποταμού Κερίτη του Νομού Χανίων". *Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά*.
3. Κρητικάκης Γ. (2001). "Συμβολή των σεισμικών μεθόδων ανάκλασης και διάθλασης σε γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές μελέτες". *Εργασία στα πλαίσια του μεταπτυχιακού μαθήματος 'Ειδικά Κεφάλαια Εφαρμοσμένης Γεωλογίας'.* *Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά*.
4. Πάνας Σ. (1987). "Ψηφιακή επεξεργασία σημάτων". *University Studio Press. Θεσσαλονίκη*.
5. Παπαζάχος Β. (1986). "Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη γεωφυσική". *Θεσσαλονίκη, σελ 270-277, 294-296*.
6. Πουλιούδης Γ. (1999). "Γεωφυσική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο της Ιτάνου με τη μέθοδο του υπεδάφειου ραντάρ". *Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά, σελ 120*.
7. Σπανουδάκης Ν. (2002). "Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων και εφαρμογή σε περιβαλλοντικά θέματα". *Μεταπτυχιακή εργασία σε εξέλιξη. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά*.
8. Σπανουδάκης Ν. (2001). "Συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στην ανίχνευση στόχων μικρών διαστάσεων". *Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά, σελ 146*.