

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:

“ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ”

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΔΙΑΚΕΝΩΝ ΚΑΙ
ΕΓΚΟΙΛΩΝ ΣΕ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ.
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΟ ΛΑΤΟΜΕΙΟ
ΖΩΦΟΡΩΝ, Ν. ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ»**

ΓΕΩΡΓΙΑ Ε. ΧΟΡΕΥΤΑΚΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ :

ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ (επιβλέπων)

ΓΑΛΕΤΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΜΑΝΟΥΤΣΟΓΛΟΥ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2006

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τον Απρίλιο του 2003 πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές διασκοπήσεις στο χώρο εξόρυξης του λατομείου Ζωφόρων Ηρακλείου Κρήτης με σκοπό τον εντοπισμό έγκοιλων στο ασβεστολιθικό πέτρωμα της περιοχής. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκε διασκόπηση ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη διπόλου-διπόλου και τη μέθοδο του γεωραντάρ. Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει την επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων των παραπάνω διασκοπήσεων .

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου για την οικονομική και ηθική υποστήριξη που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια καθώς επίσης και στο μεταπτυχιακό φοιτητή Σπανουδάκη Νικόλαο, του εργαστηρίου της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, για τη βοήθεια του στην επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ. Επίσης θα ήθελα εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή κ. Βαφείδη για την καθοδήγηση και τη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της επιτροπής που δέχτηκαν να εξετάσουν την παρούσα εργασία.

*Στη μνήμη
της αγαπημένης μου
γιαγιάς Γεωργίας*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή αναφέρεται στη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ για τον προσδιορισμό έγκοιλων στο κύριο «σώμα» του ασβεστόλιθου στο λατομείο αδρανών στο χωριό Ζωφόροι, στο Ηράκλειο Κρήτης.

Στο χώρο εξόρυξης του λατομείου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας σε κάναβο διαστάσεων 108m x 24m. Ο κάναβος αποτελείτο από 5 γραμμές μελέτης μήκους 108m. Οι μετρήσεις έγιναν με τη διάταξη του διπόλου – διπόλου. Σε ορισμένες από τις γραμμές μελέτης της ηλεκτρικής διασκόπησης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με το γεωραντάρ με κεραίες των 110MHz για σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Η επεξεργασία των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας, που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα RES2DINV. Για τις μετρήσεις του γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκαν το σύστημα pulseEKKO1000, για την καταγραφή των δεδομένων του ραντάρ και τα προγράμματα MATLAB και GPRProV5, που υποστηρίζεται από το MATLAB, για την επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται κυρίως της επεξεργασίας των δεδομένων του γεωραντάρ, λόγω του ότι η παρουσίαση της επεξεργασίας των δεδομένων της ηλεκτρικής διασκόπησης έχει προηγηθεί στην διπλωματική εργασία του συγγραφέα. Η επεξεργασία περιλαμβάνει αρχικά φίλτρα διόρθωσης και ενίσχυσης του σήματος, χωροθέτηση των εικόνων, υπολογισμός των μιγαδικών χαρακτηριστικών, αποσυνέλιξη, ανάλυση κυριών συνιστωσών σε ομάδες χαρακτηριστικών, ταξινόμηση και υπέρθεση εικόνων για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Από την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψαν τρεις ανωμαλίες οι οποίες εμφανίζονται και στις τρεις γραμμές μελέτης από τα δεδομένα του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας. Οι θέσεις αυτές είναι στα 12 - 24m, 30 - 40m, και 70 - 96m .

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	σελ. i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	σελ. iii
 <u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</u>	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	σελ. 1
1.1 Ανάπτυξη γεωφυσικής τεχνολογίας.....	σελ. 1
1.2 Ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης.....	σελ. 1
1.3 Εφαρμογές γεωραντάρ.....	σελ. 2
1.4 Σχεδιάγραμμα εργασίας.....	σελ. 3
 <u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</u>	
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ.....	σελ. 4
2.1 Εισαγωγή.....	σελ. 4
2.2 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας.....	σελ. 4
2.3 Αποτελέσματα ηλεκτρικής τομογραφίας.....	σελ. 6
 <u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</u>	
ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ.....	σελ. 9
3.1 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ.....	σελ. 9
3.2 Διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	σελ. 9
3.3 Εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	σελ. 11
3.4 Σχεδιασμός διασκόπησης.....	σελ. 12
3.4.1 Αξιολόγηση του πεδίου της έρευνας.....	σελ. 13
3.4.2 Μέθοδοι διασκόπησης.....	σελ. 15
3.4.3 Παράμετροι της διασκόπησης.....	σελ. 16
 <u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</u>	
ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ.....	σελ. 21
4.1 Εισαγωγή.....	σελ. 21

4.2 Παράθυρα ή μάσκες.....	σελ.22
4.2.1 Μονοδιάστατα φίλτρα.....	σελ.22
4.2.2 Δυσδιάστατα φίλτρα.....	σελ.25
4.3 Ενίσχυση των δεδομένων.....	σελ.25
4.3.1 Αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης.....	σελ.26
4.3.2 Σταθερή ενίσχυση.....	σελ.27
4.4 Χωροθέτηση.....	σελ.27
4.4.1 Εισαγωγικά.....	σελ.27
4.4.2 Χωροθέτηση κυματαριθμού –συχνότητας ($f - k$).....	σελ.28
4.5 Αποσυνέλιξη πρόβλεψης.....	σελ.31
4.6 Μιγαδικά χαρακτηριστικά δεδομένων γεωραντάρ.....	σελ.31
4.6.1 Εισαγωγικά.....	σελ.31
4.6.2 Τα βασικά μιγαδικά χαρακτηριστικά.....	σελ.33
4.6.3 Στιγμαία μιγαδικά χαρακτηριστικά.....	σελ.34
4.7 Μετασχηματισμός κυρίων συνιστωσών.....	σελ.38
4.8 Ταξινόμηση.....	σελ.40
4.8.1 Αυτόματη ταξινόμηση.....	σελ.40
4.8.1.1 Μέθοδος αυτόματης ταξινόμησης K- μέσων τιμών (k-means).....	σελ.41
4.8.1.2 Χάρτες αυτοδιοργάνωσης (Self Organizing Maps, SOM).....	σελ.42
4.8.2 Καθοδηγούμενη ταξινόμηση.....	σελ.44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	σελ.45
5.1 Εισαγωγή.....	σελ.45
5.2 Σχεδιασμός διασκοπήσεων.....	σελ.45
5.3 Επεξεργασία δεδομένων γεωραντάρ.....	σελ.46
5.4 Επιλογή ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων.....	σελ.48
5.5 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων.....	σελ.50
Αρχικές εικόνες.....	σελ.51
Εικόνες μετά το φίλτρο Dewow.....	σελ.56
Εικόνες μετά το φίλτρο AGC.....	σελ.58
Εικόνες μετά τη χωροθέτηση $f-k$	σελ.63
Εικόνες μετά την αποσυνέλιξη πρόβλεψης.....	σελ.68

Εικόνες των μιγαδικών χαρακτηριστικών.....σελ.73	
Εικόνες ταξινόμησης.....σελ.104	
5.6 Ερμηνεία αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα.....σελ.108	
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....σελ.112	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**ΕΙΣΑΓΩΓΗ****1.1 Ανάπτυξη γεωφυσικής τεχνολογίας**

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις τα τελευταία χρόνια παρουσίασαν και παρουσιάζουν σημαντική τεχνολογική άνθιση με αποτέλεσμα την εφαρμογή τους στην απεικόνιση του υπεδάφους. Το μειωμένο κόστος που χαρακτηρίζει τις διασκοπήσεις 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.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι εφαρμόζονται σε διάφορα περιβάλλοντα και ανάλογα με το στόχο της έρευνας επιλέγεται η καταλληλότερη μέθοδος ή ο καλύτερος συνδυασμός μεθόδων. Με το συνδυασμό διασκοπήσεων επιτυγχάνεται η λήψη περισσότερων πληροφοριών για το υπό μελέτη γεωλογικό υπέδαφος.

1.2 Ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης άρχισαν να εφαρμόζονται στη μελέτη του υπεδάφους με την αρχή του εικοστού αιώνα. Η συστηματική εφαρμογή άρχισε μετά το 1970 εκμεταλλευόμενη την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών που πρόσφεραν σημαντική βοήθεια τόσο στη συλλογή όσο και στην επεξεργασία των μετρήσεων. Οι ηλεκτρικές μέθοδοι της γεωφυσικής διασκόπησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: Η πρώτη κατηγορία βασίζεται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών φυσικών ηλεκτρικών ρευμάτων ή πεδίων, και περιλαμβάνει τη:

- Μέθοδο του φυσικού δυναμικού
- Μέθοδο των τελλουρικών ρευμάτων

Η δεύτερη κατηγορία βασίζεται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών τα οποία εξαρτώνται από παραγόμενα τεχνητά ηλεκτρικά ρεύματα ή πεδία, και περιλαμβάνει τη:

- Μέθοδο της ειδικής αντίστασης
- Μέθοδο της επαγόμενης πολικότητας
- Μέθοδο των ισοδυναμικών γραμμών

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως στην αναζήτηση μεταλλευμάτων και γεωθερμικών πεδίων, στην Υδρογεωλογία, στη Γεωθερμία, στην Κοιτασματολογία, στην Τεχνική Γεωλογία και στην Αρχαιολογία.

1.3 Εφαρμογές γεωραντάρ

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

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 η χαρακτηριστική συχνότητα των κεραιών είναι της τάξης των 500-2000MHz.

1.4 Σχεδιάγραμμα εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο εντοπισμός εγκοίλων στο «σώμα» του ασβεστολίθου με τις μεθόδους της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ. Στην παρούσα εργασία δίνεται έμφαση στην επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ.

Η εργασία χωρίζεται σε 5 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται γενικές πληροφορίες για τη γεωφυσική τεχνολογία ειδικότερα για τις ηλεκτρικές μεθόδους και για το γεωραντάρ.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η ηλεκτρική τομογραφία όπου παρέχονται πληροφορίες για τη συλλογή και την επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας. Επίσης στο κεφάλαιο εκείνο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των ηλεκτρικών δεδομένων.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στο γεωραντάρ. Συγκεκριμένα αναφέρεται στην αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ, τη γεωμετρία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη για το σχεδιασμό διασκοπήσεων με το γεωραντάρ.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στις μεθόδους επεξεργασίας των δεδομένων του γεωραντάρ. Δηλαδή περιγράφονται τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται στα δεδομένα, όπως για παράδειγμα το φίλτρο διόρθωσης Dewow και το φίλτρο ενίσχυσης AGC, τα μιγαδικά χαρακτηριστικά των δεδομένων και οι διαδικασίες της χωροθέτησης, της αποσυνέλιξης και της ταξινόμησης.

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων της παρούσας εργασίας, η σύγκριση των τελευταίων με αυτά της ηλεκτρικής τομογραφίας και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την συνολική επεξεργασία του πακέτου των δεδομένων του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

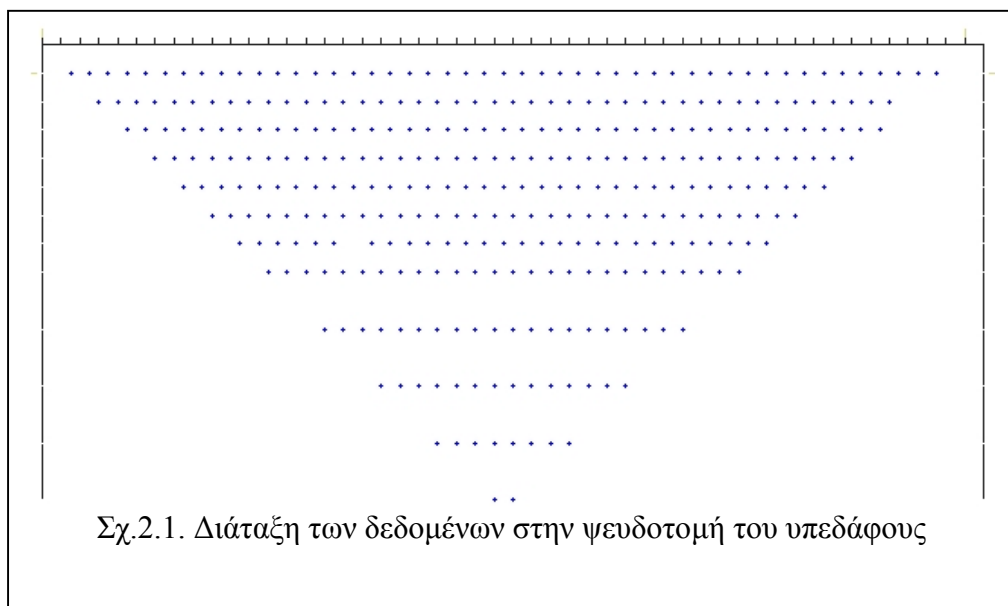
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ**2.1 Εισαγωγή**

Η ηλεκτρική τομογραφία ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και συμβάλλει στη λεπτομερή απεικόνιση του υπεδάφους καθώς είναι μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας. Ο όρος τομογραφία παράγεται από τη λέξη «τομή» και σημαίνει απεικόνιση τομής π.χ. του υπεδάφους. Στην ηλεκτρική τομογραφία απεικονίζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος. Για τον υπολογισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η εύρεση των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι δυνατή με τους αλγόριθμους αντιστροφής. Αν και η αντιστροφή είναι ένα δύσκολο μη γραμμικό πρόβλημα, η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων του Gauss – Newton με εξομάλυνση αποφεύγει τις ασταθείς λύσεις και συγκλίνει γρήγορα, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο.

2.2 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας

Για τη συλλογή των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας, με τη διάταξη διπόλου-διπόλου, τοποθετούνται σε ευθεία γραμμή δυο ζευγάρια ηλεκτροδίων (δίπολα) όπου τα ηλεκτρόδια κάθε διπόλου απέχουν μεταξύ τους ίση απόσταση a . Το ένα ζευγάρι αποτελείται από τα ηλεκτρόδια ρεύματος και το άλλο από τα ηλεκτρόδια δυναμικού. Σε κάθε γραμμή μελέτης τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια που απέχουν απόσταση a μεταξύ τους. Η γραμμή

σαρώνεται πολλές φορές αυξάνοντας διαδοχικά τόσο την απόσταση μεταξύ των διπόλων όσο και αυτή μεταξύ των ηλεκτροδίων του ίδιου δίπολου. Η απόσταση μεταξύ των διπόλων παραμένει σταθερή για μετρήσεις που αντιστοιχούν σε ένα επίπεδο από την επιφάνεια του εδάφους, που ονομάζεται επίπεδο δεδομένων. Η απόσταση που χωρίζει τα δύο δίπολα είναι πάντα ακέραιο πολλαπλάσιο της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων του ίδιου δίπολου. Τα δεδομένα που συλλέγονται αποτελούν την ψευδοτομή του υπεδάφους (σχ.2.1)



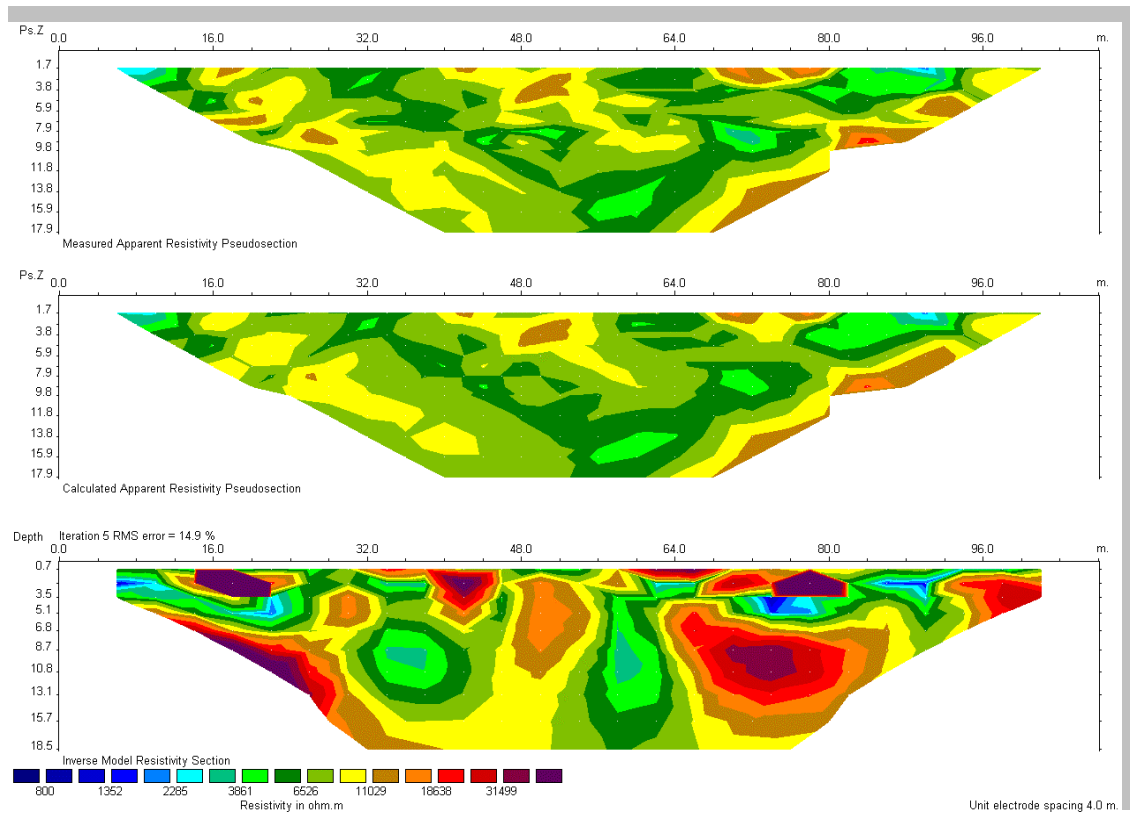
Το επόμενο βήμα είναι η αντιστροφή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που δίνει τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Με τη διαδικασία αυτή υπολογίζεται ένα νέο βελτιωμένο μοντέλο. Η βελτίωση αφορά μόνο τις παραμέτρους του μοντέλου. Η διαδικασία συνεχίζεται υπολογίζοντας για το βελτιωμένο μοντέλο τις φαινόμενες αντιστάσεις, οι οποίες συγκρίνονται με τη σειρά τους με τις μετρήσεις.

2.3 Αποτελέσματα ηλεκτρικής τομογραφίας

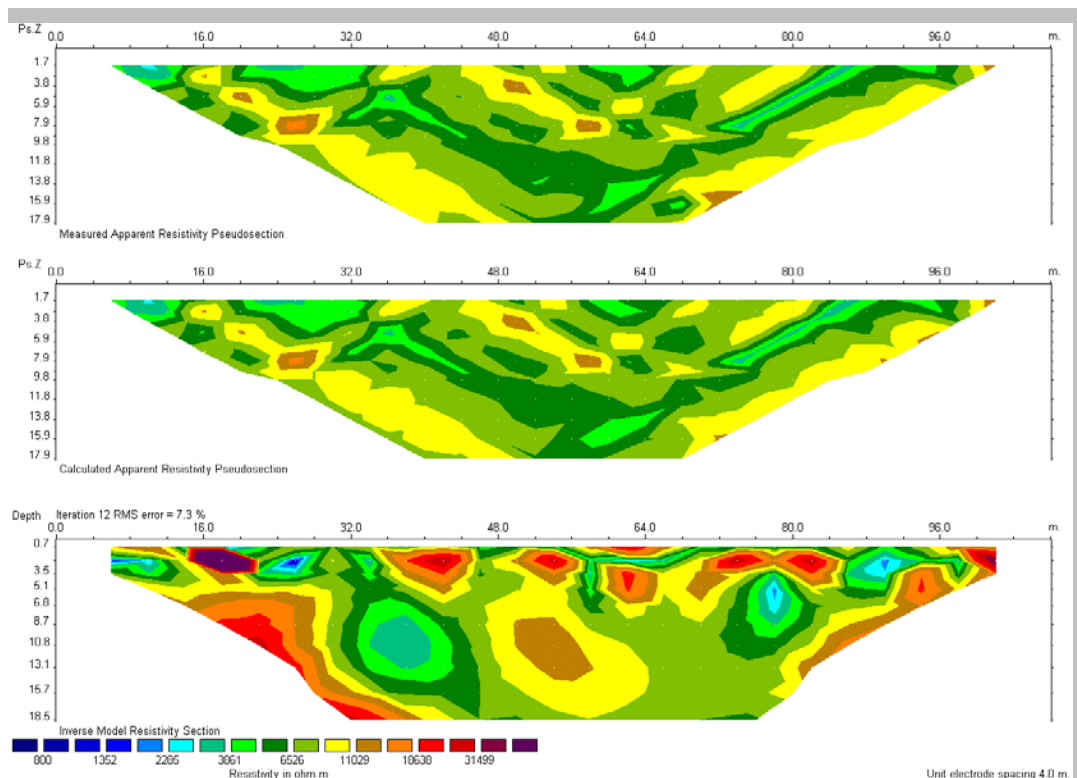
Αφού πραγματοποιηθεί η αντιστροφή των δεδομένων παρουσιάζονται στην οθόνη τρεις τομές οι οποίες αναφέρονται στην ίδια γραμμή. Η πρώτη είναι η ψευδοτομή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, η δεύτερη είναι η ψευδοτομή που αντιστοιχεί στις υπολογισμένες τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης και η τρίτη είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή.

Τα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία προέρχονται από το χώρο εξόρυξης του λατομείου αδρανών στο χωριό Ζωφόροι, στο Ηράκλειο Κρήτης. Οι μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιήθηκαν σε κάναβο διαστάσεων 108m x 24m. Ο κάναβος αποτελείτο από 5 γραμμές μελέτης μήκους 108m (Σχ.5.1.). Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε ήταν η διπόλου – διπόλου με απόσταση ηλεκτροδίων 4m (Χορευτάκη, 2003).

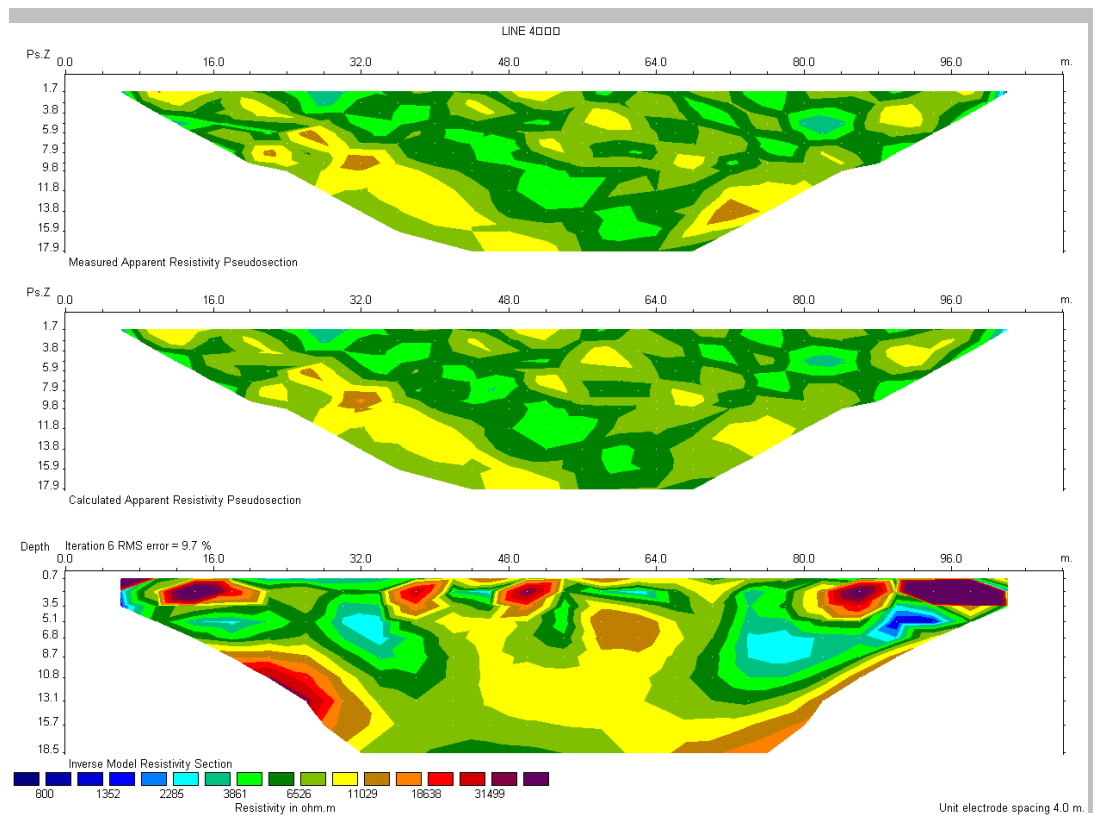
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της 2^{ης}, 3^{ης} και 4^{ης} γραμμής μελέτης του κανάβου διότι σε αυτές τις γραμμές μελέτης πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις του γεωραντάρ. Η χρωματική κλίμακα των αντιστάσεων είναι από 800Ωm έως 32000Ωm τιμές χαρακτηριστικές των ασβεστόλιθων. Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης τόσο περισσότερο αποσαθρωμένος είναι ο ασβεστόλιθος. Επομένως οι περιοχές με αποχρώσεις του μπλε και του πράσινου είναι περιοχές όπου αναμένεται η εμφάνιση εγκοίλων πληρωμένων με άργιλο η οποία μειώνει την ηλεκτρική αντίσταση. Αντιθέτως οι περιοχές με αποχρώσεις του κόκκινου είναι περιοχές με υγιή ασβεστόλιθο. Παρατηρείται ότι το σφάλμα της αντιστροφής είναι περίπου 7-14% πράγμα αποδεχτό λόγω της ανομοιογένειας του υπεδάφους.



Σχ.2.2 Αποτελέσματα αντιστροφής δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της δεύτερης γραμμής μελέτης



Σχ.2.3 Αποτελέσματα αντιστροφής δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της τρίτης γραμμής μελέτης.



Σχ.2.4 Αποτελέσματα αντιστροφής δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της τέταρτης γραμμής μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

3.1 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ

Η μέθοδος του γεωραντάρ εφαρμόζεται στην έρευνα δομών μικρού βάθους και χρησιμοποιεί ραδιοκύματα εύρους συχνοτήτων από 1 έως 1200 MHz. Η λειτουργία του στηρίζεται στην ανάκλαση των ραδιοκυμάτων. Ο πομπός παράγει ηλεκτρομαγνητικό παλμό ο οποίος διαρκεί μερικά νανοδευτερόλεπτα (10^{-9} sec). Ο παλμός αυτός “ταξιδεύει” στο υπό έρευνα υλικό ωσότου συναντήσει επιφάνεια ή υλικό με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Τότε ένα μέρος της ενέργειας του παλμού θα διαδοθεί στο δεύτερο υλικό (διάθλαση), και ένα μέρος θα ανακλαστεί και θα επιστρέψει στον δέκτη. Έτσι η μονάδα ελέγχου καταγράφει το χρόνο διαδρομής του παλμού και το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η διάδοση του κύματος εξαρτάται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υπό μελέτη υλικού καθώς και από τη συχνότητα 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*).

3.2 Διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η μονάδα ελέγχου του γεωραντάρ μετράει το πλάτος του παλμού και το χρόνο που κάνει από τον πομπό στον δέκτη. Ο δέκτης κατοπτρεύει τρία είδη κυμάτων (σχήμα 3.1):

- Ανακλώμενα κύματα: Τα κύματα αυτά εκπέμπονται από τον πομπό, διαδίδονται στο μέσο μέχρι να συναντήσουν κάποιο εμπόδιο όπου ανακλώνται και επιστρέφουν στο δέκτη. Ο χρόνος διαδρομής ισούται με:

$$t_r = \sqrt{(4D^2 + X^2)/u} \quad (3.1)$$

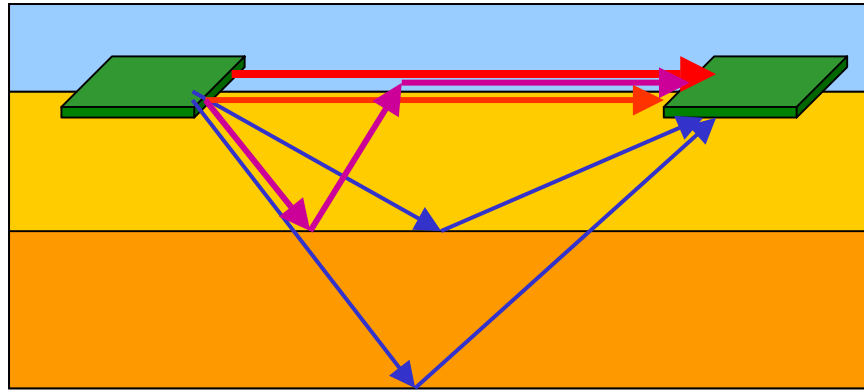
όπου X είναι η απόσταση πομπού-δέκτη και D το βάθος του εμποδίου.

- Απ' ευθείας κύματα: Τα κύματα αυτά διαδίδονται από τον πομπό στο δέκτη χωρίς να ανακλαστούν σε κάποια επιφάνεια και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: απ' ευθείας κύματα αέρα και εδάφους. Τα κύματα αυτά διανύουν μικρές αποστάσεις οπότε οι απώλειες είναι μικρές και τα πλάτη που καταγράφονται μεγάλα. Τα απ' ευθείας κύματα του αέρα φτάνουν πρώτα στο δέκτη επειδή η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα είναι η μέγιστη δυνατή. Αμέσως μετά φτάνουν τα απ' ευθείας κύματα εδάφους. Οι εξισώσεις που δίνουν το χρόνο διαδρομής γι' αυτά τα κύματα είναι αντίστοιχα:

$$t = X / v_{\text{αέρα}} \quad (3.2)$$

$$t = X / v_{\text{εδάφους}} \quad (3.3)$$

- Κρίσιμα διαθλώμενα κύματα. Όταν σε μία διασκόπηση κοινού ενδιαμέσου σημείου ή σταθερού πομπού κινούμενου δέκτη, η απόσταση πομπού δέκτη υπερβεί μια κρίσιμη τιμή X_c τότε το κύμα ανακλάται στη πρώτη επιφάνεια που θα συναντήσει, διαθλάται στην επιφάνεια και διαδίδεται προς τον πομπό μέσω του αέρα.



Σχήμα 3.1. Η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων περιγράφεται από ακτίνες

3.3 Εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Οι καταγραφές του γεωραντάρ επηρεάζονται από την εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, η οποία καθορίζει το βάθος της διασκόπησης. Η εξασθένιση εξαρτάται από τους εξής τρεις παράγοντες:

- Τις ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών
- Την πορεία διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων
- Την συχνότητα εκπομπής

Οι κυριότερες από τις ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών που επηρεάζουν την εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι:

- η ηλεκτρική αγωγιμότητα,
- η μαγνητική διαπερατότητα,
- η μαγνητική υστέρηση,
- το πορώδες και
- η συγκέντρωση ιόντων αλάτων στα ρευστά.

Από τις ιδιότητες αυτές η πιο σημαντική είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα, όσο πιο αγωγίμο είναι το μέσο διάδοσης τόσο πιο μεγάλη είναι η εξασθένιση. Στα διηλεκτρικά υλικά τα οποία

έχουν μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση η εξασθένιση είναι μικρότερη. Την εξασθένιση επίσης ευνοούν το πορώδες και τα περιεχόμενα στους πόρους ρευστά.

Όσον αφορά την πορεία διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων παρατηρούνται απώλειες σε ενέργεια ανάλογες της απόστασης που έχει διατρέξει το κύμα, των διεπιφανειών που συναντάει και της επιφάνειας του μετώπου του κύματος η οποία συνεχώς διευρύνεται. Όλοι αυτοί οι παράγοντες συντελούν στην διασπορά της ενέργειας και κατά επέκταση στην εξασθένισή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τέλος ο βαθμός εξασθένισης αυξάνεται στις υψηλές συχνότητες εκπομπής και μειώνεται στις χαμηλές. Τα αποτελέσματα της εξασθένισης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι τα εξής:

- Η μείωση του πλάτους.
- Η μετατόπιση της κεντρικής συχνότητας
- Μικρότερο βάθος διασκόπησης.

3.4 Σχεδιασμός διασκόπησης

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

1. Αξιολόγηση του πεδίου της έρευνας
2. Επιλογή της μεθόδου διασκόπησης
3. Προσδιορισμός των παραμέτρων της διασκόπησης

3.4.1 Αξιολόγηση του πεδίου της έρευνας

Σε αυτό το στάδιο ο ερευνητής καλείται να απαντήσει σε μία καθοριστική ερώτηση: είναι το γεωραντάρ το κατάλληλο όργανο για να πραγματοποιηθεί η διασκόπηση; Για να απαντηθεί αυτή η ερώτηση πρέπει να μελετηθούν τα παρακάτω σημεία:

- α) Το βάθος και το μέγεθος του στόχου
- β) Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου και του μέσου διάδοσης
- γ) Το περιβάλλον της διασκόπησης

α) Βάθος και μέγεθος του στόχου

Το βάθος του στόχου και το μέγεθός του μελετώνται σε συνδυασμό με το βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τη διακριτική ικανότητα (Bernabini 1995, Jol 1995, Hamran 1995). Το πρόβλημα που τίθεται είναι ότι το βάθος διείσδυσης επιδρά σε βάρος της διακριτικής ικανότητας. Έτσι ο ερευνητής πρέπει να σκεφτεί: έχει νόημα να φτάσει σε μεγάλα βάθη χωρίς όμως να ανιχνεύσει το στόχο; Ή έχει νόημα να πετύχει υψηλή διακριτική ικανότητα χωρίς όμως το σήμα να φτάσει μέχρι το στόχο; Άρα ανάλογα με την περίπτωση πρέπει να γίνουν κάποιες παραχωρήσεις.

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 ενώ η τρίτη την διακριτική ικανότητα:

$$z_{\max} = 35/\sigma \quad (3.4)$$

$$z_{\max} = 30/\alpha \quad (3.5)$$

$$\Delta R = \lambda/4 \quad (3.6)$$

Όπου σ είναι η αγωγιμότητα του μέσου διάδοσης (mS/m), α η εξασθένιση που προκαλεί το μέσον διάδοσης στον ηλεκτρομαγνητικό παλμό και λ είναι το μήκος κύματος του παλμού.

β) Ηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου και του μέσου διάδοσης.

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου και του μέσου διάδοσης που ενδιαφέρουν την τεχνική του γεωραντάρ είναι η διηλεκτρική σταθερά και η αγωγιμότητα (ϵ_r , σ). Η γνώση τους επιτρέπει στο χρήστη να διαπιστώσει εάν η αντίθεσή τους είναι τέτοια ώστε να υπάρξει ισχυρή ανάκλαση. Μέτρο της ενέργειας που ανακλάται από το στόχο είναι ο συντελεστής ανακλώμενης ενέργειας P_r ο οποίος δίδεται από τη σχέση:

$$P_r = [(\epsilon_{r1}^{1/2} - \epsilon_{r2}^{1/2}) / (\epsilon_{r1}^{1/2} + \epsilon_{r2}^{1/2})]^2 \quad (3.7)$$

όπου ϵ_{r1} και ϵ_{r2} είναι η διηλεκτρική σταθερά του μέσου διάδοσης και του στόχου αντίστοιχα.

γ) Περιβάλλον της διασκόπησης

Το περιβάλλον είναι καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχία της διασκόπησης. Περιοχές που βρίσκονται κοντά σε πηγές ραδιοκυμάτων (αναμεταδότες τηλεόρασης, ηλεκτροφόρα καλώδια, κεραίες κινητής τηλεφωνίας, ραντάρ κλπ) είναι ακατάλληλες διότι ο ευαίσθητος δέκτης του γεωραντάρ κατοπτρεύει τόσο τα ανακλώμενα από το στόχο κύματα όσο και τα ισχυρότερα ηλεκτρομαγνητικά κύματα από τη γύρω περιοχή.

Περιοχές με εκτεταμένες μεταλλικές κατασκευές είναι επίσης ακατάλληλες για τη διασκόπηση με τη μέθοδο του γεωραντάρ. Οι ισχυρότατες ανακλάσεις που προέρχονται από τις κατασκευές αυτές υποβαθμίζουν την ποιότητα των μετρήσεων.

Τέλος οι κλιματικές συνθήκες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη επιτυχή έκβαση της διασκόπησης. Περιβάλλον υπό βρόχινες συνθήκες και υψηλή υγρασία θεωρείται ακατάλληλο αφού οι ηλεκτρικές ιδιότητες του αέρα βελτιώνονται, με συνέπεια μέρος του μεταδιδόμενου παλμού να διαχέεται σ' αυτόν. Έχει παρατηρηθεί ότι οι μετρήσεις υπό αυτές τις συνθήκες διαφοροποιούνται σε σχέση με τις μετρήσεις υπό ξηρές συνθήκες.

3.4.2 Μέθοδοι διασκόπησης

Ανάλογα πάντα με το σκοπό της διασκόπησης το γεωραντάρ χρησιμοποιείται με διάφορους τρόπους. Οι τέσσερις πιο συνηθισμένοι τρόποι είναι:

- Μέθοδος της ανάκλασης (Reflection). Χρησιμοποιείται για τη γεωλογική χαρτογράφηση και είναι η πιο διαδεδομένη. Οι κεραίες διατηρούνται σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους και κινούνται κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Πολλές φορές πραγματοποιούνται μετρήσεις πάνω στην ίδια γραμμή μελέτης αλλά με διαφορετικό προσανατολισμό των κεραιών ώστε να εξαχθούν το δυνατό περισσότερες πληροφορίες.
- Μέθοδος του κοινού ενδιάμεσου σημείου (Common Mid Point). Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο μέσο. Αρχικά προσδιορίζεται κάποιο σημείο του ανακλαστήρα που θα αποτελέσει το ενδιάμεσο σημείο και οι κεραίες τοποθετούνται στην ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση (ίση με το βήμα δειγματοληψίας Nyquist n_x). Κάθε κεραία απομακρύνεται κατά μήκος της γραμμής μελέτης κατά $n_x/2$. Η μέγιστη απόσταση δεν πρέπει να ξεπεράσει το βάθος του ανακλαστήρα.

- Μέθοδος σταθερού πομπού, κινούμενου δέκτη (Wide angle reflection and refraction). Και αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης στο μέσο. Η διαφορά της από την προηγούμενη έγκειται στο ότι ο πομπός παραμένει σταθερός σε κάποιο σημείο, ενώ ο δέκτης κινείται πάνω στη γραμμή μελέτης με σταθερό βήμα .
- Μέθοδος της τομογραφίας (Transillumination). Σε αυτή τη μέθοδο τα κύματα δεν ανακλώνται αλλά διέρχονται από το μέσο. Οι κεραίες τοποθετούνται εκατέρωθεν του υπό μελέτη υλικού αντικρίζοντας η μία την άλλη.

3.4.3 Παράμετροι της διασκόπησης

Πριν ξεκινήσει η διασκόπηση ο χρήστης καλείται να ρυθμίσει, μέσω του λογισμικού του γεωραντάρ, όλες εκείνες τις παραμέτρους που διέπουν το πρόβλημα. Αυτές οι παράμετροι είναι καθοριστικές για την επιτυχή έκβαση του πειράματος και αφορούν: τη συχνότητα εκπομπής, τον ολικό χρόνο καταγραφής, το διάστημα δειγματοληψίας, το βήμα διασκόπησης, την απόσταση των κεραιών, την υπέρθεση και τον προσανατολισμό των κεραιών.

α) Συχνότητα εκπομπής

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους το βάθος διείσδυσης συνδέεται άμεσα με τη διακριτική ικανότητα και τη συχνότητα. Έτσι αν ο χρήστης επιλέξει μεγάλη συχνότητα η διακριτική ικανότητα θα είναι μεγάλη, ενώ το βάθος διείσδυσης μικρό. Το αντίθετο θα συμβεί επιλέγοντας μικρή συχνότητα εκπομπής.

Ένας εύκολος τρόπος προσέγγισης του προβλήματος αποτελεί η σχέση που συνδέει τη συχνότητα f (MHz) και τη διακριτική ικανότητα x (m):

$$f = 150/x(\epsilon_r)^{1/2} \quad (3.8)$$

β) Ολικός χρόνος καταγραφής

Ο ολικός χρόνος καταγραφής σχετίζεται άμεσα με το βάθος διείσδυσης. Ο υπολογισμός του στηρίζεται στην εξίσωση:

$$W = 2.6d_{\max}/v \quad (3.9)$$

όπου W είναι ο ολικός χρόνος καταγραφής, $d_{\max}$ το μέγιστο βάθος και v η ταχύτητα του παλμού στο μέσο διάδοσης. Η παραπάνω εξίσωση αυξάνει το χρόνο καταγραφής κατά 30% ώστε να προβλέψει τα σφάλματα από τους υπολογισμούς.

Αν ο ολικός χρόνος καταγραφής είναι πολύ μικρός ο στόχος ίσως να μην καταγραφεί. Αντίθετα αν είναι πολύ μεγάλος ο συνολικός όγκος των δεδομένων αυξάνει με δυσμενείς συνέπειες στην παραγωγικότητα.

γ) Διάστημα δειγματοληψίας

Η καταγραφή των δεδομένων δεν είναι συνεχής διαδικασία. Έτσι ο χρήστης καλείται να ρυθμίσει το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο καταγραφών. Αν το χρονικό διάστημα είναι μεγάλο τότε πολλές πληροφορίες χάνονται. Αν είναι πολύ μικρό τότε οι πληροφορίες είναι μεν πολλές αλλά ο συνολικός όγκος των δεδομένων υπερβολικά μεγάλος.

Ο υπολογισμός του διαστήματος δειγματοληψίας γίνεται βάση της συχνότητας Nyquist f_N , η οποία ορίζεται ως η ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας για να είναι το δείγμα αντιπροσωπευτικό, και η οποία είναι το πολύ ίση με το μισό της περιόδου της υψηλότερης συχνότητας που εκπέμπεται. Το φάσμα εκπομπής του γεωραντάρ κυμαίνεται από $0.5f$ έως

$1.5f$ όπου f η κεντρική συχνότητα εκπομπής. Αν ληφθεί υπ' όψη ένας συντελεστής ασφάλειας ίσος με 2, τότε προκύπτουν οι σχέσεις:

$$f_N = 1/2\Delta t \rightarrow 1.5f = 1/2\Delta t \rightarrow \text{συντ. Ασφάλειας} = 2 \rightarrow f = 1/6\Delta t \quad (3.10)$$

όπου Δt το διάστημα δειγματοληψίας και f η κεντρική συχνότητα σε Hz.

Πολλές φορές αν το ζητούμενο είναι η ταχύτητα λήψης των δεδομένων και όχι η μεγάλη πιστότητα των δεδομένων, το Δt αυξάνεται ελαφρώς.

δ) Βήμα διασκόπησης

Το βήμα δειγματοληψίας ορίζει την απόσταση δυο διαδοχικών σταθμών πάνω στη γραμμή μελέτης όπου πραγματοποιούνται μετρήσεις. Ένα μεγάλο βήμα δειγματοληψίας δε δίνει επαρκή αποτελέσματα και ειδικότερα, αν σκοπός της μελέτης είναι ο εντοπισμός μικρών στόχων, με μεγάλο βήμα δειγματοληψίας οι στόχοι δεν εντοπίζονται. Αντίθετα αν το βήμα είναι υπερβολικά μικρό, ο μεγάλος όγκος των δεδομένων επιβαρύνει την παραγωγικότητα. Έτσι προτείνεται το βήμα δειγματοληψίας Nyquist n_x το οποίο ισούται με:

$$n_x = \lambda/4 = 75/(\epsilon_r)^{1/2} f \quad (3.11)$$

ε) Απόσταση των κεραιών

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα εδάφια τα συστήματα γεωραντάρ δίνουν στο χρήστη τη δυνατότητα να μεταβάλει κατά το δοκούν την απόσταση των κεραιών ώστε να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος. Αύξηση της απόστασης των κεραιών συνεπάγεται αύξηση στη γωνία ανάκλασης και το συντελεστή ανάκλασης. Συνεπάγεται όμως και αύξηση της εξασθένισης του κύματος αφού αυτό έχει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση. Έτσι φαίνεται ότι πρέπει να βρεθεί η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των κεραιών. Αυτή δίδεται από τη σχέση:

$$S = 2d_{\text{στόχου}} / (\epsilon_r - 1)^{1/2} \quad (3.12)$$

στ) Κατακόρυφη υπέρθεση

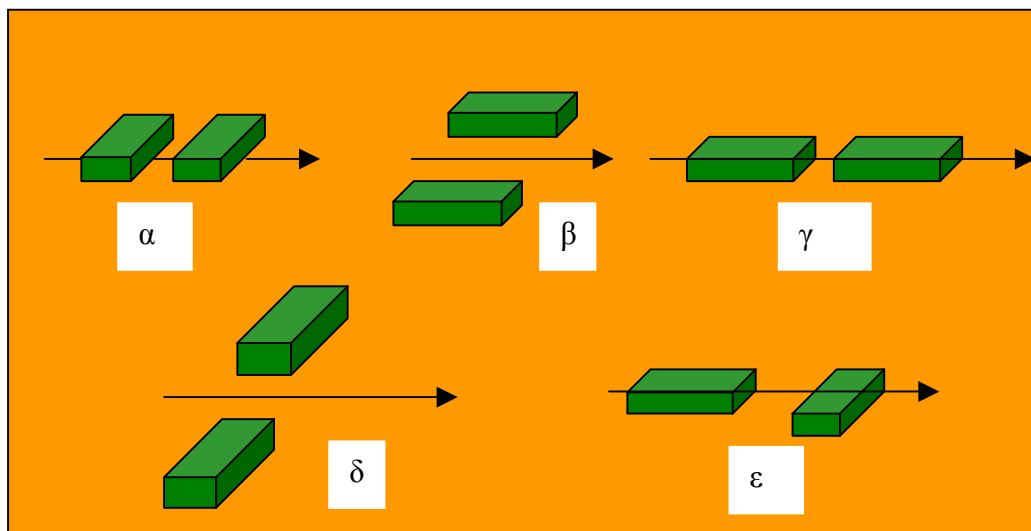
Η υπέρθεση είναι η διαδικασία κατά την οποία πραγματοποιούνται αυτόματα πολλαπλές μετρήσεις σε κάθε σταθμό της γραμμής μελέτης. Τα πλάτη των πολλαπλών καταγραφών αθροίζονται και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η βελτίωση των μετρήσεων αφού τα πλάτη ενισχύονται, ενώ ο θόρυβος εξαλείφεται.

Η διαδικασία της υπέρθεσης βελτιώνει την ποιότητα των δεδομένων, ταυτόχρονα όμως αυξάνει σημαντικά το χρόνο της διασκόπησης. Ο αριθμός των επαναλήψεων κυμαίνεται από 1 έως 2048, αλλά οι τιμές 16, 32, 64 δίνουν ικανοποιητικό αποτέλεσμα χωρίς να επιβαρύνεται σημαντικά ο συνολικός χρόνος της διαδικασίας.

ζ) Προσανατολισμός κεραιών

Η παράμετρος που μελετάται τελευταία είναι ο προσανατολισμός των κεραιών, σε σχέση με τη γραμμή μελέτης (σχήμα 3.2). Οι κεραίες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα γεωραντάρ είναι ωμικές, διπολικές και ο προσανατολισμός τους καθίσταται σημαντικός για την επιτυχή έκβαση των πειραμάτων. Οι πιο συνηθισμένοι προσανατολισμοί είναι όταν το ηλεκτρικό πεδίο πολώνεται κάθετα στο επίπεδο διάδοσης του κύματος (σχήμα 3.2α και 3.2β) και βρίσκουν εφαρμογή στη γεωλογική χαρτογράφηση. Συνήθως πραγματοποιούνται μετρήσεις και με τους δυο προσανατολισμούς ώστε να συλλεχθούν το δυνατό περισσότερες πληροφορίες.

Ο προσανατολισμός του σχήματος 3.2ε χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό σκεδαστών όπως σωλήνες (ανεξάρτητα από τη σχετική θέση κεραιών και σκεδαστή) ενώ θεωρείται ακατάλληλος για τη χαρτογράφηση γεωλογικών στρωμάτων.



Σχήμα 3.2. Δυνατοί προσανατολισμοί κεραιών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ**4.1 Εισαγωγή**

Η τομή του γεωραντάρ προκύπτει από την καταγραφή του ανακλώμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο υπέδαφος. Προκειμένου να εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα για την κατανόηση της απαιτείται η ψηφιακή ανάλυση της. Σκοπός της ψηφιακής ανάλυσης εικόνας είναι να τονίσει κάποια χαρακτηριστικά που δε γίνονται άμεσα αντιληπτά.

Το πρώτο στάδιο στην ψηφιακή ανάλυση εικόνας περιλαμβάνει:

- Αρχικά την εφαρμογή φίλτρων με τα οποία επιτυγχάνεται ο τονισμός των οριζόντιων και των κεκλιμένων ανακλαστήρων, η απομάκρυνση των κυμάτων περίθλασης και του θορύβου και γενικότερα η βελτίωση της ποιότητας της εικόνας.
- Στη συνέχεια τη χρήση μετασχηματισμών. Αυτός ο τρόπος παρουσίασης δεδομένων έχει σαν αποτέλεσμα την εξαγωγή συμπερασμάτων που διαφορετικά δεν θα ήταν αντιληπτά.

Οι δύο κυριότεροι μετασχηματισμοί είναι:

1. Ο μετασχηματισμός Fourier ο οποίος επιτρέπει τη μελέτη ιδιοτήτων ενός ίχνους (ή χρονοσειράς) αλλά δεν επιτρέπει τη μελέτη των τοπικών διακυμάνσεων.
2. Η ανάλυση δεδομένων σαν αναλυτικά σήματα ή διαφορετικά η μιγαδική ανάλυση ιχνών (complex trace analysis), εξασφαλίζει την τοπική πληροφορία (Σπανουδάκης, 2002).

4.2 Παράθυρα ή μάσκες

Τα φίλτρα (μάσκες) ανάλογα με την εφαρμογή τους διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Φίλτρα διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων. Το φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων διαχωρίζει τη συνιστώσα που αντιστοιχεί σε αργά μεταβαλλόμενο σήμα από τις υπόλοιπες. Το φίλτρο αυτό της εξομάλυνσης της εικόνας χρησιμοποιείται για ελάττωση του θορύβου.
- Φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων. Η ταχέως μεταβαλλόμενη λεπτομέρεια της εικόνας αντιστοιχεί σε υψηλή συχνότητα. Το φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων διαχωρίζει τη συνιστώσα αυτή από τις υπόλοιπες. Η πληροφορία υψηλής συχνότητας επιτρέπει την απομόνωση και την ενίσχυση της τοπικής λεπτομέρειας. Τα φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων βασίζονται στην ιδέα της παραγώγου. Η πρώτη παράγωγος μπορεί να μας δώσει τη δυνατότητα να αναγνωρίσουμε τμήματα εικόνας υψηλών συχνοτήτων, όπως για παράδειγμα τις ακμές (ασυνέχειες) ή τις γραμμώσεις της (Μερτίκας, 1999).

Περισσότερες πληροφορίες πάνω στη θεωρία τους μπορεί κανείς να βρει στη μεταπτυχιακή εργασία του Ν. Σπανουδάκη, (2002), του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

4.2.1 Μονοδιάστατα φίλτρα

Τα μονοδιάστατα φίλτρα είναι σχεδιασμένα ώστε να ενεργούν είτε σε χρονοσειρές, λαμβάνοντας υπόψη εικονοστοιχεία που ανήκουν στο ίδιο ίχνος, είτε σε στιγμιότυπα κύματος λαμβάνοντας υπόψη εικονοστοιχεία τα οποία ανήκουν σε διαφορετικά ίχνη, αλλά αντιστοιχούν

στον ίδιο χρόνο. Παρακάτω αναφέρονται μερικά από τα πιο συχνά σε χρήση μονοδιάστατα φίλτρα

α) Φίλτρο διόρθωσης Dcshift: Το φίλτρο αυτό ουσιαστικά συμβάλλει στην απομάκρυνση των χαμηλών συχνοτήτων από τα δεδομένα. Ο αλγόριθμος αρχικά υπολογίζει τη μέση τιμή κάθε ίχνους ξεχωριστά και έπειτα την αφαιρεί από όλα τα σημεία του. Έχει καλά αποτελέσματα όταν χρησιμοποιούνται κεραίες υψηλών συχνοτήτων (Σπανουδάκης, 2002).

β) Φίλτρο διόρθωσης Dewow: Πρόκειται για ένα φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων κάθε ίχνους ξεχωριστά.

γ) Φίλτρο κινητού μέσου όρου: Το φίλτρο κινητού μέσου όρου απομακρύνει τον τυχαίο θόρυβο και τις υψηλές συχνότητες από την καταγραφή.

δ) Φίλτρο μέσου ίχνους: Το φίλτρο μέσου ίχνους επενεργεί όπως και το φίλτρο κινητού μέσου όρου με τη διαφορά ότι χρησιμοποιεί δεδομένα που ανήκουν σε διαφορετικά ίχνη. Σκοπός του φίλτρου αυτού είναι να τονίσει οριζόντιους και μικρής κλίσης ανακλαστήρες. Παράλληλα μειώνει το θόρυβο και αποσβένει το αποτέλεσμα των κυμάτων περίθλασης.

ε) Φίλτρο διαφοράς ιχνών: Το φίλτρο διαφοράς ιχνών χρησιμοποιείται για να αναδείξει μικρούς στόχους οι οποίοι προκαλούν το φαινόμενο της περίθλασης και οι οποίοι εμφανίζονται στις εικόνες σαν υπερβολές με τα κοίλα προς τα κάτω. Παράλληλα καταστρέφει τις πληροφορίες σχετικά με οριζόντιους ή μικρής κλίσης ανακλαστήρες.

στ) Φίλτρο ισοστάθμισης ιχνών: Με το φίλτρο ισοστάθμισης ιχνών επιτυγχάνεται εξισορρόπηση των πλατών των κυμάτων. Εφαρμόζεται όταν τα πλάτη μεμονωμένων ιχνών είναι σημαντικά μικρότερα των υπολοίπων.

ζ) Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου: Πολλές φορές λόγω του φαινομένου της αντήχησης των κεραιών (antenna ringing), εμφανίζονται στα δεδομένα σήματα που μοιάζουν με οριζόντιους ανακλαστήρες. Τέτοιοι οριζόντιοι ανακλαστήρες εμφανίζονται και λόγω της αλληλεπίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με το περιβάλλον. Για παράδειγμα οι χρήστες του γεωραντάρ, τα ηλεκτροφόρα καλώδια, κεραίες και δέκτες κινητής τηλεφωνίας, καθώς και οι μεταλλικές κατασκευές αποτελούν σημαντικές επιδράσεις στο σήμα που καταγράφεται. Το φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου εφαρμόζεται για να εξαλειφθούν τα παραπάνω φαινόμενα.

η) Φίλτρο σταθμισμένου μέσου ίχνους: Το φίλτρο χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της συνέχειας οριζόντιων ανακλαστήρων.

θ) Φίλτρο ενδιάμεσου όρου: Το φίλτρο του ενδιάμεσου μέσου όρου (median mix) μοιάζει με αυτό του σταθμισμένου μέσου ίχνους. Η διαφορά έγκειται στο ότι τα δεδομένα ταξινομούνται και επιλέγεται η τιμή του ενδιάμεσου σημείου από την ταξινόμηση.

4.2.2 Δυσδιάστατα φίλτρα

Τα δυσδιάστατα φίλτρα είναι σχεδιασμένα ώστε κατά την εφαρμογή τους να λαμβάνουν υπόψη μια ομάδα εικονοστοιχείων που ανήκουν σε γειτονικά ίχνη και γειτονικούς χρόνους. Τα φίλτρα αυτά χρησιμοποιούνται τόσο σε τομές γεωραντάρ όσο και σε οριζόντιες τομές (χάρτες). Παρακάτω αναφέρονται μερικά γνωστά δισδιάστατα φίλτρα.

α) Φίλτρο μέσης τιμής: Το φίλτρο αυτό υπολογίζει τη μέση τιμή μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων και αντικαθιστά το κεντρικό εικονοστοιχείο με τη μέση τιμή. Χρησιμοποιείται σε φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων.

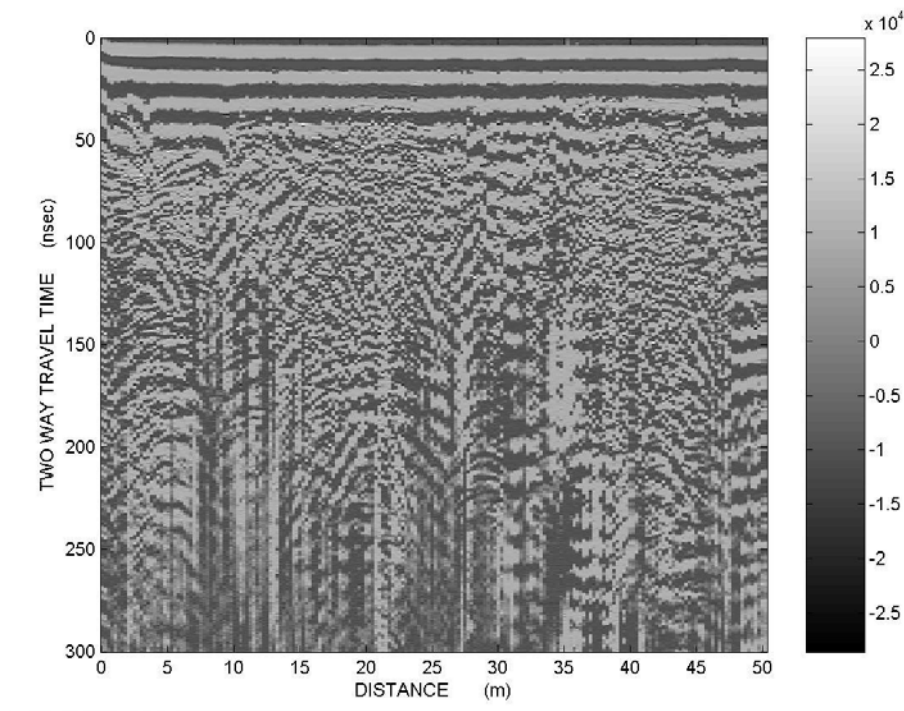
β) Φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων

4.3 Ενίσχυση των δεδομένων

Η ενίσχυση εφαρμόζεται στα δεδομένα για την καλύτερη παρουσίαση ισχυρών και ασθενικών ανακλάσεων, που λόγω της απορρόφησης των κυμάτων δεν διακρίνονται καθαρά στα αρχικά δεδομένα. Τα πιο διαδεδομένα φίλτρα ενίσχυσης είναι το AGC και το φίλτρο σταθερής ενίσχυσης.

4.3.1 Αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης (AGC)

Ο αλγόριθμος αυτός έχει σκοπό να ενισχύσει τα ασθενή σήματα που προκύπτουν κατά την εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών και σεισμικών κυμάτων στο υπέδαφος. Ουσιαστικά επιτυγχάνει την ισοστάθμιση του σήματος. Ο αλγόριθμος αρχικά υπολογίζει τη μέση τιμή γύρω από το κεντρικό σημείο του ίχνους. Έπειτα πολλαπλασιάζει τα αρχικά δεδομένα με τον αντίστροφο της μέσης τιμής. Έτσι τα ισχυρά πλάτη ενισχύονται λίγο ή και καθόλου, ενώ στα ασθενή πλάτη εφαρμόζεται μεγάλη ενίσχυση. Στο σχήμα 4.4 φαίνονται τα δεδομένα τα οποία έχουν υποστεί ενίσχυση AGC με τη χρήση τελεστή διάρκειας 3nsec. Διακρίνονται καλύτερα όλοι οι ανακλαστήρες στους μεγάλους χρόνους.



Σχήμα 4.1 Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου αυτόματου ελέγχου ενίσχυσης στα αρχικά δεδομένα με χρήση τελεστή διάρκειας 3nsec.

4.3.2 Σταθερή ενίσχυση

Είναι ο πιο απλός τύπος ενίσχυσης αφού όλα τα δεδομένα πολλαπλασιάζονται με μία σταθερά. Με αυτό τον τρόπο δε βελτιώνεται ουσιαστικά η εικόνα αφού η αναλογία μεταξύ μεγάλων και μικρών τιμών στα δεδομένα παραμένει σταθερή.

4.4 Χωροθέτηση

4.4.1 Εισαγωγικά

Η χωροθέτηση αναφέρεται σε μια διαδικασία όπου με δεδομένο το μοντέλο της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων γίνεται προσπάθεια επανατοποθέτησης στο χώρο του ανακλαστήρα και προσαρμογής των πλατών των ανακλώμενων κυμάτων ώστε η προκύπτουσα τομή του γεωραντάρ να απεικονίζει ακριβέστερα το υπέδαφος σε περιοχές ενδιαφέροντος. Πριν τη χωροθέτηση τα δεδομένα συνήθως παρουσιάζονται σαν ίχνη των οποίων ο χρόνος καταγραφής εμφανίζεται στον κάθετο άξονα. Οι κεκλιμένοι ανακλαστήρες είναι συστηματικά λανθασμένα τοποθετημένοι στην τομή του γεωραντάρ. Η ανάγκη εύρεσης προσεγγιστικής λύσης πρακτικά εφαρμόσιμης οδήγησε σε μεγάλο αριθμό αλγορίθμων χωροθέτησης που γενικά ξεχωρίζουν από την πολυπλοκότητα του μοντέλου ταχύτητας που μπορούν να διαχειριστούν. Όσον αφορά το τελικό αποτέλεσμα της χωροθέτησης υπάρχουν δυο κατηγορίες αλγορίθμων από τους οποίους προκύπτουν χωροθετημένες τομές βάθους και χρόνου αντίστοιχα (Margrave, 2001). Οι αλγόριθμοι χωροθέτησης που εφαρμόζονται στο χώρο οριζόντιας απόστασης – χρόνου είναι χρονοβόροι και χρησιμοποιείται μόνο όταν το μοντέλο της ταχύτητας στο υπέδαφος είναι πολύπλοκο.

4.4.2 Χωροθέτηση κυματαριθμού –συχνότητας (f - k)

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι χωροθέτησης, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος η οποία εφαρμόζεται στο χώρο κυματαριθμού - συχνότητας. Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας παρέχουν χωροθέτηση υψηλής ακρίβειας. Υπάρχουν δυο θεμελιώδεις προσεγγίσεις και πολλές διαφοροποιήσεις σε κάθε μια: α) η χωροθέτηση f – k η οποία προϋποθέτει ότι η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων παραμένει σταθερή στο υπέδαφος. Είναι η ταχύτερη γνωστή τεχνική χωροθέτησης και β) χωροθέτηση η οποία επιτρέπει την μεταβολή της ταχύτητας με το βάθος. Περιλαμβάνει μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία που χρησιμοποιεί τη μέθοδο της προς τα κάτω συνέχειας του κυματικού πεδίου.

Το πρόβλημα της χωροθέτησης μπορεί να λυθεί με την εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier στο βαθμωτό κυματικό πεδίο $\psi(x, z, t)$ που επαληθεύει τη διαφορική κυματική εξίσωση (Margrave, 2001):

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{\hat{u}^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (4.1)$$

όπου $\hat{u}$ είναι η σταθερή ταχύτητα. Είναι επιθυμητό να υπολογιστεί το $\psi(x, z, t = 0)$ δεδομένου του $\psi(x, z = 0, t)$. Το κυματικό πεδίο μπορεί να εκφραστεί στο χώρο του (k_x, f) από τη συνάρτηση $\phi(k_x, z, f)$ για την οποία ισχύει:

$$\psi(x, z, t) = \int_{V_\infty} \phi(k_x, z, f) e^{2\pi i(k_x x - ft)} dk_x df \quad (4.2)$$

Αν η εξίσωση (4.2) αντικατασταθεί στην (4.1) και γίνει χρήση των ιδιοτήτων του μετασχηματισμού Fourier, για διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε δυο διαστάσεις προκύπτει:

$$\int_{V_\infty} \left\{ \frac{\partial^2 \phi(z)}{\partial z^2} + 4\pi^2 \left[\frac{f^2}{\hat{u}^2} - k_x^2 \right] \phi(z) \right\} e^{2\pi i(k_x x - ft)} dk_x df = 0 \quad (4.3)$$

όπου τα (k_x, f) στη συνάρτηση $\phi(z)$ έχουν παραληφθεί.

Η δεύτερη μερική παράγωγος στην εξίσωση (4.3) δεν απαιτεί την ταχύτητα $\hat{u}$ σταθερή. Όμως το επόμενο βήμα το απαιτεί. Αν η ταχύτητα $\hat{u}$ είναι σταθερή, τότε το αριστερό μέρος της εξίσωσης (4.3) εκφράζει τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier του όρου που βρίσκεται στα άγκιστρα.

$$\frac{\partial^2 \phi(z)}{\partial z^2} + 4\pi^2 k_z^2 \phi(z) = 0 \quad (4.4)$$

όπου ο κυματαριθμός k_z καθορίζεται από:

$$k_z^2 = \frac{f^2}{\hat{u}^2} - k_x^2 \quad (4.5)$$

Οι εξισώσεις (4.4) και (4.5) περιγράφουν την κυματική εξίσωση στο χώρο (k_x, f) . Η καταγραφή στο χώρο αυτό δίνεται από τη συνάρτηση $\phi(k_x, z=0, f)$ που είναι ο μετασχηματισμός Fourier της $\psi(x, z=0, t)$. Η εξίσωση (4.4) είναι συνήθης διαφορική εξίσωση της οποίας η λύση είναι της μορφής $e^{\pm 2\pi i k_z z}$. Τότε, η γενική λύση μπορεί να γραφτεί ως:

$$\phi(k_x, z, f) = A(k_x, f)e^{2\pi i k_z z} + B(k_x, f)e^{-2\pi i k_z z} \quad (4.6)$$

όπου $A(k_x, f)$ και $B(k_x, f)$ είναι συναρτήσεις που καθορίζονται από τις οριακές συνθήκες:

$$\phi(z=0) \equiv \phi_0 = A + B \quad (4.7)$$

και:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z}(z=0) \equiv \phi_{z0} = 2\pi i k_z A - 2\pi i k_z B \quad (4.8)$$

Για κύματα μιας διαδρομής (one-way waves) προς το εσωτερικό της γης ισχύει:

$$A(k_x, f) = 0 \text{ και } B(k_x, f) = \phi_0 \equiv \phi(k_x, z=0, f) \quad (4.9)$$

Τότε, το κυματικό πεδίο μπορεί να εκφραστεί από τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier :

$$\psi(x, z, t) = \int_{V_\infty} \phi_0(k_x, f) e^{2\pi i (k_x x - k_z z - ft)} dk_x df \quad (4.10)$$

Η χωροθέτηση περιγράφεται από τη σχέση:

$$\psi(x, z, t = 0) = \int_{V_\infty} \phi_0(k_x, f) e^{2\pi i(k_x x - k_z z)} dk_x df \quad (4.11)$$

Η εξίσωση (4.11) δίνει την χωροθετημένη τομή βάθους από το $\phi_0(k_x, f)$ στο f και το k_x .

4.5 Αποσυνέλιξη πρόβλεψης

Η αποσυνέλιξη είναι μια διαδικασία που βελτιώνει τη χρονική (temporal) ανάλυση των σεισμικών δεδομένων, συμπιέζοντας την κυματομορφή της σεισμικής πηγής (source wavelet). Συνήθως εφαρμόζεται πριν από την υπέρθεση, αν και εφαρμόζεται και μετά από την υπέρθεση σε αρκετές περιπτώσεις. Η αποσυνέλιξη, με τις διάφορες μορφές της, έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές για την απόσβεση πολλαπλών ανακλάσεων στα σεισμικά δεδομένα. Επίσης έγινε προσπάθεια να εφαρμοσθεί και σε δεδομένα γεωραντάρ για τον ίδιο σκοπό.

Υπάρχουν πολλά είδη αποσυνέλιξης, η αποσυνέλιξη που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι η αποσυνέλιξη πρόβλεψης. Στην αποσυνέλιξη πρόβλεψης το ίχνος περιέχει αφενός κύριες ανακλάσεις που είναι απρόβλεπτες. Αφετέρου υπάρχει και μια προβλέψιμη συνιστώσα που αφορά τις πολλαπλές ανακλάσεις. Έτσι, αν επιτευχθεί πρόβλεψη της κυματομορφής της πηγής σε μελλοντικό χρόνο ($t + a$), όπου a είναι ο χρόνος πρόβλεψης (prediction lag), τότε μπορεί θεωρητικά να πραγματοποιηθεί απομάκρυνση της προβλέψιμης συνιστώσας, δηλαδή της αντίστοιχης πολλαπλής ανάκλασης. (Hamdan, 2003)

4.6 Μιγαδικά χαρακτηριστικά δεδομένων γεωραντάρ

4.6.1 Εισαγωγικά

Η μιγαδική ανάλυση ιχνών έχει σαν αποτέλεσμα τον φυσικό διαχωρισμό του πλάτους και της φάσης μιας κυματομορφής (χαρακτηριστικά ή attributes). Το χαρακτηριστικό πλάτος αναφέρεται σαν ισχύς ανάκλασης ή φάκελος ή στιγμιαίο πλάτος του σήματος (reflection strength, envelope, instantaneous amplitude), ενώ η φάση αναφέρεται ως στιγμιαία φάση (instantaneous phase). Η στιγμιαία φάση αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό της στιγμιαίας συχνότητας (instantaneous frequency). Το στιγμιαίο πλάτος και η στιγμιαία συχνότητα συνδυάζονται για τον υπολογισμό άλλων χαρακτηριστικών όπως τη σταθμισμένη μέση συχνότητα και τη φαινόμενη πολικότητα (Σπανουδάκης, 2002).

Η σύνθετη ή μιγαδική ανάλυση σήματος αντιμετωπίζει ένα ίχνος $x(t)$ σαν το πραγματικό μέρος ενός αναλυτικού σήματος το οποίο δίδεται από τη σχέση:

$$f(t) = x(t) + jx^*(t) \quad (4.12)$$

Το φανταστικό μέρος $x^*(t)$ είναι το φασικά μετατοπισμένο κατά 90° πραγματικό μέρος και μπορεί να προσδιοριστεί από το πραγματικό αν απαιτηθεί το $x^*(t)$:

1. Να μπορεί να προσδιοριστεί από το $x(t)$ με τη διαδικασία της συνέλιξης.
2. Αν το $x(t)$ είναι ημιτονοειδής συνάρτηση, έστω $x(t) = E \cos(\omega t + \theta)$ τότε $x^*(t) = E \sin(\omega t + \theta)$ για όλες τις πραγματικές τιμές του E και θ και για $\omega > 0$.

Αυτοί οι δυο κανόνες προσδιορίζουν το φανταστικό μέρος για κάθε συνάρτηση $x(t)$ που μπορεί να αναπαρασταθεί από σειρά ή ολοκλήρωμα Fourier.

Αν θεωρηθεί ότι η $x(t)$ μπορεί να εκφραστεί από χρονικά μεταβαλλόμενο πλάτος $E(t)$ και φάση $\theta(t)$ δηλαδή $x(t)=E(t)\cos\theta(t)$, τότε η φασικά μετατοπισμένη κατά 90° κυματομορφή είναι $x^*(t)=E(t)\sin\theta(t)$ και η σύνθετη κυματομορφή είναι:

$$f(t) = x(t) + jx^*(t) = E(t)[\cos\theta(t) + j\sin\theta(t)] = E(t)e^{j\theta(t)} \quad (4.13)$$

Τα μιγαδικά χαρακτηριστικά διακρίνονται σε δύο ομάδες :

- Τα φυσικά μιγαδικά χαρακτηριστικά. Αυτά τα μιγαδικά χαρακτηριστικά μπορούν να υπολογιστούν είτε βήμα προς βήμα (instantaneous physical attributes) είτε στα τοπικά μέγιστα του πλάτους (wavelet or response attributes).
- Τα γεωμετρικά μιγαδικά χαρακτηριστικά (attributes). Φανερώνουν την χωρική και χρονική διακύμανση των φυσικών μιγαδικών χαρακτηριστικών. Μιγαδικά χαρακτηριστικά όπως η συνάφεια, η ομοιότητα κ.ά. ανήκουν σε αυτήν την τάξη (Παπαβασιλείου, 2004).

4.6.2 Τα βασικά μιγαδικά χαρακτηριστικά

Αν τα $f(t)$ και $f^*(t)$ είναι γνωστά τότε η σχέση μπορεί να επιλυθεί ως προς $E(t)$ και $\theta(t)$:

$$E(t) = \sqrt{x^2(t) + x^{*2}(t)} \quad (4.14)$$

$$\theta(t) = \tan^{-1}[x^*(t) / x(t)] \quad (4.15)$$

Το $E(t)$ είναι το στιγμιαίο πλάτος, ενώ το $\theta(t)$ είναι η στιγμιαία φάση. Ο ρυθμός μεταβολής της φάσης εκφράζεται από τη χρονικά μεταβαλλόμενη στιγμιαία συχνότητα $\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$. Η στιγμιαία συχνότητα μπορεί να προκύψει και κατά τη συνέλιξη της στιγμιαίας φάσης με ένα διαφορικό φίλτρο $d(t)$ οπότε προκύπτει η σχέση:

$$\omega(t) = \int_{-\infty}^{\infty} d(\tau)\theta(t - \tau) dt \quad (4.16)$$

Ακόμα παραγωγίζοντας τη συνάρτηση του τόξου εφαπτομένης σύμφωνα με τον ορισμό της στιγμιαίας φάσης προκύπτει:

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \{ \tan^{-1} [x^*(t) / x(t)] \} = (x(t) \frac{dx^*(t)}{dt} - x^*(t) \frac{dx(t)}{dt}) / (x^2(t) + x^{*2}(t)) \quad (4.17)$$

Το στιγμιαίο πλάτος σε κάθε χρονική στιγμή ισούται με τη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η καταγραφή μετατοπίζοντας σταθερά τη φάση της από $0^\circ - 360^\circ$ (Barnes 1998). Η τιμή της φάσης που προσδίδει τη μέγιστη τιμή της καταγραφής είναι η στιγμιαία φάση αλλά με αντίθετο πρόσημο. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις χρονικές στιγμές και έτσι παράγεται στο στιγμιαίο πλάτος και η στιγμιαία φάση της καταγραφής. Μετατόπιση της φάσης κατά 90° είναι αρκετή. Τότε το στιγμιαίο πλάτος και η στιγμιαία φάση προκύπτουν από την αρχική και τη φασικά μετατοπισμένη κατά 90° (Σπανουδάκης, 2002).

4.6.3 Στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά

α) Στιγμιαία φανταστική συνιστώσα: Το φασικά μετατοπισμένο κατά 90^0 σήμα αποτελεί ένα μιγαδικό χαρακτηριστικό, το οποίο χρησιμεύει στον ποιοτικό έλεγχο της μεταβολής της στιγμιαίας φάσης στο χρόνο.

β) Στιγμιαίο πλάτος: Το βασικό αυτό μιγαδικό χαρακτηριστικό χρησιμεύει στον εντοπισμό πλευρικών μεταβολών στους ανακλαστήρες

γ) Πρώτη παράγωγος του στιγμιαίου πλάτους: Ο ρυθμός μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους

$\frac{dE(t)}{dt}$ δείχνει την ισχύ των ανακλαστήρων και πιθανές περιοχές απορρόφησης της ενέργειας των κυμάτων. Επίσης σχετίζεται με ασυνέχειες όταν υπάρχει πλευρική διακύμανση στις τιμές του.

δ) Δεύτερη παράγωγος του στιγμιαίου πλάτους: δείχνει όλες τις αιχμές που αντιπροσωπεύουν τις διεπιφάνειες ανάκλασης και τονίζει τις λιθολογικές αλλαγές.

ε) Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB: Η κλίμακα dB χρησιμοποιείται συνήθως στο πεδίο των συχνοτήτων για τη απεικόνιση του φάσματος ισχύος (power spectrum). Αυτό το μιγαδικό χαρακτηριστικό χρησιμοποιείται για τη μελέτη της μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB.

στ) Ενδιάμεση τιμή του στιγμιαίου πλάτους: Τονίζει τις ανωμαλίες στις αιχμές του στιγμιαίου πλάτους. Γενικότερα παρατηρείται ότι η απεικόνιση το στιγμιαίου πλάτους τονίζει την περιοχή όπου παρατηρείται απορρόφηση των κυμάτων.

ζ) Στιγμιαία φάση: Τείνει να ενισχύσει τους αδύναμους ανακλαστήρες αφού είναι ανεξάρτητη από το πλάτος. Όμως η στιγμιαία συχνότητα είναι πολύ ευαίσθητη στο θόρυβο.

η) Κανονικοποιημένο πλάτος: Περιέχει όλες τις λεπτομέρειες της στιγμιαίας φάσης χωρίς όμως να περιλαμβάνει τις απότομες μεταβολές και τονίζει την πλευρική συνέχεια των ανακλαστήρων. Δεν περιέχει πληροφορίες σχετικά με την ισχύ ανάκλασης, ενώ οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ -1 και $+1$.

θ) Γινόμενο των καταγραφών και του συνημιτόνου της στιγμιαίας φάσης: Ενισχύει τις θετικές και αρνητικές αιχμές (peaks and troughs) της καταγραφής και μετατρέπει τις αρνητικές αιχμές σε ψευδό-αιχμές για την καλύτερη ερμηνεία της στρωματογραφίας. Ουσιαστικά τονίζει τις περιοχές απορρόφησης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

ι) Γινόμενο φιλτραρισμένου στιγμιαίου πλάτους και συνημίτονου της στιγμιαίας φάσης: Χρησιμοποιείται στην ανάλυση των ανωμαλιών του πλάτους τονίζοντας τα ισχυρά πλάτη και τους συνεχείς ανακλαστήρες.

κ) Στιγμιαία συχνότητα: Η στιγμιαία συχνότητα που ορίζεται σαν ο ρυθμός μεταβολής της στιγμιαίας φάσης $\frac{d\theta(t)}{dt}$ είναι επίσης πολύ ευαίσθητη στο θόρυβο.

λ) Στιγμιαία σταθμισμένη συχνότητα από το στιγμιαίο πλάτος: Για να εξαλειφθούν οι ψευδείς τιμές της στιγμιαίας συχνότητας οι οποίες προκύπτουν σε περιοχές με χαμηλής

ποιότητας σήμα, η στιγμιαία συχνότητα πολλαπλασιάζεται με τις κανονικοποιημένες τιμές του στιγμιαίου πλάτους και μετά υπολογίζεται ο μέσος όρος για ένα μικρό χρονικό παράθυρο.

μ) Στιγμιαία σταθμισμένη συχνότητα από το πλάτος της κυματομορφής: Πρόκειται επίσης για μια εξομαλυσμένη εκτίμηση της στιγμιαίας συχνότητας η οποία είναι λιγότερο επιρρεπής στο θόρυβο.

ν) Δείκτης λεπτών στρωμάτων: Οι περιοχές όπου υπάρχουν απότομες αλλαγές της στιγμιαίας συχνότητας ή όπου λαμβάνει αρνητικές τιμές έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον αφού σχετίζονται με ανακλάσεις που λαμβάνουν χώρα σε κοντινά γεωλογικά στρώματα. Ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας είναι δείκτης λεπτών στρωμάτων όταν η μεταβολή είναι μεγάλη.

ξ) Επιτάχυνση της φάσης: Η παράγωγος της στιγμιαίας συχνότητας δίδει τη στιγμιαία επιτάχυνση. Με αυτό τον τρόπο τονίζονται οι τοπικές απότομες μεταβολές της συχνότητας και οι λεπτοί ανακλαστήρες γίνονται χαρακτηριστικοί.

ο) Στιγμιαίο φασματικό εύρος: Το στιγμιαίο φασματικό εύρος δίδεται από τη σχέση:

$$\sigma_f^2 = \frac{\frac{dE(t)}{dt}}{2\pi E(t)} \quad (4.18)$$

Από τη σχέση αυτή μπορεί να υπολογιστεί η απόλυτη τιμή του ρυθμού μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους και έχει σαν μονάδα μέτρησης την οκτάβα.

π) Στιγμιαίος δείκτης ποιότητας: Ο στιγμιαίος δείκτης ποιότητας δίδεται από τη σχέση:

$$q(t) = \frac{-\pi\omega(t)}{2\pi\sigma_f^2} = \frac{\omega(t)}{2\sigma_f^2} \quad (4.19)$$

ρ) Συνάφεια (Semblance): Η συνάφεια (semblance) είναι ένα μέτρο της ομοιότητας μεταξύ διάφορων ιχνών.

4.7 Μετασχηματισμός κύριων συνιστωσών

Ο σκοπός της ανάλυσης κύριων συνιστωσών είναι να εξηγήσει τη δομή του πίνακα μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας Σ μέσω ελάχιστων γραμμικών συνδυασμών των αρχικών μεταβλητών, ώστε να ελαττωθούν οι διαστάσεις των δεδομένων και να γίνει ευκολότερη η ερμηνεία τους. Με την ανάλυση κύριων συνιστωσών προσδιορίζεται νέο σύστημα συντεταγμένων στο οποίο τα δεδομένα είναι στατιστικώς ασυσχέτιστα. Δηλαδή, σε ένα σύστημα συντεταγμένων y ο αρχικός πίνακας Σ διασποράς (μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας) μετασχηματίζεται σε διαγώνιο πίνακα.

Ο πίνακας Σ μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας δίνεται από την σχέση:

$$\Sigma = \text{Cov}(X) = E[(X - \mu)(X - \mu)^T] \quad (4.20)$$

όπου μ η μέση τιμή των τιμών του πίνακα X και X πίνακας της μορφής :

$$X_{(p \times N)} = [x_1 | x_2 | \dots | x_p]^T \quad (4.21)$$

με $\mathbf{p}$ τον αριθμό των μιγαδικών χαρακτηριστικών, $\mathbf{N}$ τον αριθμό των ιχνών και $\mathbf{x}$ τυχαίες μεταβλητές.

$$\text{Η } E(\mathbf{x}) \text{ είναι η μέση τιμή των παραπάνω δεδομένων : } E(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} E(x_1) \\ E(x_2) \\ \vdots \\ E(x_p) \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Με την ανάλυση των κύριων συνιστωσών προσδιορίζεται σύστημα συντεταγμένων έτσι ώστε ο αρχικός πίνακας Σ διασποράς (ή μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας) να μετασχηματιστεί σε διαγώνιο πίνακα. Οι κύριες συνιστώσες είναι στατιστικώς ασυσχέτιστες, ενώ ο πίνακας μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας των κύριων συνιστωσών είναι διαγώνιος.

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_p \quad \Sigma_\psi = \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Για κάθε μη – μηδενική ιδιοτιμή λ_i των δεδομένων προσδιορίζεται το αντίστοιχο διάνυσμα:

$$\mathbf{e}_i = \begin{bmatrix} e_{1,i} \\ e_{2,i} \\ \vdots \\ e_{p,i} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Επομένως οι κύριες συνιστώσες περιγράφονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\mathbf{y}_1 = \mathbf{e}_1^T \mathbf{x} \quad (4.25)$$

$$\mathbf{y}_2 = \mathbf{e}_2^T \mathbf{x} \quad (4.26)$$

Πολλές φορές παρατηρείται το ποσοστό της ολικής μεταβλητότητας που αντιστοιχεί στις δύο ή τρεις πρώτες κ.τ.λ. συνιστώσες να αποτελεί ή και να υπερβαίνει το 80 με 90 %, σε αυτήν

την περίπτωση οι συνιστώσες αυτές μπορούν να “αντικαταστήσουν” τις p αρχικές μεταβλητές χωρίς να απολεσθεί πληροφορία (Μερτίκας, 1999).

4.8 Ταξινόμηση

Η ταξινόμηση είναι κυρίως στατιστική μέθοδος και πραγματεύεται τον διαχωρισμό δεδομένων και την καταχώρισή τους σε δύο ή περισσότερες ομάδες ή τάξεις. Στόχος της ταξινόμησης είναι η επιλογή ενός κατάλληλου αλγόριθμου ώστε να διαχωριστούν τα δεδομένα σε δύο ή περισσότερες ομοειδείς τάξεις. Η ταξινόμηση των δεδομένων του γεωραντάρ είναι η διαδικασία αντιστοίχισης ή τοποθέτησης των μιγαδικών χαρακτηριστικών των δεδομένων σε ομάδες που παρουσιάζουν τις ίδιες περίπου ιδιότητες.

4.8.1 Αυτόματη ταξινόμηση

Μια τυπική διαδικασία αυτόματης ταξινόμησης αρχίζει με τον καθορισμό του ελάχιστου και του μέγιστου αριθμού των τάξεων που πρόκειται να δημιουργηθούν από τον αλγόριθμο ταξινόμησης. Η ταξινόμηση ξεκινά με την αυθαίρετη επιλογή ενός συνόλου δεδομένων που θεωρούνται ως κέντρα συγκέντρωσης παρομοίων μιγαδικών χαρακτηριστικών. Η επιλογή αυτή είναι συχνά τυχαία ώστε να διασφαλιστεί η αμεροληψία του αναλυτή στην ταξινόμηση και επιπλέον τα επιλεγόμενα κέντρα να είναι αντιπροσωπευτικά.

Στο αρχικό αυτό στάδιο οι ομάδες ή οι τάξεις αποτελούνται μόνο από τα αυθαίρετα επιλεγμένα δεδομένα που θεωρούνται ως πρωτογενείς πυρήνες συγκέντρωσης και δημιουργίας μιας τάξης. Στο επόμενο βήμα όλα τα υπόλοιπα δεδομένα προσαρτώνται και συνεπώς ταξινομούνται στην πλησιέστερη ομάδα. Το στάδιο όμως αυτό της ταξινόμησης αποτελεί αρχική προσέγγιση καθώς οι ομάδες αυτές που δημιουργήθηκαν από την πρώτη αυτή προσπάθεια είναι μάλλον απίθανο να αποτελούν και την βέλτιστη λύση.

Στο επόμενο βήμα ο αλγόριθμος προσδιορίζει νέες συγκεντρώσεις δεδομένων για κάθε ομάδα, καθώς η πρόσθεση νέων δεδομένων κατά την διαδικασία της ταξινόμησης συνεπάγεται και αλλαγή της αρχικής ταξινόμησης. Κατόπιν όλα τα δεδομένα ταξινομούνται εκ νέου με κάθε στοιχείο να τοποθετείται στην πλησιέστερη ομάδα συγκέντρωσης.

Στη συνέχεια δημιουργούνται νέες ομάδες. Αν οι νέες ομάδες δεδομένων διαφέρουν από αυτές που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο βήμα, τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου να μην υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ τους. Με αυτόν τον τρόπο ολοκληρώνεται η διαδικασία της αυτόματης ταξινόμησης.

4.8.1.1 Μέθοδος αυτόματης ταξινόμησης K- μέσων τιμών (k-means)

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη συμβατική μέθοδος είναι των K-μέσων τιμών (K - means). Το κριτήριο για την ταξινόμηση των δεδομένων σε ομάδες είναι η ελαχιστοποίηση της μέσης τετραγωνικής απόστασης όλων των σημείων από τα αντίστοιχα κέντρα ομαδοποίησης:

$$E_K = \sum_{j=1}^K \|m_j(k) - \mathbf{x}\|^2 \quad (4.27)$$

Όπου m_j τα κέντρα συγκέντρωσης, k ο αριθμός των κέντρων συγκέντρωσης και $\mathbf{x}$ τα δείγματα.

Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει τα παρακάτω τέσσερα (4) βήματα:

1. Επιλέγονται (είτε τυχαία, είτε αυτά είναι γνωστά) K αρχικά κέντρα ομάδων $m_1(1), m_2(1), \dots, m_K(1)$.

2. Κάθε άγνωστο δείγμα $\mathbf{x}$ αντιστοιχείται στην ομάδα ω_j εάν:

$$\|m_j(k) - \mathbf{x}\| < \|m_i(k) - \mathbf{x}\| \quad (4.28)$$

για κάθε $i = 1, 2, \dots, K, i \neq j$

3. Υπολογίζονται τα νέα κέντρα ομάδων από τη σχέση:

$$m_j(k+1) = \frac{1}{n} \sum_{\mathbf{x} \in \omega_j} \mathbf{x} \quad (4.29)$$

όπου n , ο αριθμός των δειγμάτων στην ομάδα j .

4. Αν $m_j(k+1) = m_j(k)$ για $j = 1, 2, \dots, K$, ο αλγόριθμος συγκλίνει, διαφορετικά επαναλαμβάνεται από το βήμα 2.

Η επιλογή του πλήθους K των κέντρων συγκέντρωσης είναι σημαντικός παράγοντας για το αποτέλεσμα της ταξινόμησης, γιατί αλλάζοντας τον αριθμό K των κέντρων προκύπτουν τελείως διαφορετικές ομάδες. Κρίσιμη είναι επίσης και η επιλογή των αρχικών κέντρων συγκέντρωσης $m_1(1), m_2(1), \dots, m_K(1)$, επειδή κάποιες ομάδες μπορεί να μείνουν κενές αν τα κέντρα τους απέχουν από την κατανομή των δεδομένων. Ο αλγόριθμος των K μέσων τιμών είναι υπολογιστικά απλός, γρήγορος και χρησιμοποιείται συνήθως για την ταξινόμηση μεγάλου πλήθους δεδομένων. Δίνει ακριβή αποτελέσματα όταν οι τάξεις απέχουν σχετικά μεγάλη απόσταση μεταξύ τους (Kulkarni, 1998).

4.8.1.2 Χάρτες αυτοδιοργάνωσης (Self Organizing Maps, SOM)

Οι χάρτες αυτοδιοργάνωσης είναι ειδική περίπτωση νευρωνικών δικτύων που βασίζονται στην ανταγωνιστική μάθηση. Τα νευρώνια σε αυτή την περίπτωση είναι τοποθετημένα στους κόμβους πλέγματος δύο διαστάσεων. Τα νευρώνια εκπαιδεύονται βάση των δειγμάτων εισόδου σύμφωνα με τους κανόνες της ανταγωνιστικής μάθησης, όπου μόνο ένα νευρώνιο νικάει κάθε φορά τον ανταγωνισμό. Στη συνέχεια διατάσσονται στον χάρτη το ένα σε σχέση με το άλλο και σχηματίζεται τοπολογικός χάρτης όπου η πλευρική διάταξή τους είναι ενδεικτική των φυσικών στατιστικών χαρακτηριστικών που περιέχονται στα δεδομένα. Δηλαδή τα νευρώνια που βρίσκονται κοντά στον χάρτη εκτελούν παρόμοιες λειτουργίες.

Ο αλγόριθμος της αυτοδιοργάνωσης δημιουργεί αποτύπωση των χαρακτηριστικών προσαρμόζοντας τους συντελεστές βάρους από τους κόμβους εισόδου στους κόμβους εξόδου σε δίκτυο δύο επιπέδων. Το πρώτο επίπεδο αποτελεί το στρώμα εισόδου και το δεύτερο το ανταγωνιστικό στρώμα που οργανώνεται σε δύο διαστάσεων πλέγμα. Τα δύο επίπεδα είναι πλήρως διασυνδεδεμένα και κάθε νευρώνιο στο πρώτο επίπεδο έχει τόσες εισόδους όσα είναι και τα μιγαδικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται στην ταξινόμηση (Kulkarni, 1998).

Ο αλγόριθμος της αυτοδιοργάνωσης ξεκινάει ορίζοντας τα διανύσματα συναπτικών βαρών. Αυτό γίνεται προσδίδοντας μικρές τιμές στο δίκτυο, που προκύπτουν από γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Με αυτό τον τρόπο δεν υπάρχει οργανωμένη διάταξη από την αρχή. Οι θεμελιώδεις λειτουργίες του χάρτη αυτοδιοργάνωσης είναι οι ακόλουθες :

- **Ανταγωνισμός:** Τα νευρώνια ανταγωνίζονται μεταξύ τους για το πιο ανταποκρίνεται καλύτερα στα διανύσματα εισόδου. Για κάθε νέα είσοδο μόνο ένα νευρώνιο ανακηρύσσεται νικητής.

- **Συνεργασία:** Το νευρώσιο νικητής καθορίζει τοπολογική γειτονία μέσα στην οποία τα νευρώσια συνεργάζονται.
- **Προσαρμογή συναπτικών βαρών:** Σε αυτό το στάδιο διορθώνεται τόσο το διάνυσμα συναπτικών βαρών του νευρώσιου νικητή, ώστε να έρθει πιο κοντά στο διάνυσμα εισόδου, όσο και τα διανύσματα συναπτικών βαρών της γειτονιάς του, αλλά σε μικρότερο βαθμό. Αυτός είναι και ο λόγος όπου υπάρχει τοπολογική συνέχεια στον χάρτη.
- Επιλέγεται ένα δείγμα $\mathbf{x}$ από τα δεδομένα το οποίο πρέπει να έχει διαστάσεις m .
- Υπολογίζεται το νευρώσιο νικητής $i(\mathbf{x})$ σε κάθε βήμα n με κριτήριο την ελάχιστη Ευκλείδεια απόσταση:

$$i(\mathbf{x}) = \arg \min_j \|\mathbf{x}(n) - \mathbf{w}_j\|, j = 1, 2, \dots, l \quad (4.30)$$

- Τα συναπτικά βάρη όλων των νευρώνιων επαναπροσδιορίζονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$\mathbf{w}_j(n+1) = \mathbf{w}_j(n) + \eta(n)h_{j,i(\mathbf{x})}(n)(\mathbf{x}(n) - \mathbf{w}_j(n)), \quad (4.31)$$

όπου $\eta(n)$ η παράμετρος ρυθμού εκμάθησης και $h_{j,i(\mathbf{x})}$ η τοπολογική γειτονία γύρω από το νευρώσιο νικητή $i(\mathbf{x})$. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται ωσότου δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις στον χάρτη.

4.8.2 Καθοδηγούμενη ταξινόμηση

Η καθοδηγούμενη ταξινόμηση διαφέρει από την αυτόματη στο ότι στην διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται γνωστά δείγματα προκειμένου να ταξινομηθούν τα υπόλοιπα σε ομάδες. Η επιλογή των δειγμάτων για την εκπαίδευση του αλγορίθμου αποτελεί βασικό και κρίσιμο βήμα στην καθοδηγούμενη ταξινόμηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**5.1 Εισαγωγή**

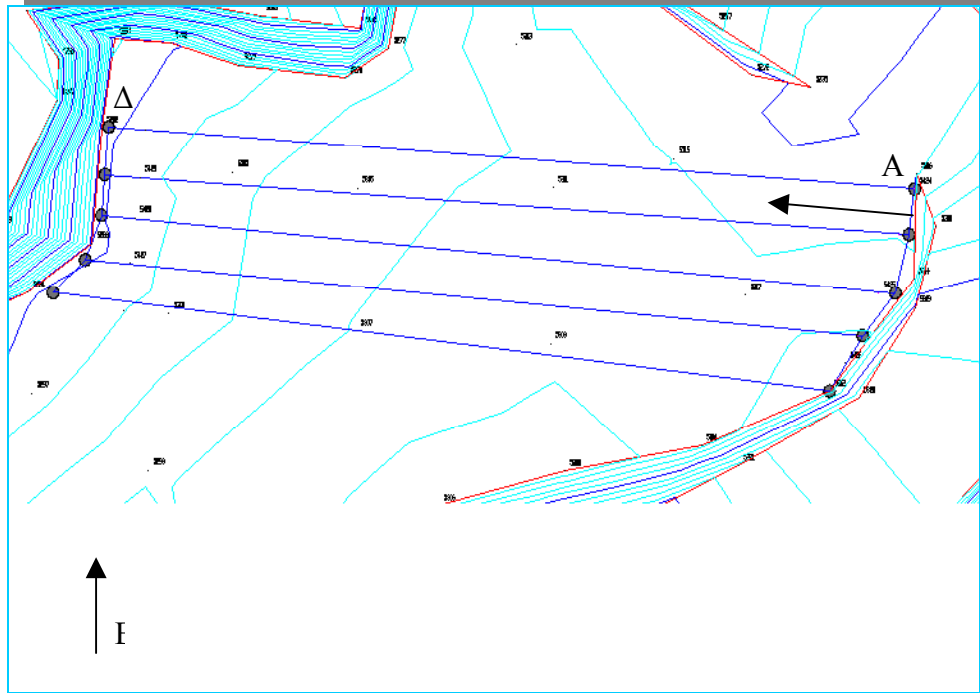
Σκοπός της εργασίας είναι η εύρεση κατάλληλης επεξεργασίας των δεδομένων του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας, για την απλούστευση της ερμηνείας τους και την εύκολη σύγκρισή τους.

Συγκεκριμένα παρουσιάζεται η επεξεργασία και τα προκύπτοντα αποτελέσματα των δεδομένων του γεωραντάρ και συγκρίνονται με τις τομές της ηλεκτρικής τομογραφίας για τη βέλτιστη ερμηνεία τους.

Οι μετρήσεις λήφθηκαν στο χώρο εξόρυξης του λατομείου Ζωφόρων, που χαρακτηρίζεται από τεφρό έως τεφρόμαυρο ασβεστόλιθο, της ζώνης Τριπόλεως και από στρώμα καστανών, ερυθρών αργιλικών σχιστολιθών και ψαμμιτών, με μικρές ενστρώσεις τεφρών ασβεστολιθικών τουρβιδιτών (Χορευτάκη, 2003).

5.2 Σχεδιασμός διασκοπήσεων

Οι μετρήσεις του γεωραντάρ πραγματοποιήθηκαν στην δεύτερη, τρίτη και στο δεύτερο μισό της τέταρτης γραμμής, από τις 5 γραμμές του κανάβου με διαστάσεις 108m x 24m. Το βήμα των μετρήσεων σε κάθε γραμμή ήταν 25cm και οι κεραίες που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις αυτές ήταν 110MHz.



Σχ.5.1 Κάναβος μετρήσεων σημειωμένος στο τοπογραφικό χάρτη του λατομείου. Οι ισουψείς είναι ανά 1m — 5m — και 10m —

5.3 Επεξεργασία δεδομένων γεωραντάρ

Αρχικά στα δεδομένα του γεωραντάρ εφαρμόστηκαν δυο φίλτρα:

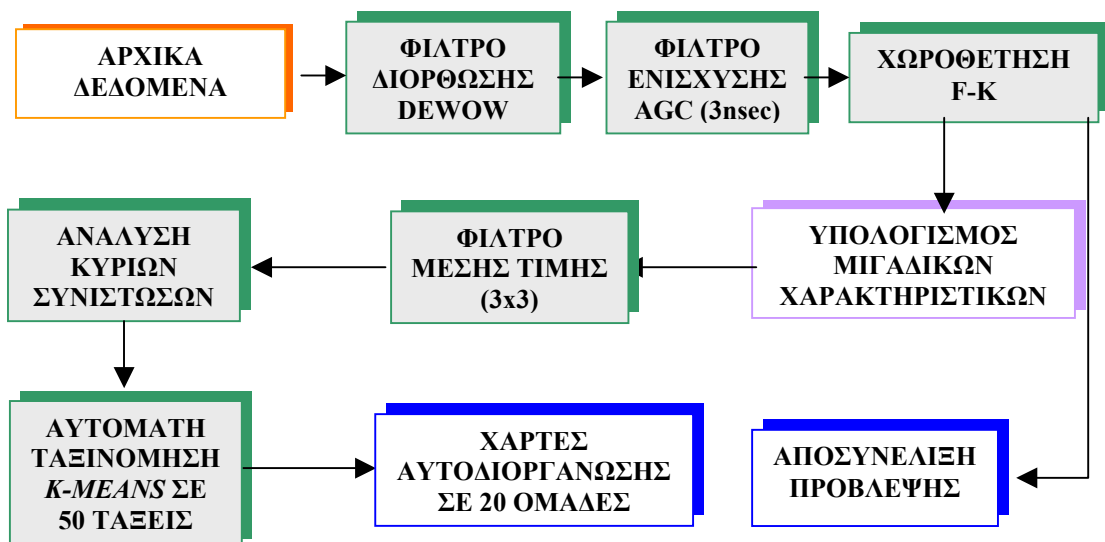
- ☞ Φίλτρο διόρθωσης Dewow
- ☞ Φίλτρο ενίσχυσης AGC με παράθυρο μήκους 3nsec.

Στη συνέχεια στα επεξεργασμένα δεδομένα πραγματοποιήθηκε χωροθέτηση με τη μέθοδο $f - k$ (συχνότητας – κυματαριθμού). Κατά την διάρκεια της χωροθέτησης πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για την εύρεση της κατάλληλης ταχύτητας διάδοσης κύματος και επιλέχθηκε η ταχύτητα $v = 0,11\text{m/nsec}$.

Στα χωροθετημένα πλέον δεδομένα υπολογίστηκαν τα **φυσικά μιγαδικά χαρακτηριστικά** (Στιγμιαίο πλάτος, Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB, Στιγμιαία φάση, Στιγμιαία συχνότητα) και τα **γεωμετρικά μιγαδικά χαρακτηριστικά** (Συνάφεια, Συνάφεια της Στιγμιαίας Φάσης). Σε κάθε μιγαδικό χαρακτηριστικό εφαρμόστηκε το φίλτρο μέσης τιμής (**average filter**) διάρκειας 3nsec, έτσι ώστε να εξομαλυνθούν τα δεδομένα.

Τα μιγαδικά χαρακτηριστικά χωρίστηκαν σε τρία ζευγάρια (**1:** Στιγμιαίο πλάτος, Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB), (**2:** Στιγμιαία φάση, Στιγμιαία συχνότητα), (**3:** Συνάφεια, Συνάφεια της Στιγμιαίας Φάσης) και πραγματοποιήθηκε **μετασχηματισμός κυρίων συνιστωσών** σε κάθε ζευγάρι ξεχωριστά, έτσι ώστε να μειωθεί ο όγκος των δεδομένων και να επιτευχθεί συγκέντρωση της συνολικής πληροφορίας. Το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής πληροφορίας ($\approx 80\%$) περιλαμβάνεται στις πρώτες κύριες συνιστώσες στο πρώτο και τρίτο ζευγάρι, ενώ στο δεύτερο κατανέμεται και στις δυο συνιστώσες με αναλογία περίπου $60\% - 40\%$. Οι πρώτες συνιστώσες των τριών ζευγαριών καθώς και η δεύτερη συνιστώσα του δεύτερου ζευγαριού επιλέχθηκαν για την ταξινόμηση με τη μέθοδο των **K-μέσων τιμών**. Με την αυτόματη μέθοδο ταξινόμησης των K-μέσων τιμών τα δεδομένα ταξινομήθηκαν σε 50 τάξεις και στη συνέχεια, με τον αλγόριθμο του **Kohonen** (Self Organizing Maps) ταξινομήθηκαν σε 20 ομάδες.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζονται τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν κατά την επεξεργασία των δεδομένων.

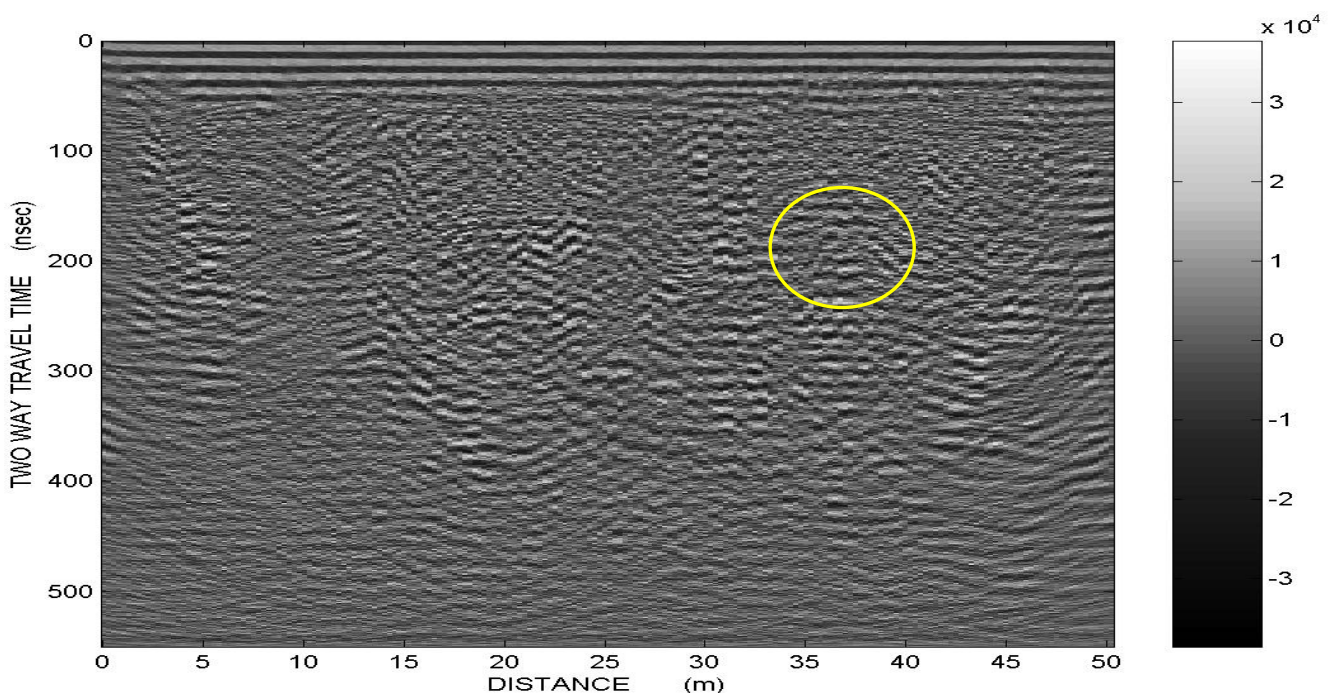


Σχήμα 5.2 Διάγραμμα επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ

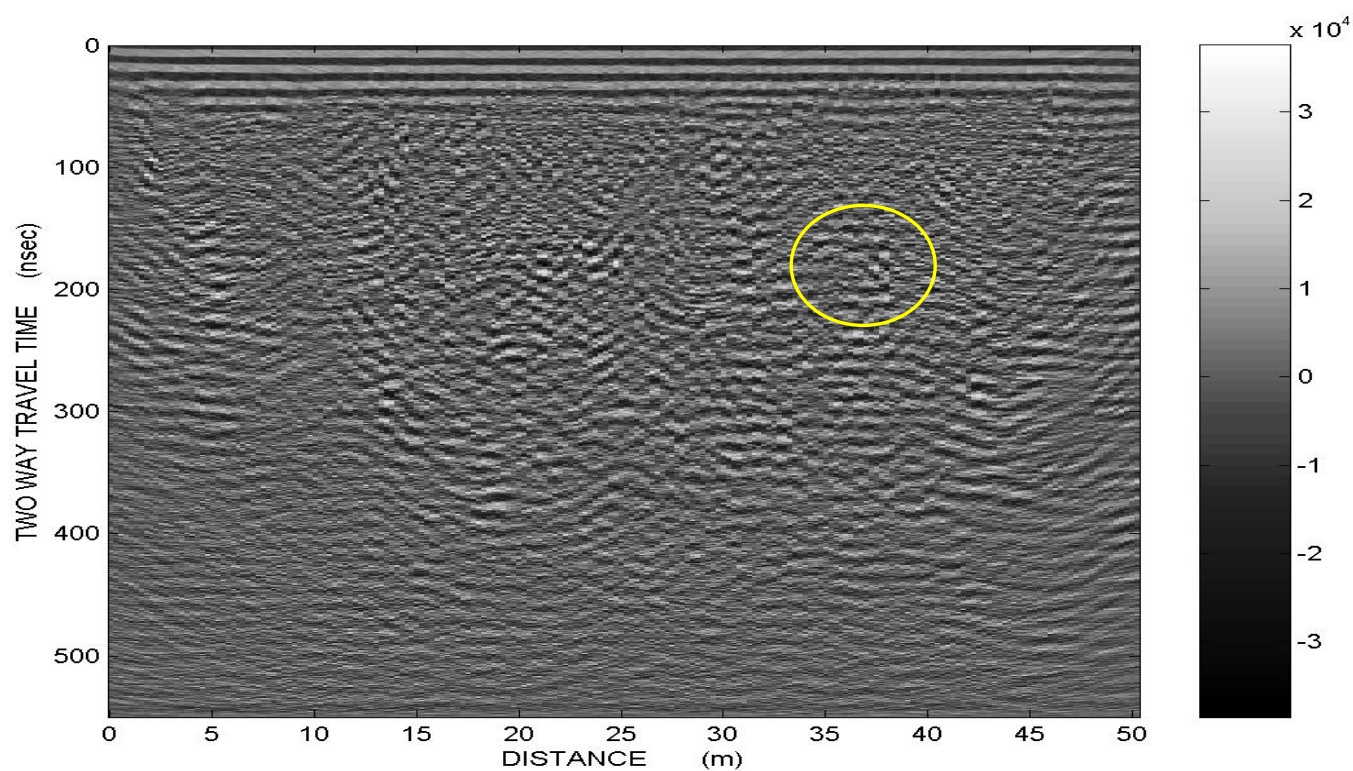
5.4 Επιλογή ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων

Για την διαδικασία της χωροθέτησης απαιτείται η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αρχικά υπολογίστηκε η ταχύτητα από τις υπερβολές των εικόνων του AGC ίση με $0,12\text{m/nsec}$ και μετά πραγματοποιήθηκε χωροθέτηση με ταχύτητες παραπλήσιες στην υπολογισμένη τιμή. Η χωροθέτηση προσπαθεί να τοποθετήσει την ενέργεια των περιθλώμενων κυμάτων στη θέση από την οποία προέρχονται. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στα δεδομένα του πρώτου μισού της δεύτερης γραμμής μελέτης του κανάβου. Οι χωροθετημένες εικόνες που προέκυψαν από τις δοκιμές στην τιμή της ταχύτητας διάδοσης είναι οι παρακάτω (Σχ.Α.1-Α.3).

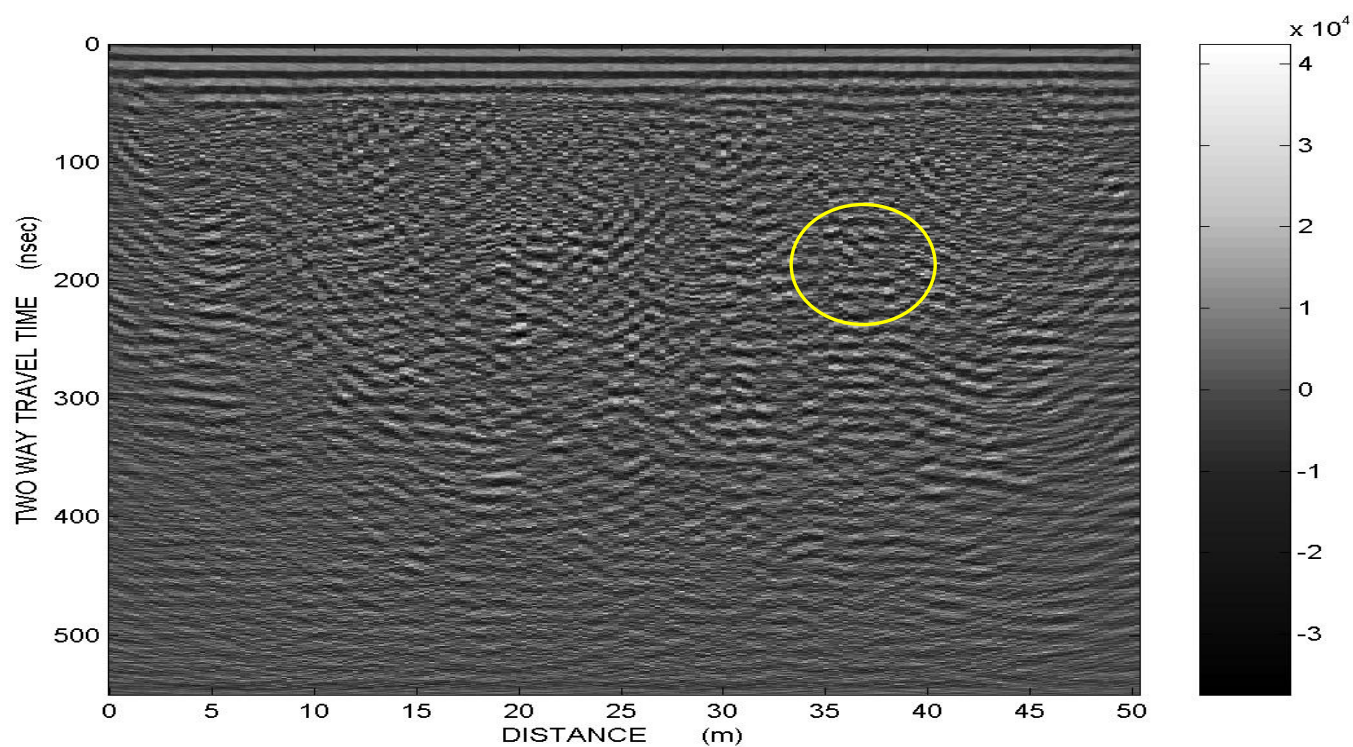
Η δεύτερη εικόνα που είναι με ταχύτητα διάδοσης $0,10\text{m/nsec}$ και η τρίτη με ταχύτητα $0,11\text{m/nsec}$ δεν έχουν εμφανή διαφορά και επιλέχτηκε η τρίτη περίπτωση. Και αυτό λόγω του ότι η τρίτη περίπτωση ήταν κοντινότερα στην υπολογισμένη τιμή της ταχύτητας.



Σχ.Α1 Χωροθετημένη εικόνα του πρώτου μισού της δεύτερης γραμμής μελέτης με ταχύτητα $0,09\text{ m/nsec}$



Σχ.Α2 Χωροθετημένη εικόνα του πρώτου μισού της δεύτερης γραμμής μελέτης με ταχύτητα 0,10 m/nsec



**Σχ.Α3 Χωροθετημένη εικόνα του πρώτου μισού της δεύτερης γραμμής μελέτης με
ταχύτητα 0,11 m/nsec**

5.5 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αρχικές εικόνες των δεδομένων και εικόνες από τα διάφορα στάδια της επεξεργασίας των δεδομένων του γεωραντάρ. Οι εικόνες λόγω του μεγάλου μεγέθους χωρίστηκαν σε δυο μέρη το πρώτο από την αρχή μέχρι τα 50m και το δεύτερο από τα 50 μέχρι τέλος. Οι 5 πρώτες εικόνες είναι τα αρχικά δεδομένα.

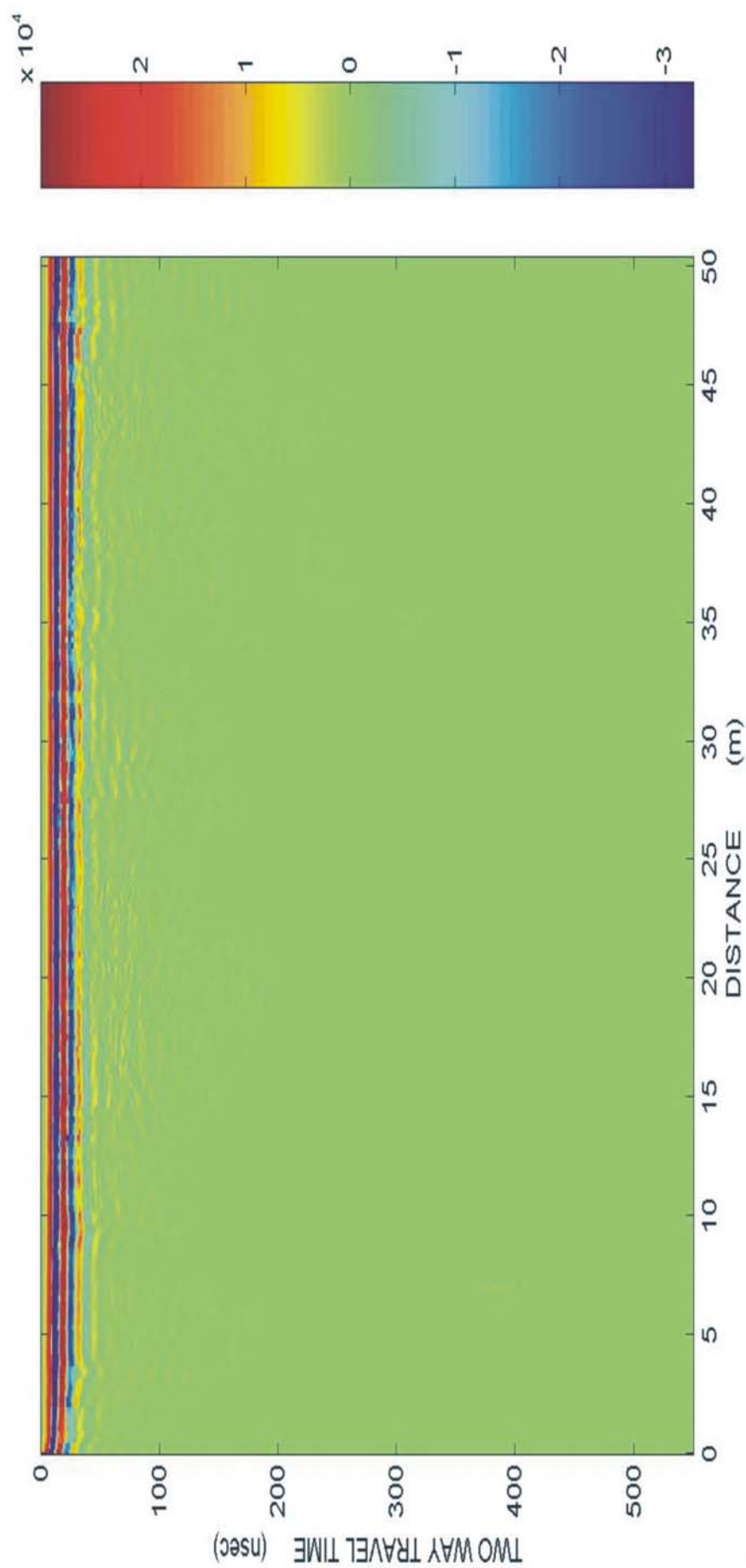
Το επόμενο βήμα της επεξεργασίας είναι η εφαρμογή του φίλτρου διόρθωσης Dewow το οποίο δεν διαφοροποιεί αισθητά την εικόνα. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η εικόνα από την επεξεργασία του φίλτρου στη δεύτερη γραμμή μελέτης.

Στη συνέχεια ακολουθεί η εφαρμογή του φίλτρου ενίσχυσης AGC με παράθυρο μήκους 3nsec. Για την καλύτερη απόδοση της εικόνας επιλέχτηκε η χρωματική κλίμακα του γκρι. Εύκολα παρατηρείται ότι το φίλτρο AGC εμφανίζει λεπτομέρειες και στο υπόλοιπο κομμάτι των εικόνων των αρχικών δεδομένων.

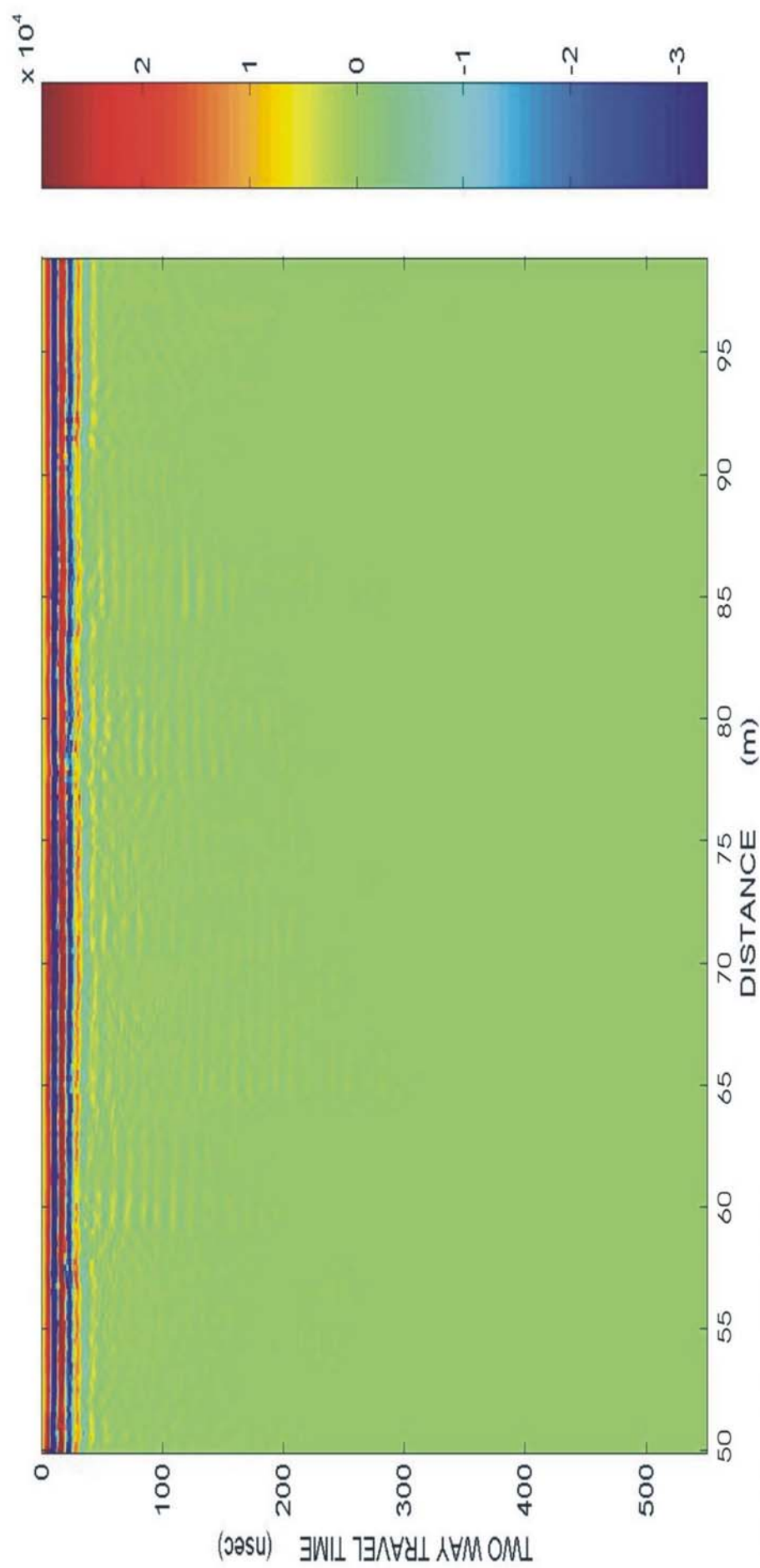
Αμέσως μετά το φίλτρο ενίσχυσης πραγματοποιήθηκε χωροθέτηση των εικόνων. Η ταχύτητα που χρησιμοποιήθηκε για τη χωροθέτηση ήταν η $v = 0,11\text{m/nsec}$. Στις χωροθετημένες εικόνες παρατηρείται ότι έχουν εξαφανιστεί οι υπερβολικού τύπου καμπύλες, πράγμα που σημαίνει ότι οι περιοχές εκείνες (κίτρινοι κύκλοι) έχουν διορθωθεί, και οι ανακλαστήρες διακρίνονται ευκολότερα.

Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της αποσυνέλιξης και συγκρίθηκαν οι χωροθετημένες εικόνες με και χωρίς αποσυνέλιξη. Για τους παραμέτρους της αποσυνέλιξης τέθηκαν οι εξής τιμές: μήκος φίλτρου 15nsec, απόσταση πρόβλεψης 20nsec, λευκός θόρυβος 1%. Τα επόμενα στάδια της επεξεργασίας πραγματοποιήθηκαν όμως στις χωροθετημένες εικόνες χωρίς τη διαδικασία της αποσυνέλιξης. Από τη σύγκριση των εικόνων προκύπτει ότι στις εικόνες μετά την αποσυνέλιξη τονίζονται περισσότερο οι ανακλαστήρες, λόγω του ότι τονίζεται το υψίσυχνο τμήμα της καταγραφής.

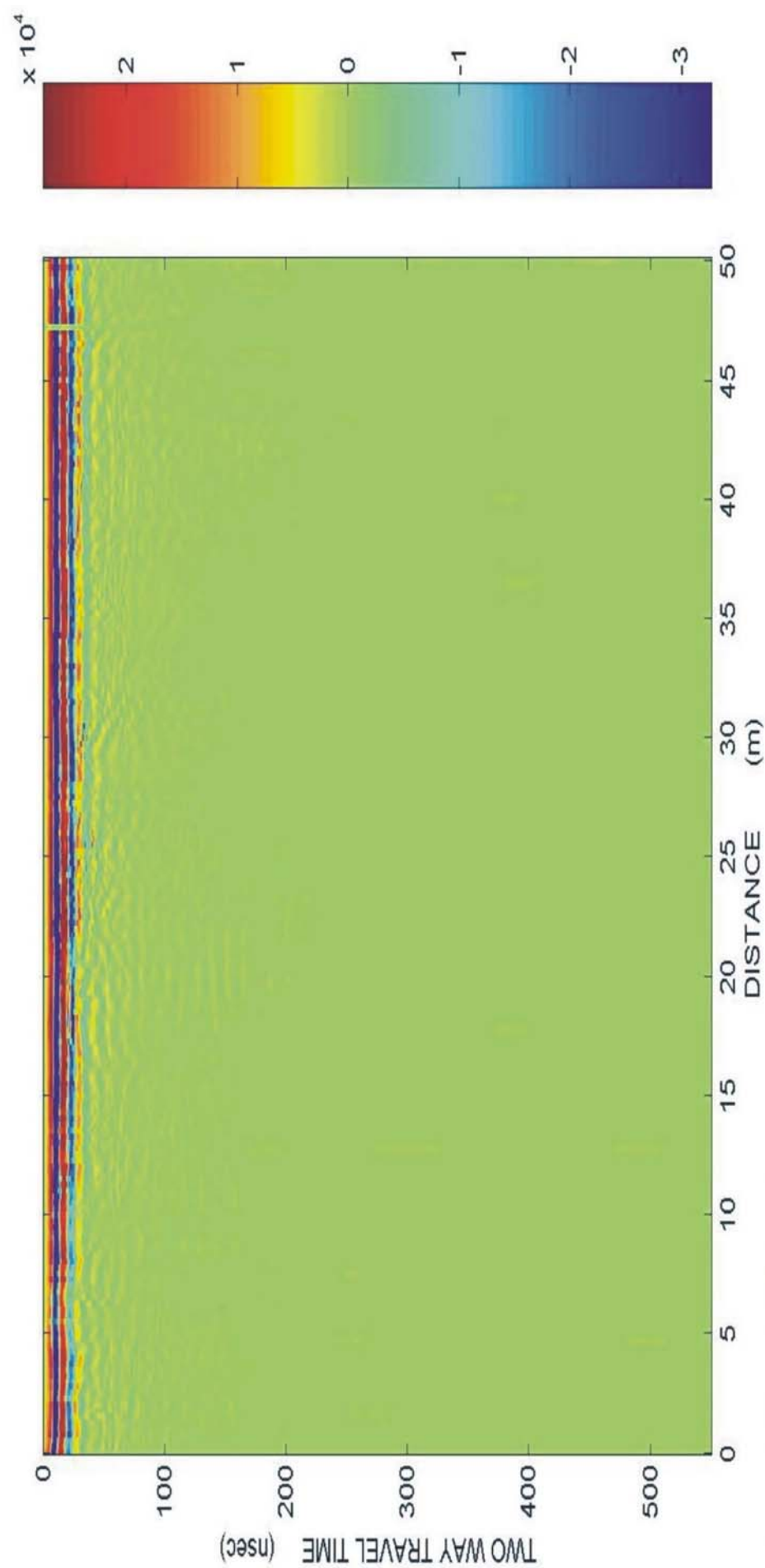
Αρχικές Εικόνες



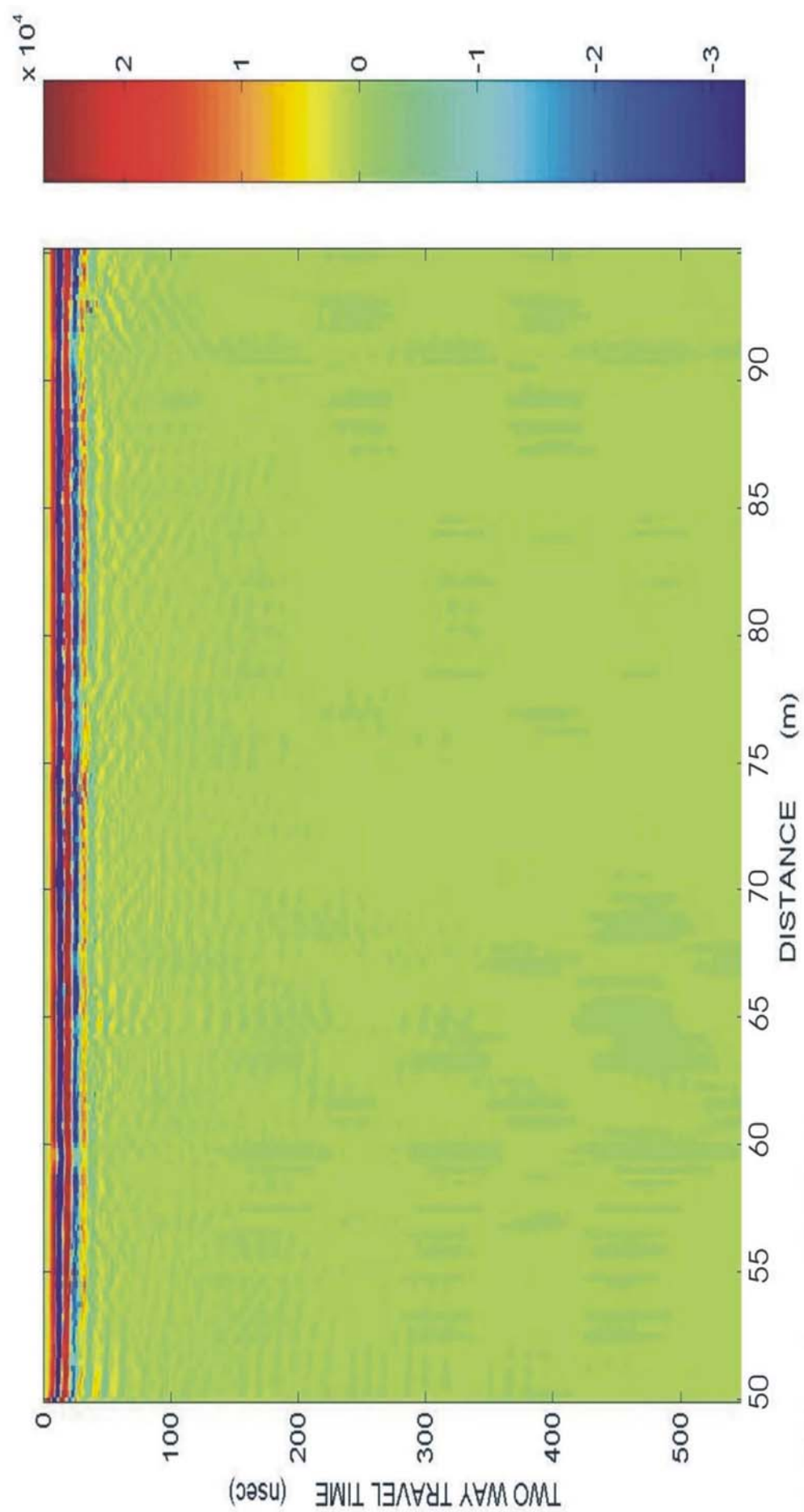
Σχ.5.3 Πρώτο μέρος της αρχικής εικόνας των δεδομένων της δεύτερης γραμμής μελέτης



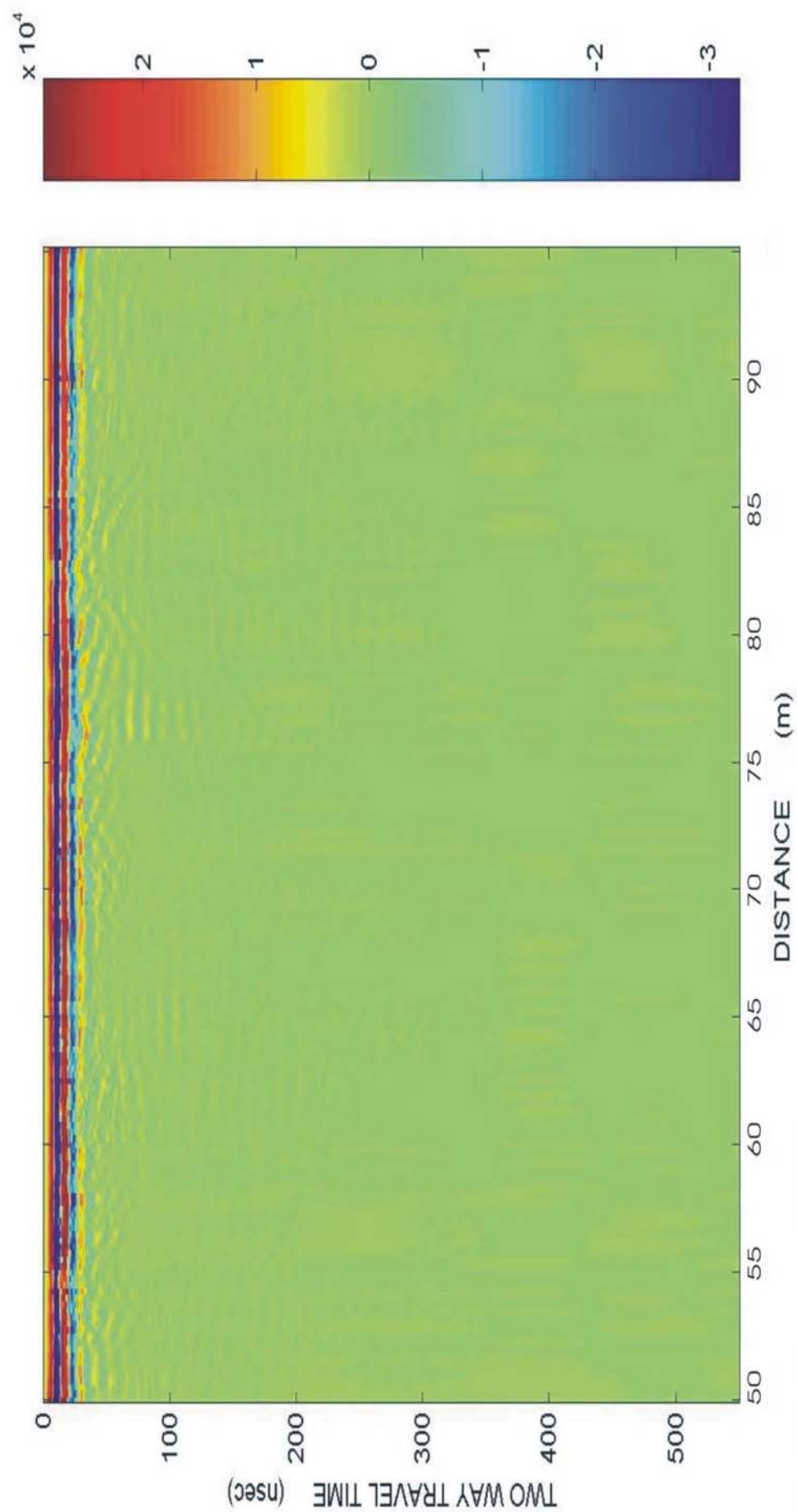
Σχ.5.4 Δεύτερο μέρος της αρχικής εικόνας των δεδομένων της δεύτερης γραμμής μελέτης



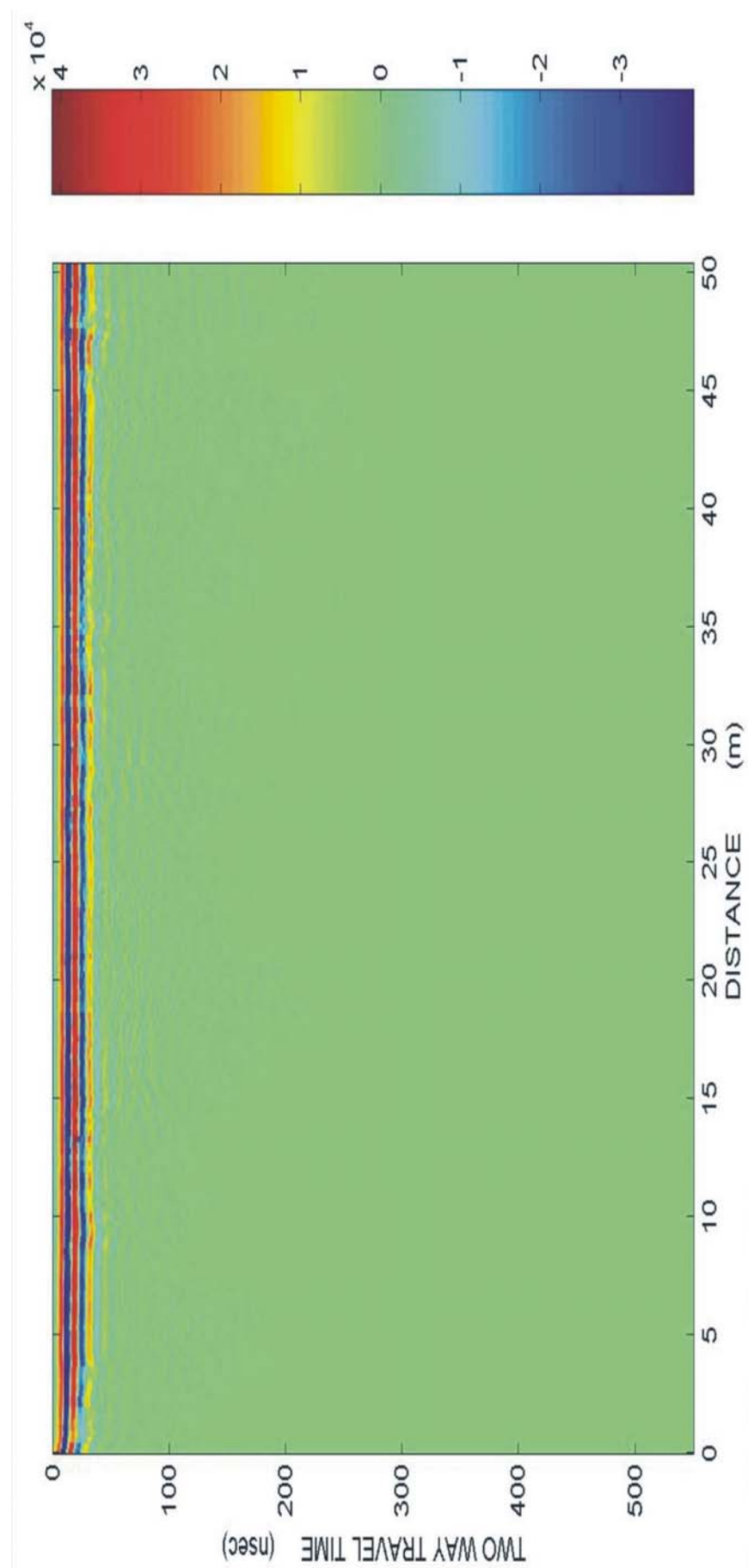
Σχ.5.5 Πρώτο μέρος της αρχικής εικόνας των δεδομένων της τρίτης γραμμής μελέτης



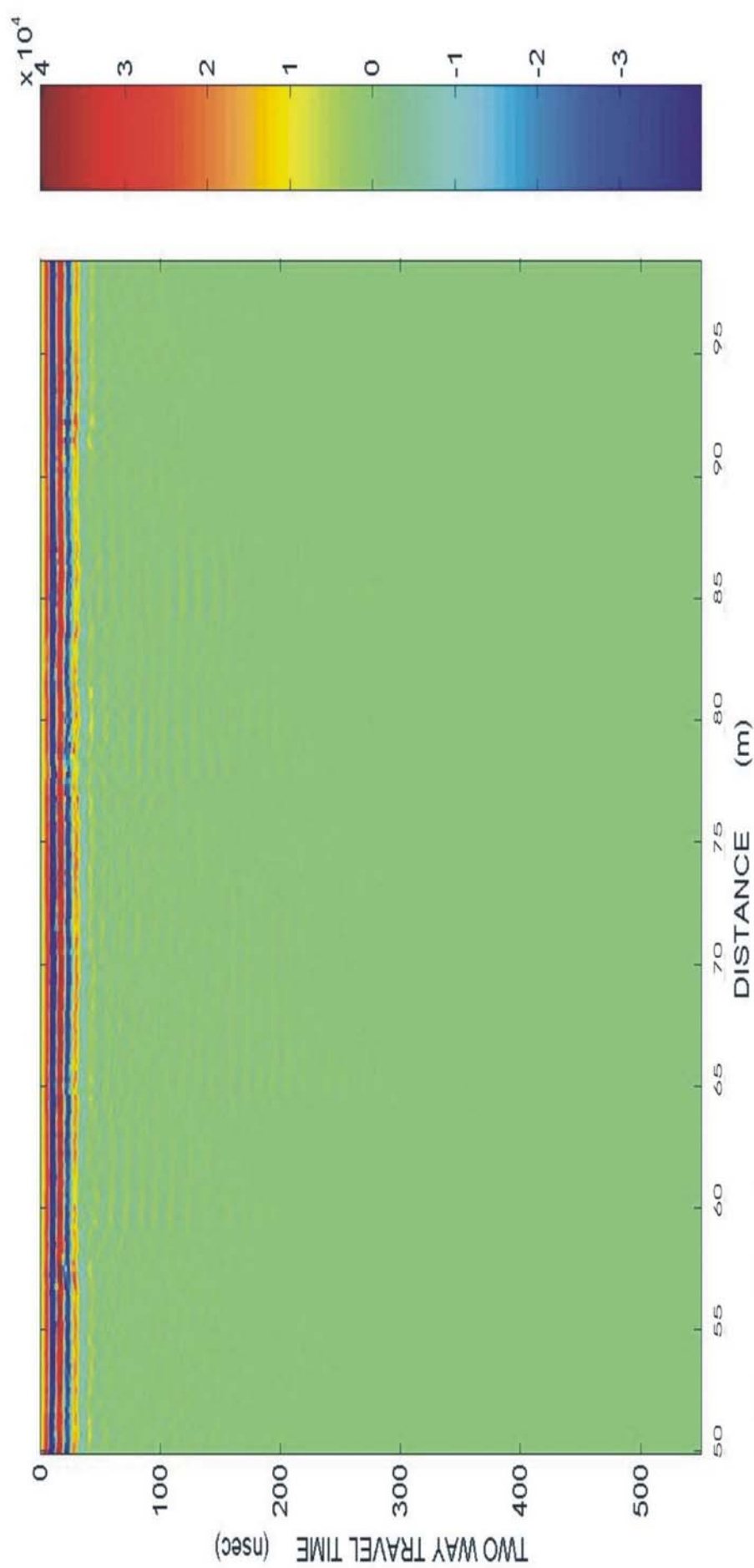
Σχ.5.6 Δεύτερο μέρος της αρχικής εικόνας των δεδομένων της τρίτης γραμμής μελέτης



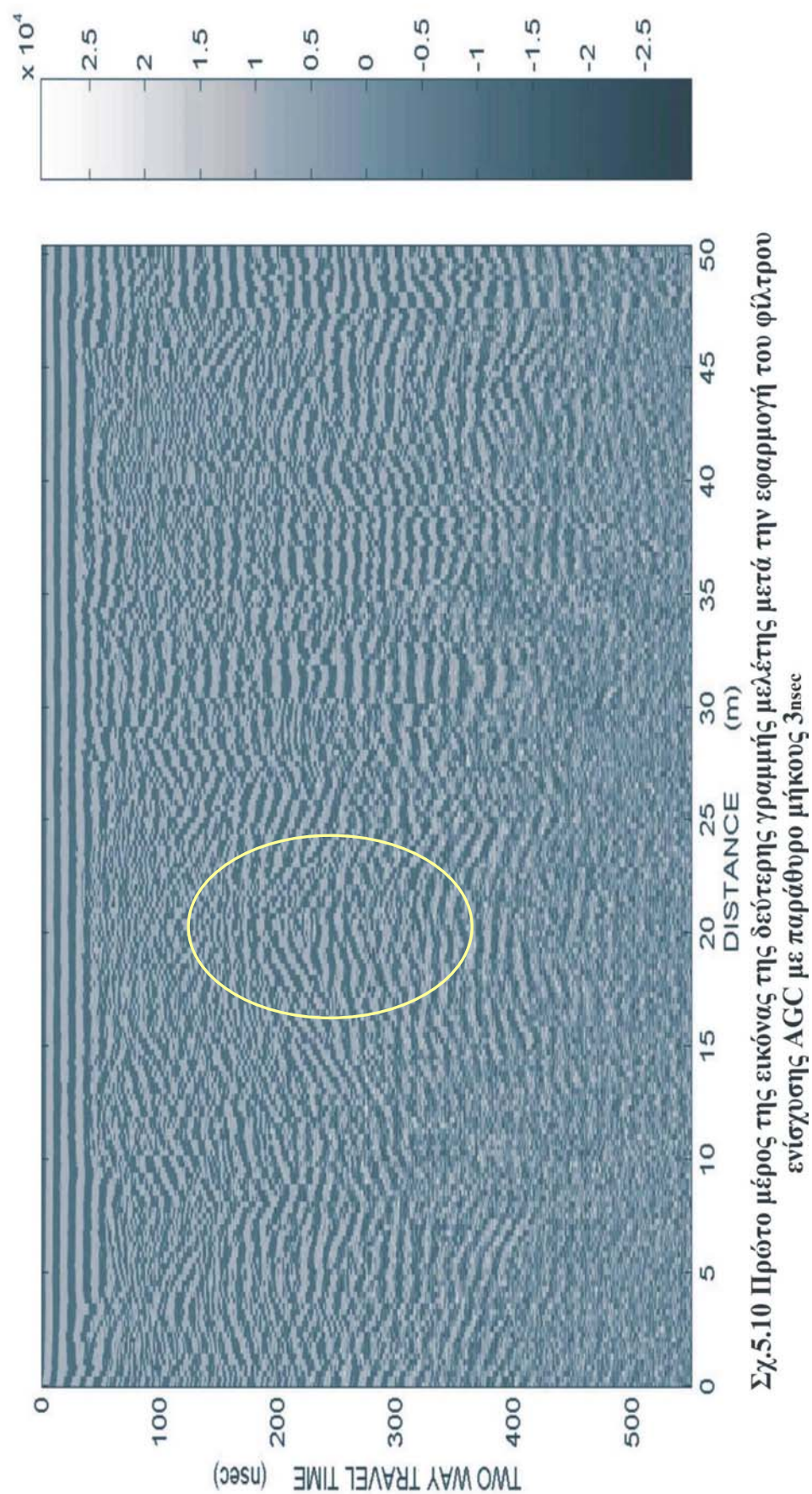
Σχ.5.7 Αρχική εικόνα των δεδομένων της τέταρτης γραμμής μελέτης

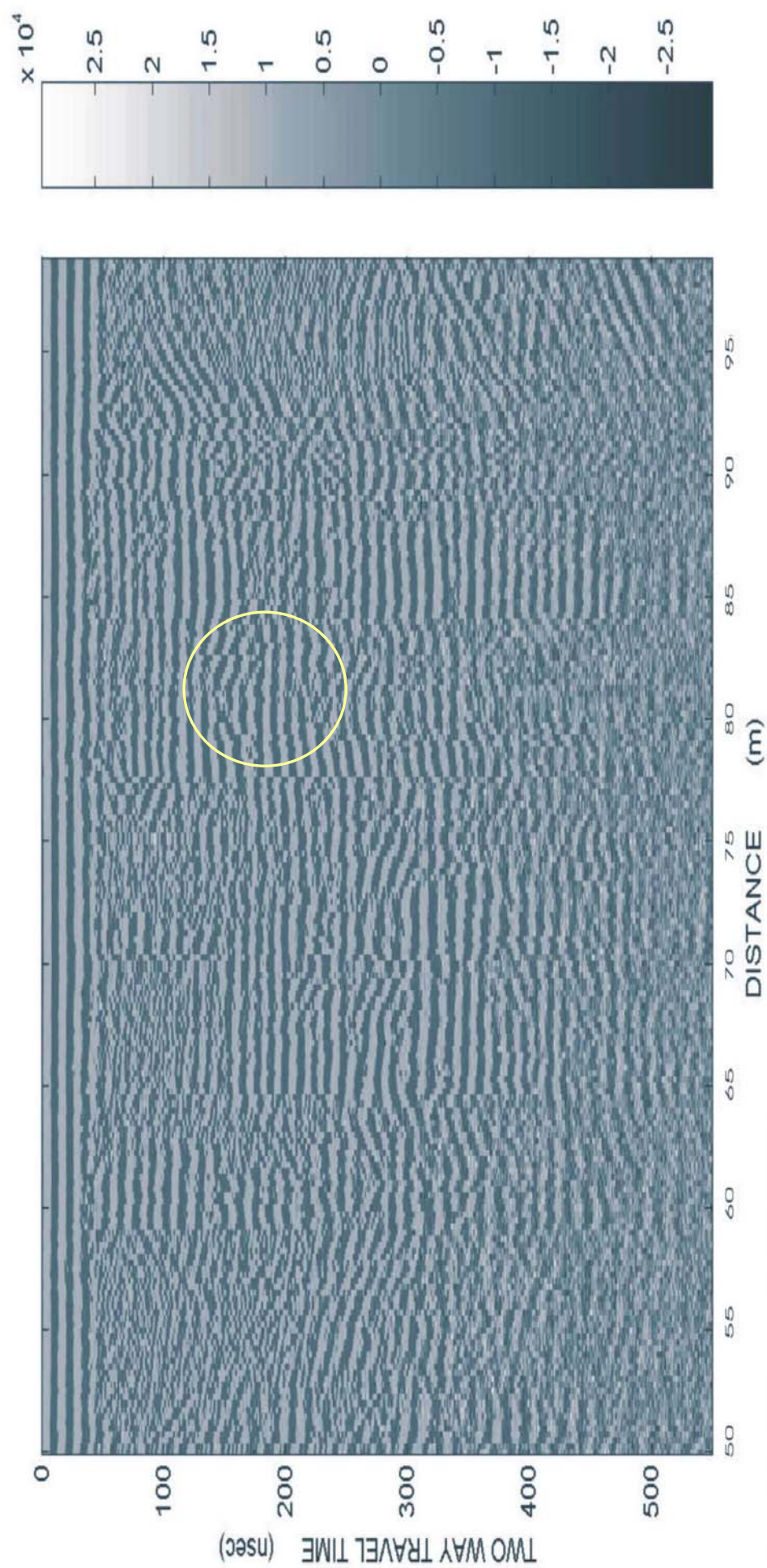
Εικόνες μετά το φίλτρο Dewow

Σχ.5.8 Πρώτο μέρος της εικόνας της δεύτερης γραμμής μελέτης με την εφαρμογή του φίλτρου Dewow

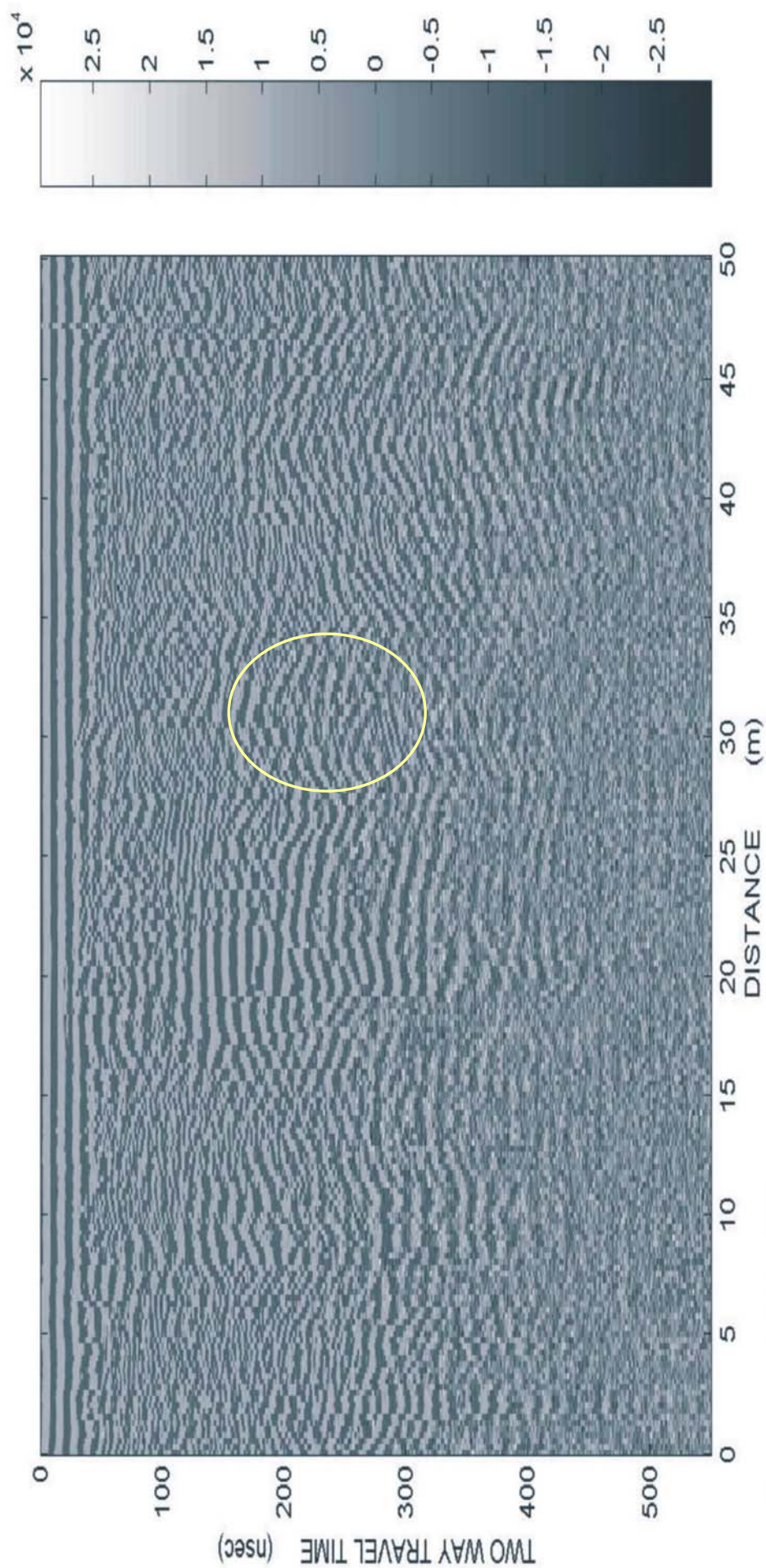


Σχ.5.9 Δεύτερο μέρος της εικόνας της δεύτερης γραμμής μελέτης με την εφαρμογή του φίλτρου Dewow

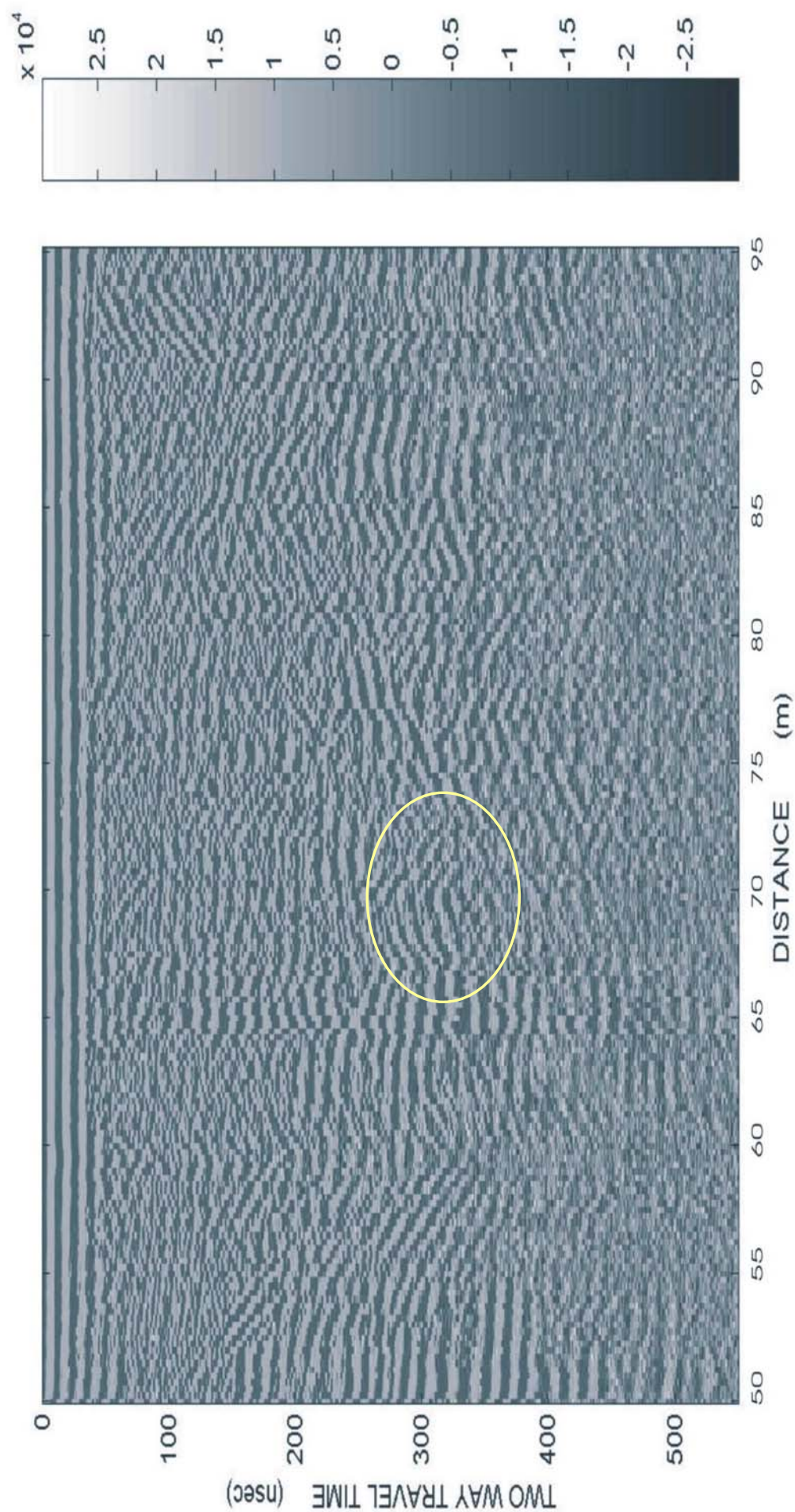
Εικόνες μετά το φίλτρο AGC



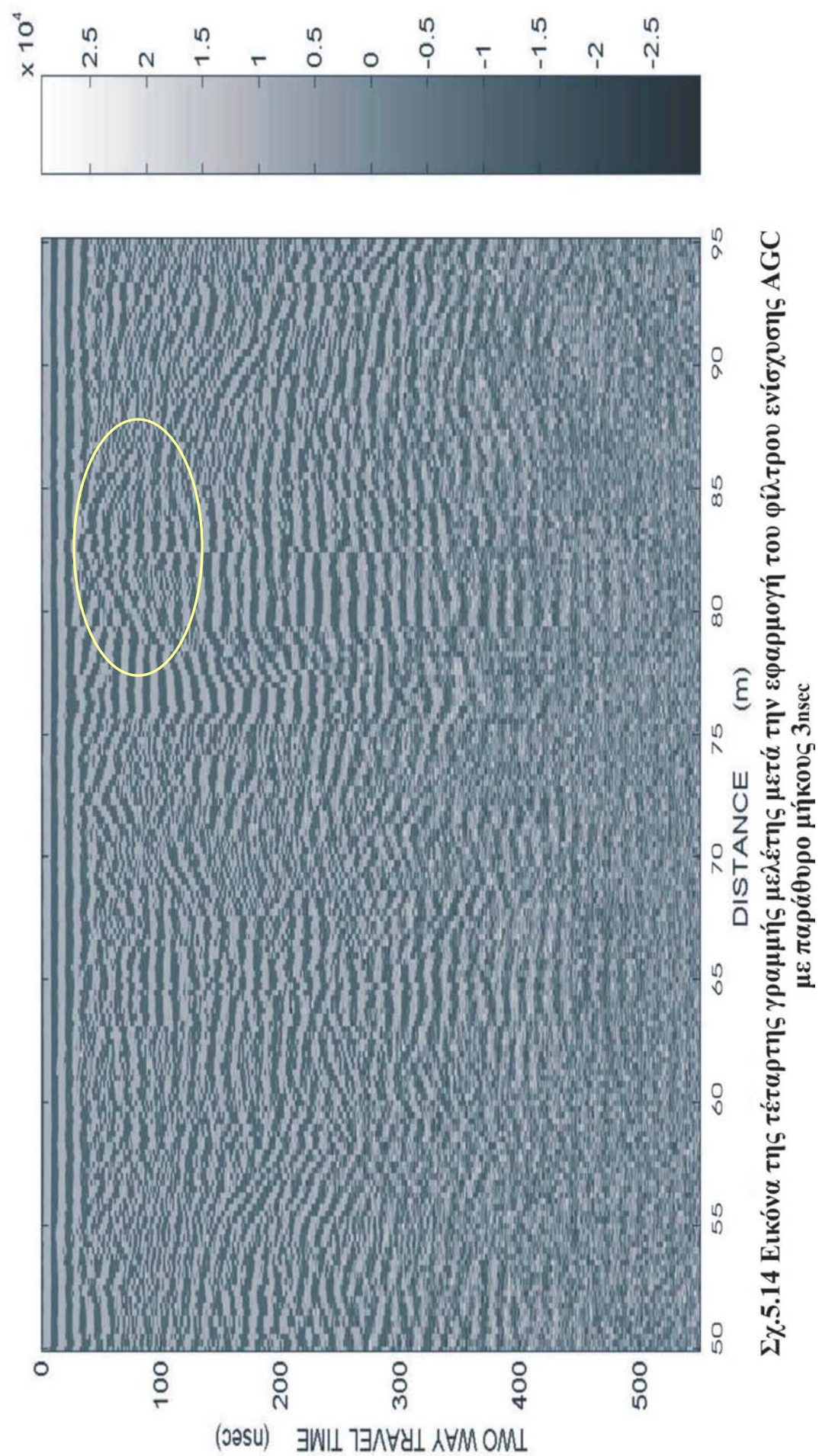
Σχ.5.11 Δεύτερο μέρος της εικόνας της δεύτερης γραμμής μελέτης μετά την εφαρμογή του φίλτρου ενίσχυσης AGC με παράθυρο μήκους 3nsec



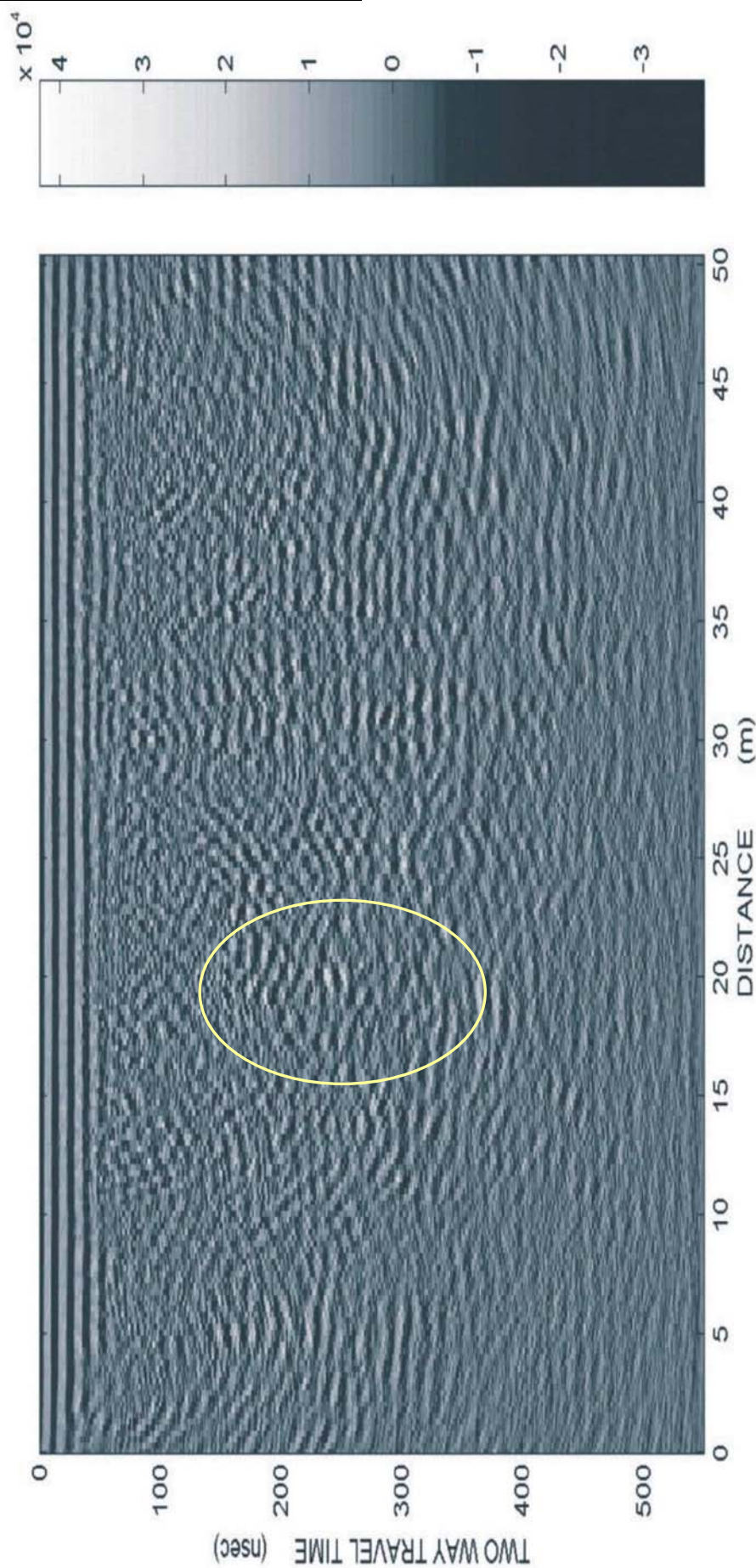
Σχ.5.12 Πρότο μέρος της εικόνας της τρίτης γραμμής μελέτης μετά την εφαρμογή του φίλτρου ενίσχυσης AGC με παράθυρο μήκους 3nsec



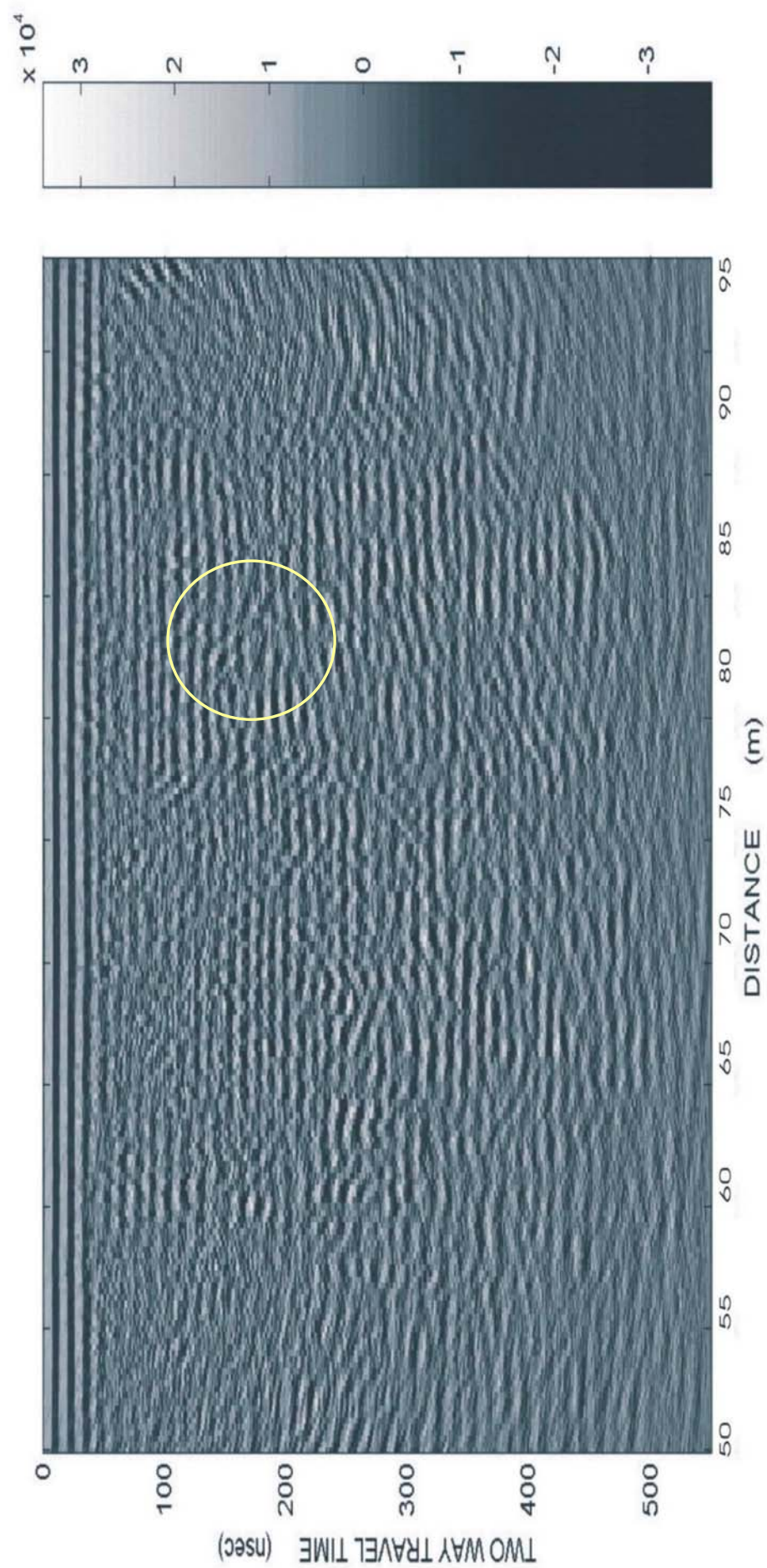
Σχ.5.13 Δεύτερο μέρος της εικόνας της τρίτης γραμμής μελέτης μετά την εφαρμογή του φίλτρου ενίσχυσης AGC με παράθυρο μήκους 3nsec



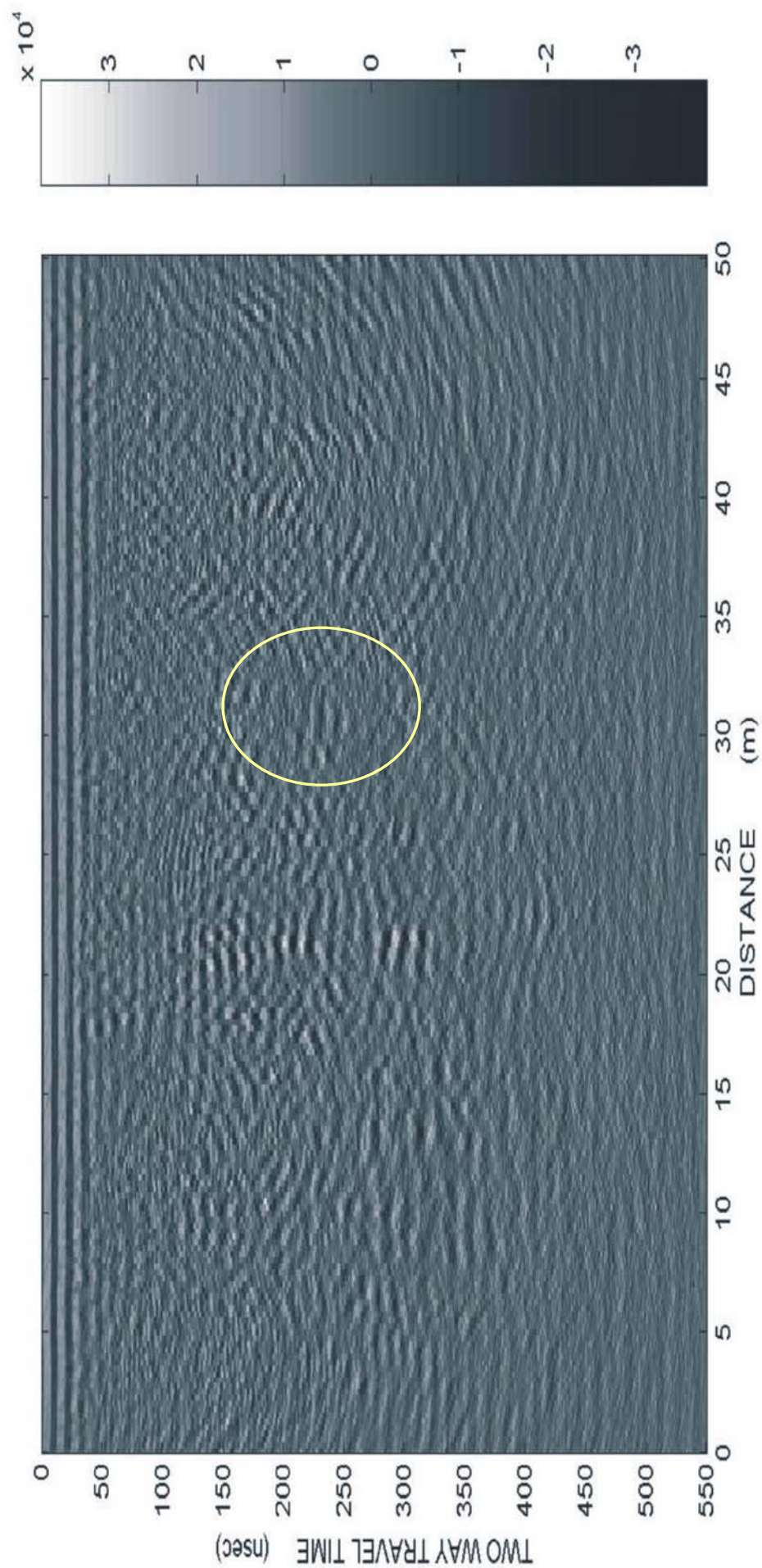
Σχ.5.14 Εικόνα της τέταρτης γραμμής μελέτης μετά την εφαρμογή του φίλτρου ενίσχυσης AGC με παράθυρο μήκους 3nsec

Εικόνες μετά τη χωροθέτηση f-k

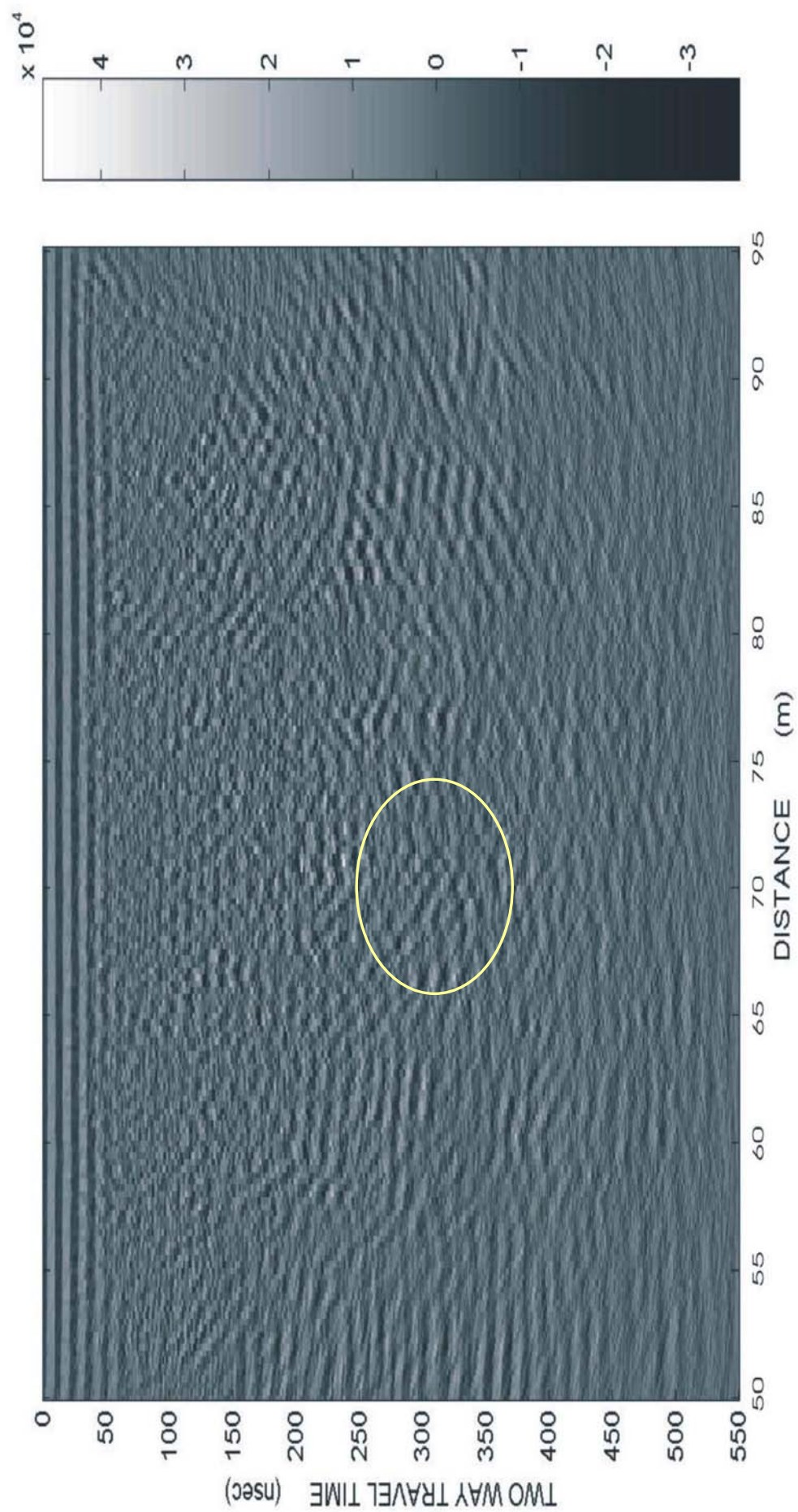
Σχ.5.15 Πρώτο μέρος της χωροθετημένης εικόνας της δεύτερης γραμμής μελέτης



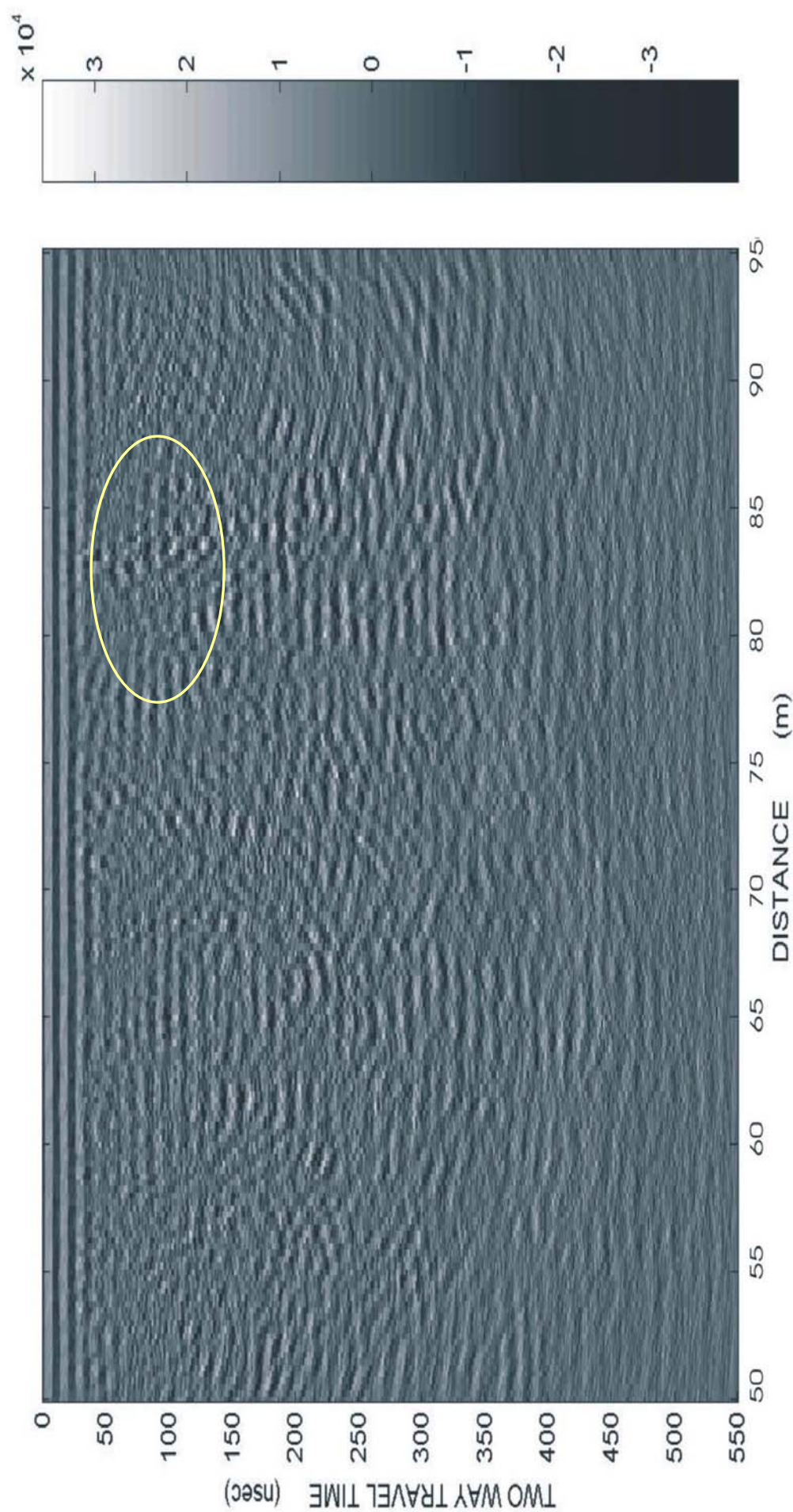
Σχ.5.16 Δεύτερο μέρος της χωροθετημένης εικόνας της δεύτερης γραμμής μελέτης



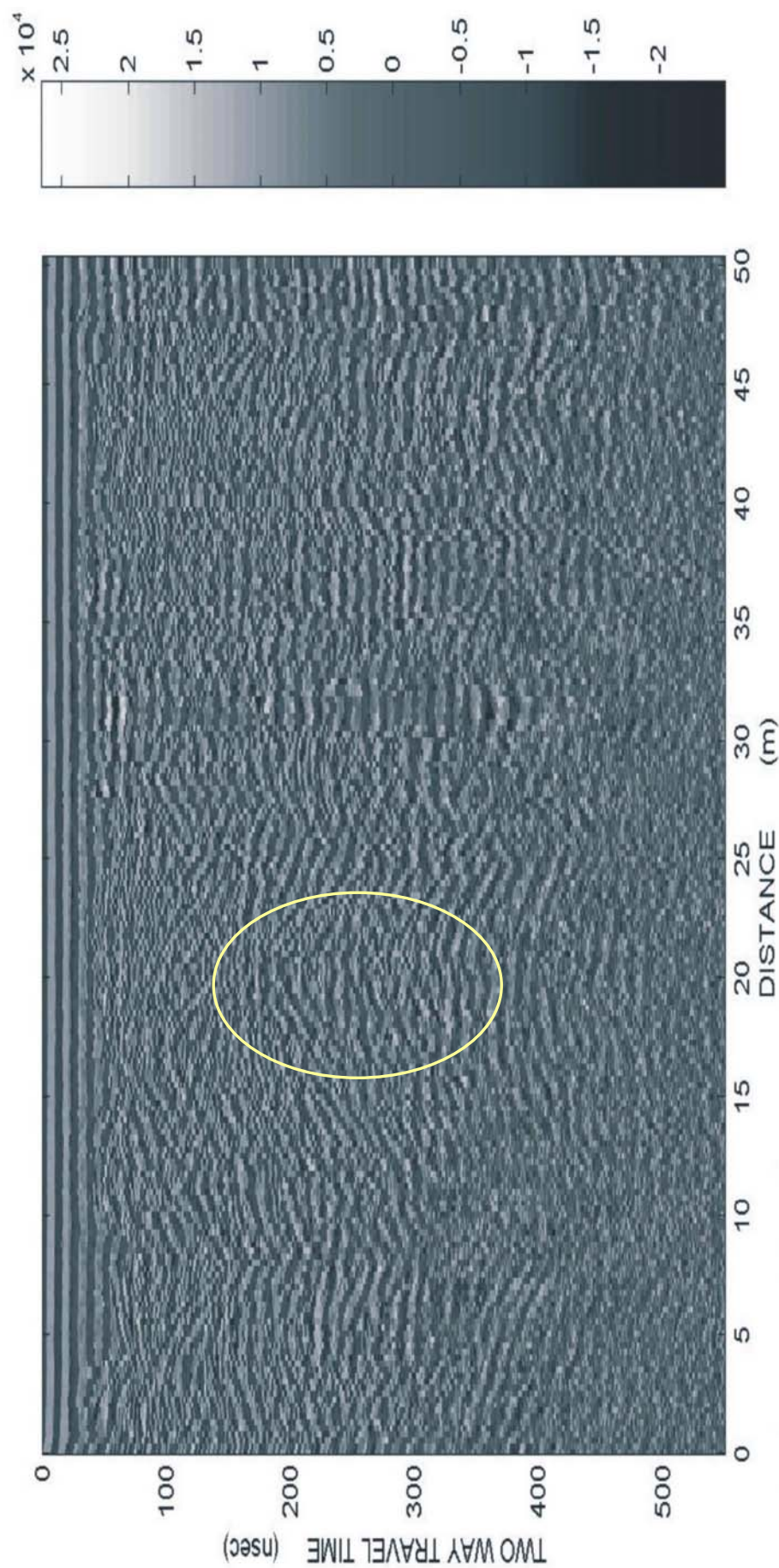
Σχ.5.17 Πρότο μέρος της χωροθετημένης εικόνας της τρίτης γραμμής μελέτης



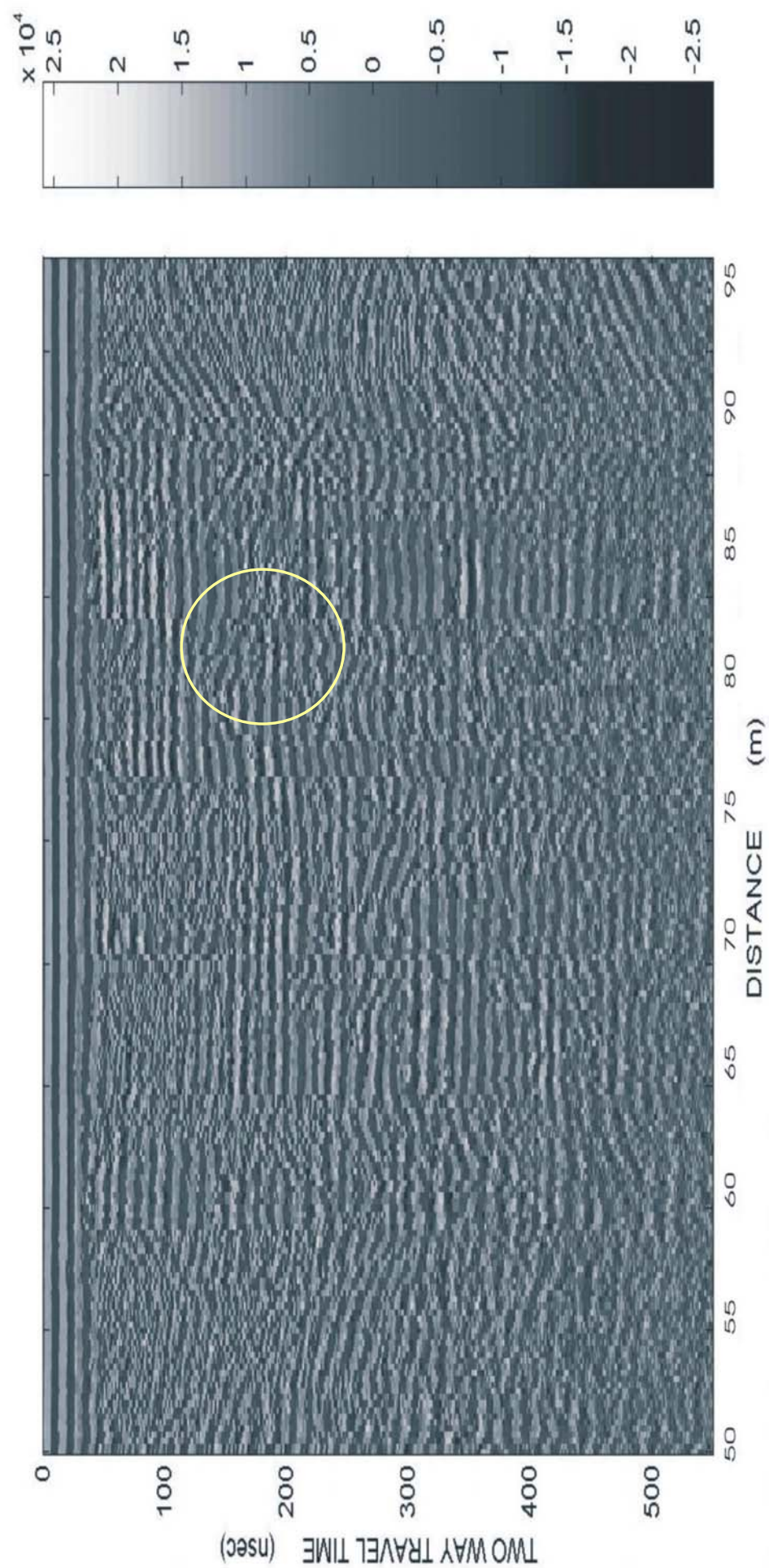
Σχ.5.18 Δεύτερο μέρος της χωροθετημένης εικόνας της τρίτης γραμμής μελέτης



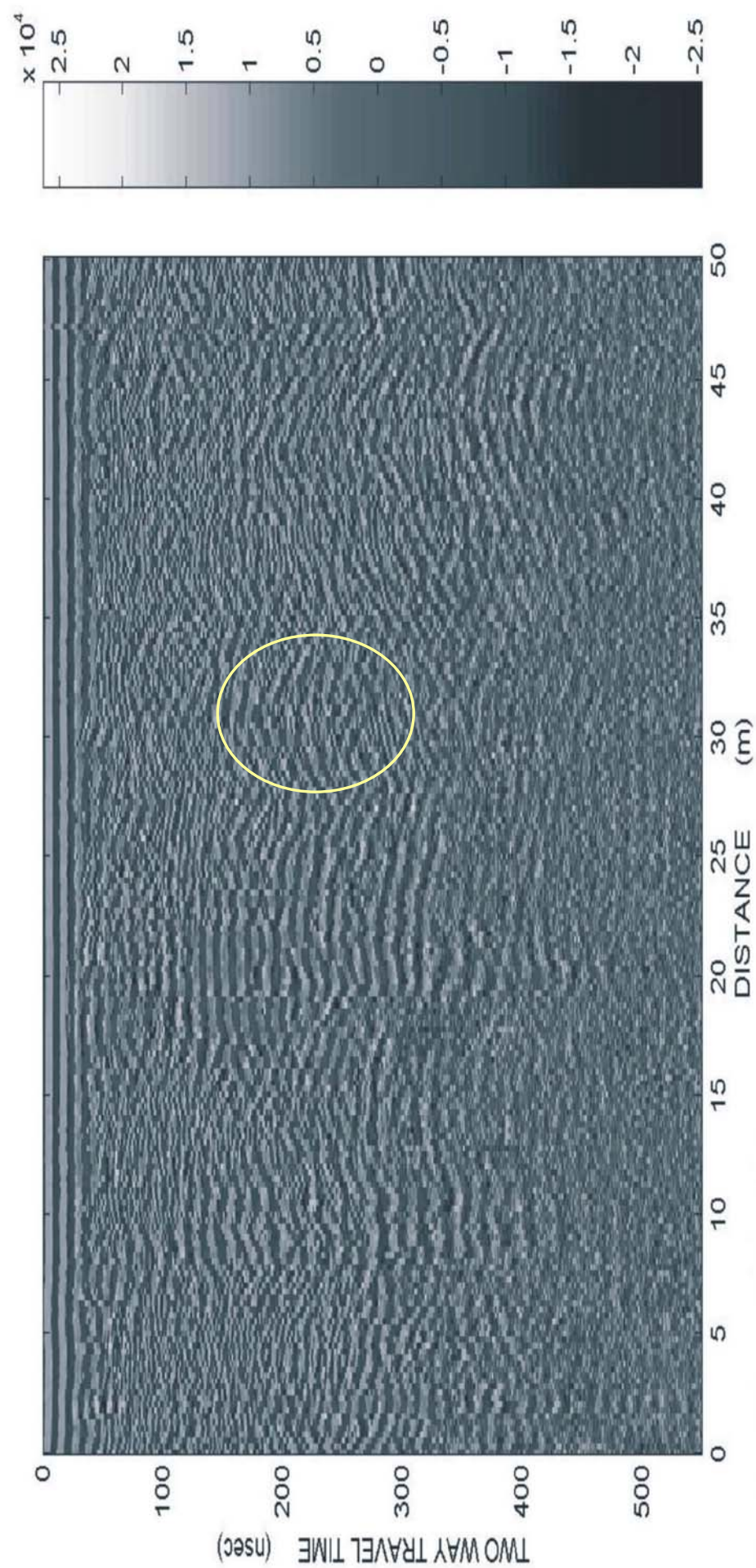
Σχ.5.19 Χωροθετημένη εικόνα της τέταρτης γραμμής μελέτης

Εικόνες μετά της αποσυνέλιξη πρόβλεψης

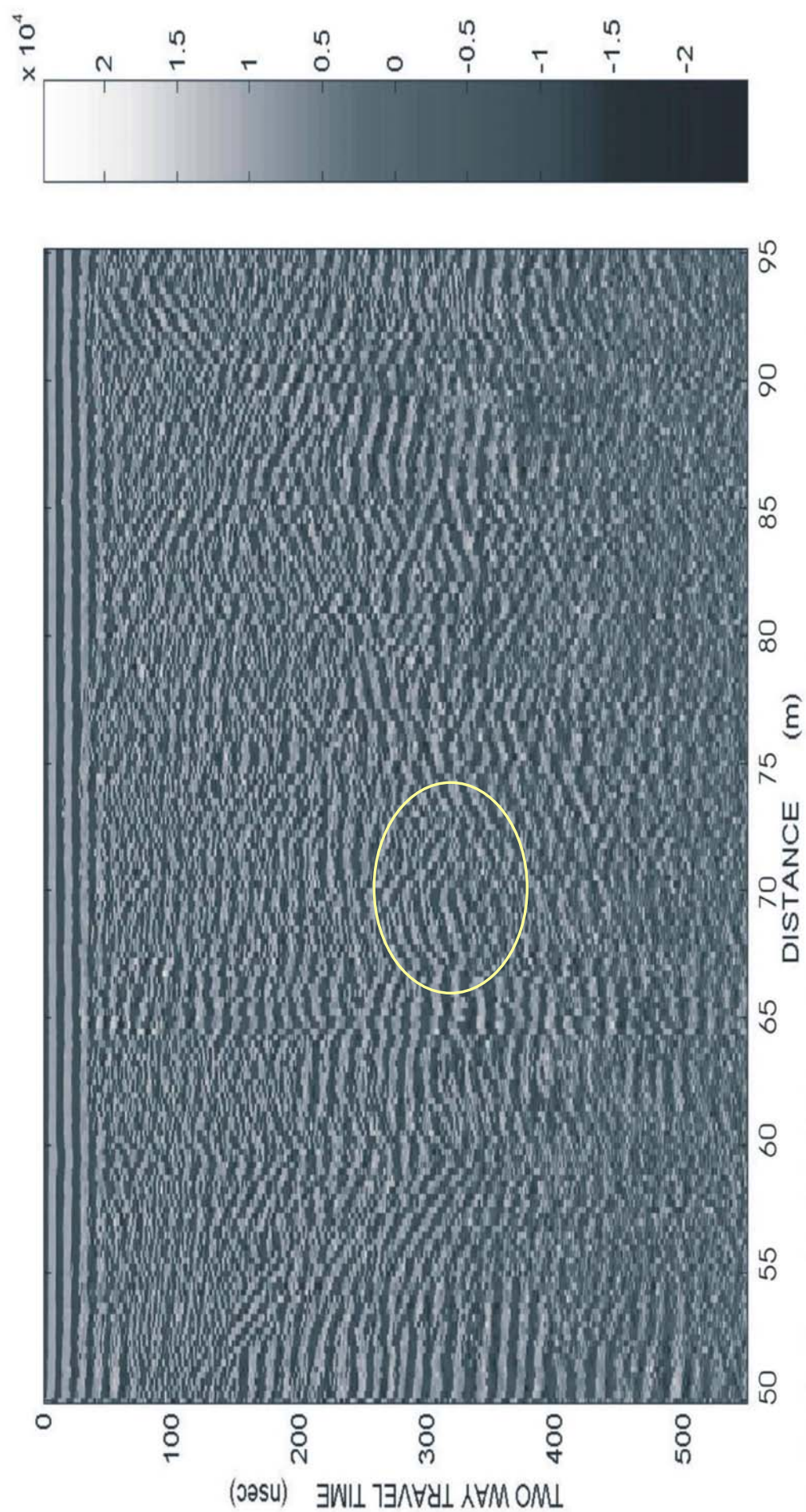
Σχ.5.20 Πρώτο μέρος της αποσυνέλιξης της χωροθετημένης εικόνας της δεύτερης γραμμής μελέτης



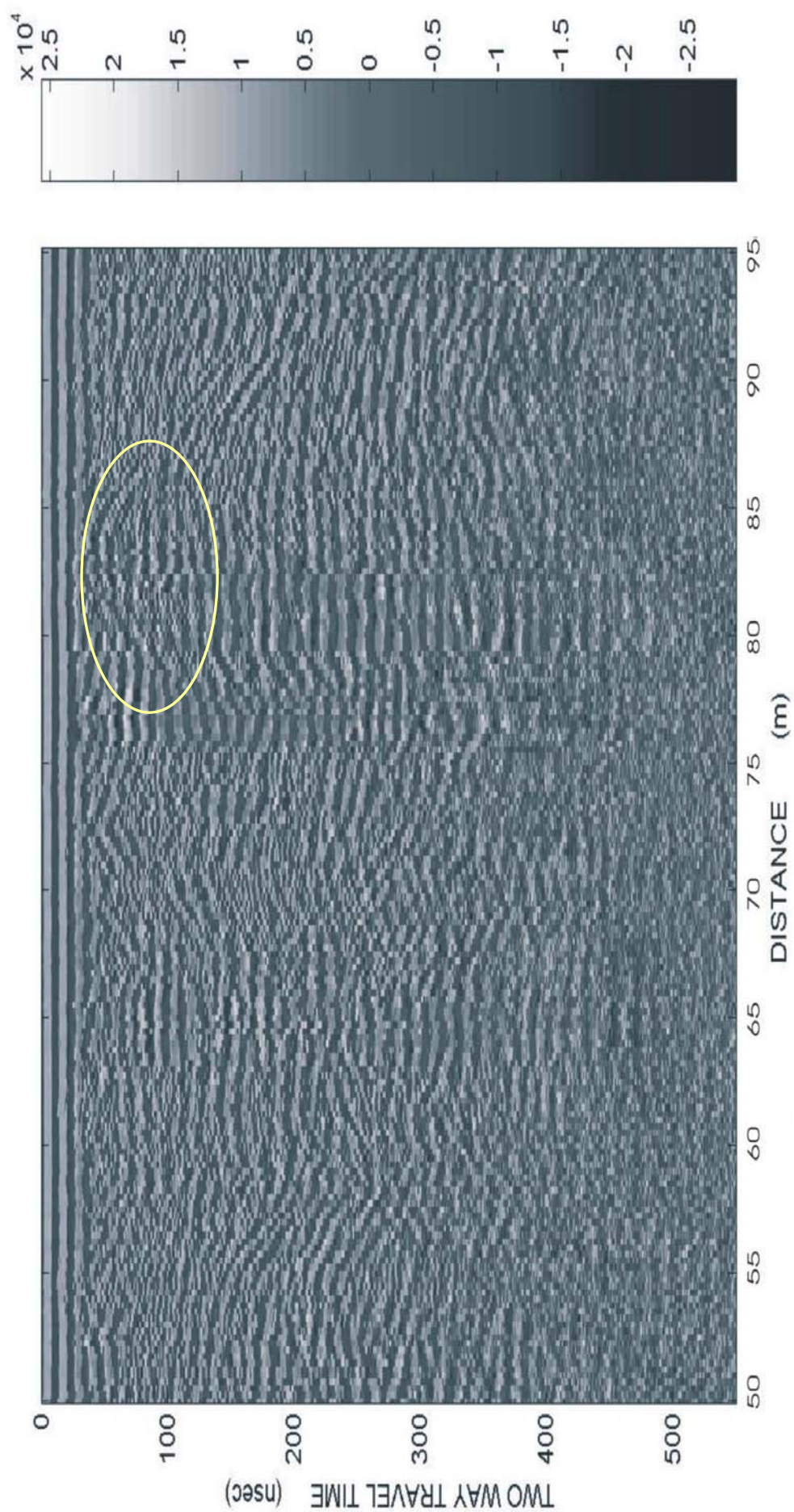
Σχ.5.21 Δεύτερο μέρος της αποσυνέλιξης της χωροθετημένης εικόνας της δεύτερης γραμμής μελέτης



Σχ.5.22 Πρώτο μέρος της αποσυνέλιξης της χωροθετημένης εικόνας της τρίτης γραμμής μελέτης



Σχ.5.23 Δεύτερο μέρος της αποσυνέλιξης της χωροθετημένης εικόνας της τρίτης γραμμής μελέτης



Σχ.5.24 Αποσυνέλιξη της χωροθετημένης εικόνας της τέταρτης γραμμής μελέτης

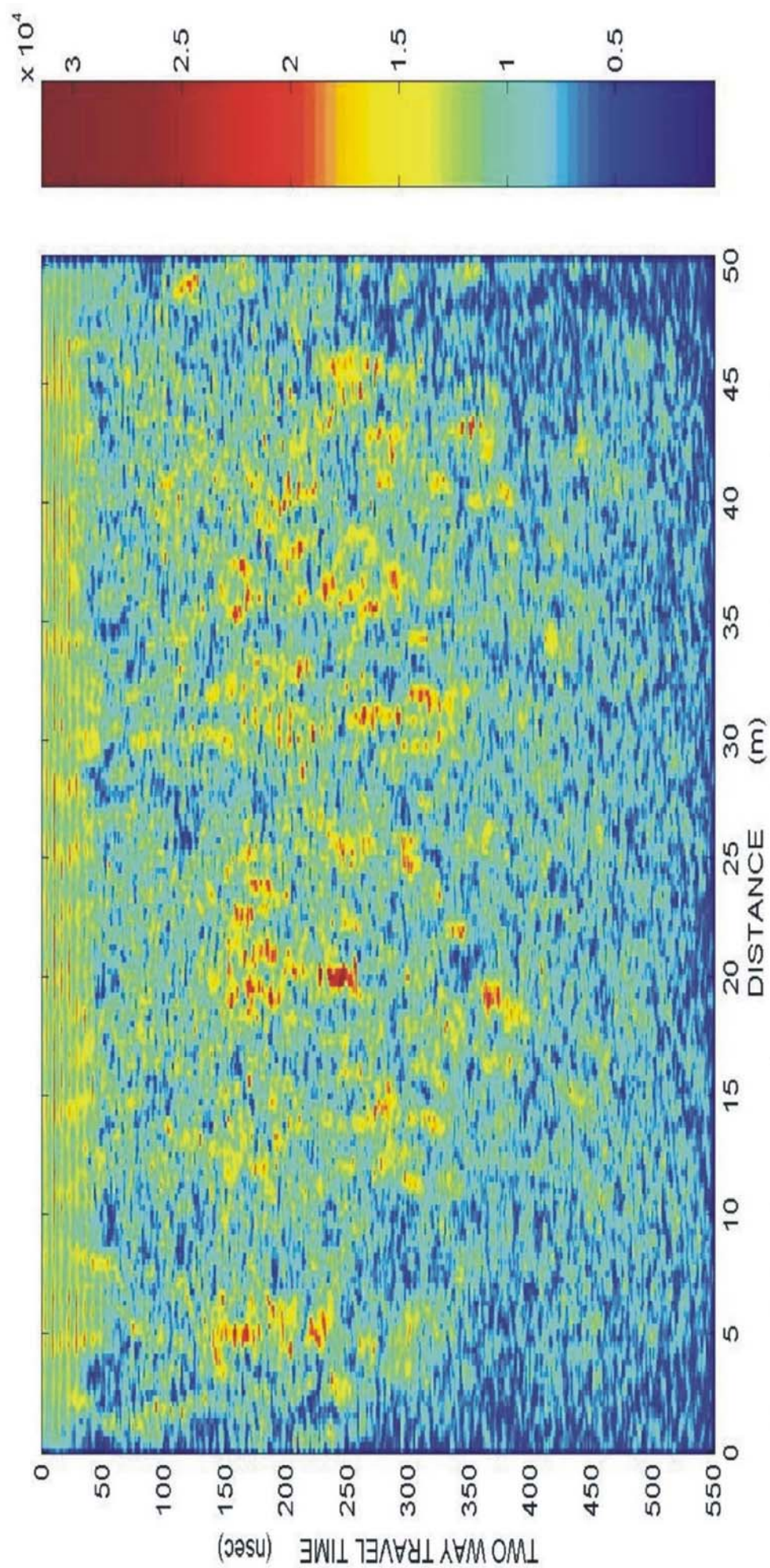
Εικόνες των μιγαδικών χαρακτηριστικών

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εικόνες από τα μιγαδικά χαρακτηριστικά των δεδομένων. Τα μιγαδικά χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν σε αυτήν την εργασία είναι το στιγμιαίο πλάτος, το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB, η στιγμιαία φάση, η γρήγορη στιγμιαία συχνότητα, η συνάφεια και η συνάφεια της στιγμιαίας φάσης. Στις εικόνες των μιγαδικών χαρακτηριστικών έχει εφαρμοστεί το φίλτρο μέσης τιμής με παράθυρο διάρκειας 3nsec.

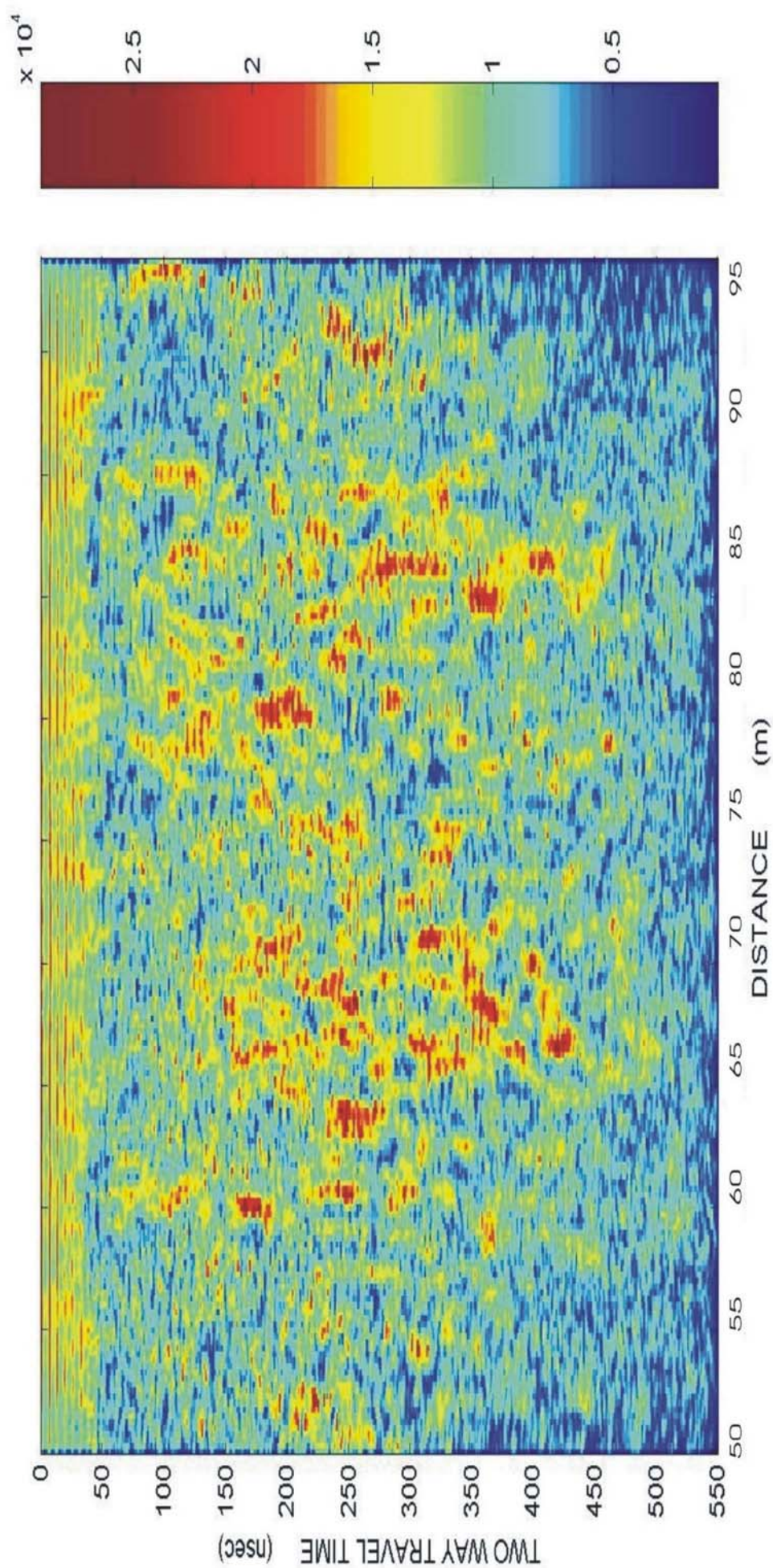
Στις εικόνες του στιγμιαίου πλάτους (Σχ.5.25 – 5.29) παρατηρείται ότι κυριαρχούν τα ψυχρά χρώματα (μπλε). Εμφανίζονται όμως και κάποιες περιοχές με θερμά χρώματα (κίτρινο – κόκκινο) που σημαίνει την ύπαρξη πλευρικών μεταβολών του πλάτους των ανακλώμενων κυμάτων. Στην κλίμακα dB (Σχ.5.30 – 5.34) οι εικόνες κυριαρχούνται από το κόκκινο χρώμα, όμως σε πολλές περιοχές οι τιμές του στιγμιαίου πλάτους είναι χαμηλότερες (κίτρινο). Στις περιοχές που μεταβάλλεται το στιγμιαίο πλάτος συγκεντρώνεται το ενδιαφέρον. Η έλλειψη των κυρίων ανακλαστήρων είναι ένδειξη ότι το πέτρωμα είναι τεκτονισμένο.

Στις εικόνες της στιγμιαίας φάσης (Σχ.5.35 – 5.39) εμφανίζονται έντονα οι ανακλάσεις(οριζόντιες γραμμές). Αυτό οφείλεται στο ότι η στιγμιαία φάση τείνει να ενισχύσει τη συνέχεια των ανακλαστήρων. Οι περιοχές στις οποίες διακόπτονται οι ανακλαστήρες παρουσιάζουν ενδιαφέρον.

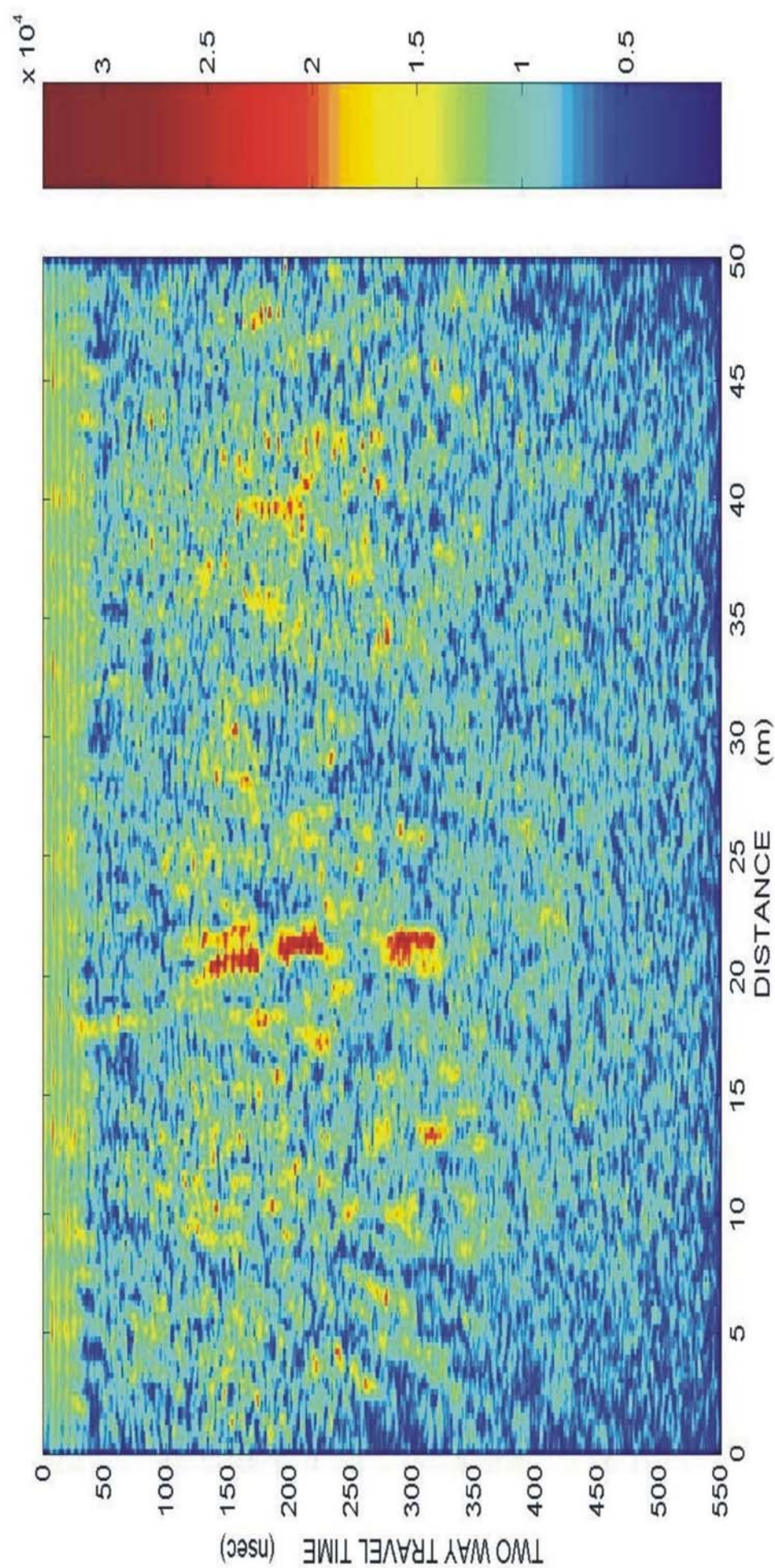
Στις εικόνες της στιγμιαίας συχνότητας (Σχ.5.40 – 5.44) έχει εφαρμοστεί φίλτρο μέσης τιμής με παράθυρο διάρκειας 2nsec αντί των 3 nsec λόγω του ότι παρατηρήθηκε ότι με παράθυρο διάρκειας 3nsec χανόταν πληροφορία από την εικόνα. Οι εικόνες έχουν περίπου την ίδια μορφή με αυτές της στιγμιαίας φάσης. Και εδώ το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στις περιοχές που διακόπτεται η οριζόντια συνέχεια των ανακλαστήρων.



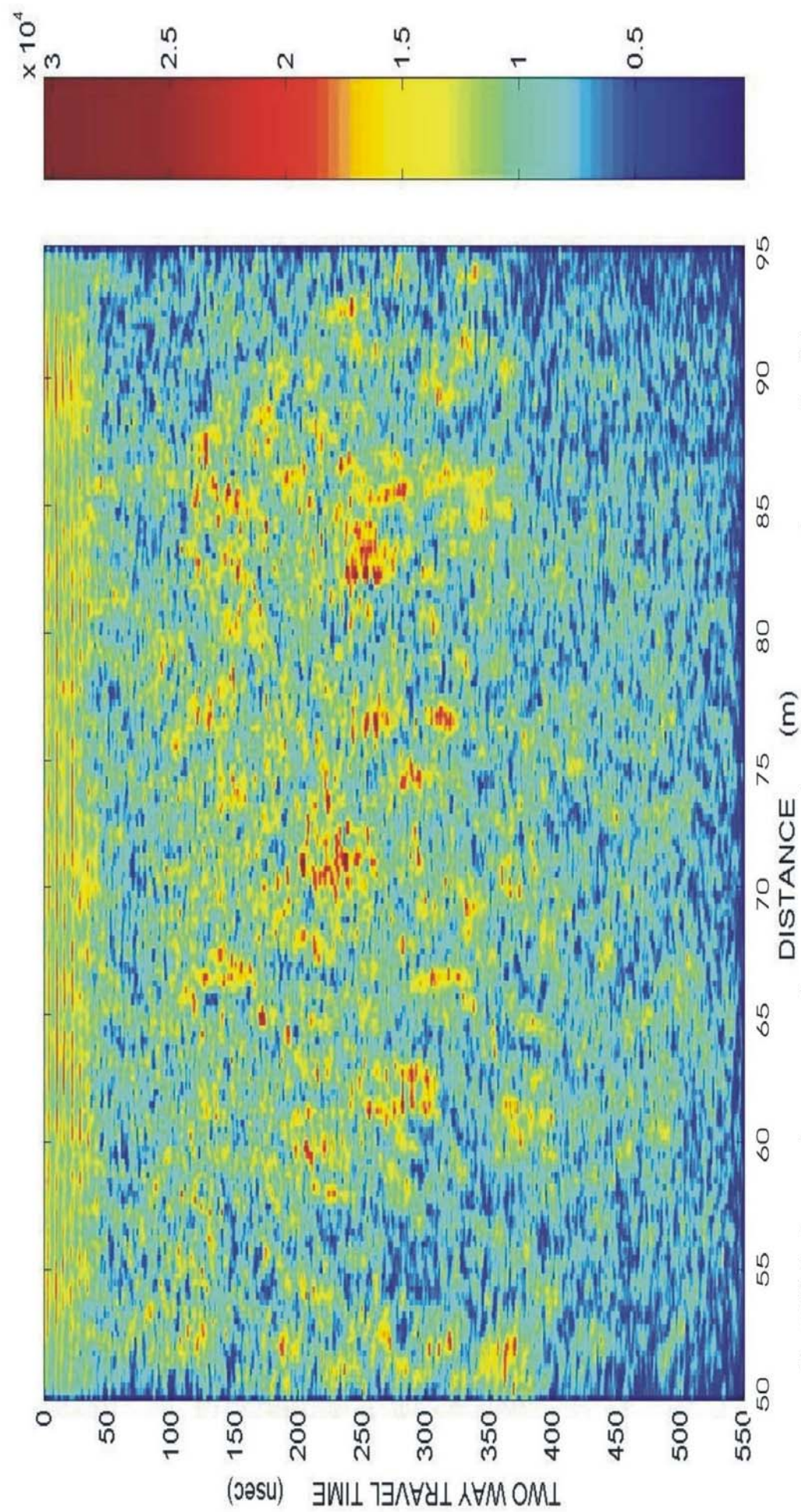
Σχ.5.25 Πρώτο μέρος της εικόνας του στιγμιαίου πλάτους για τη δεύτερη γραμμή μελέτης



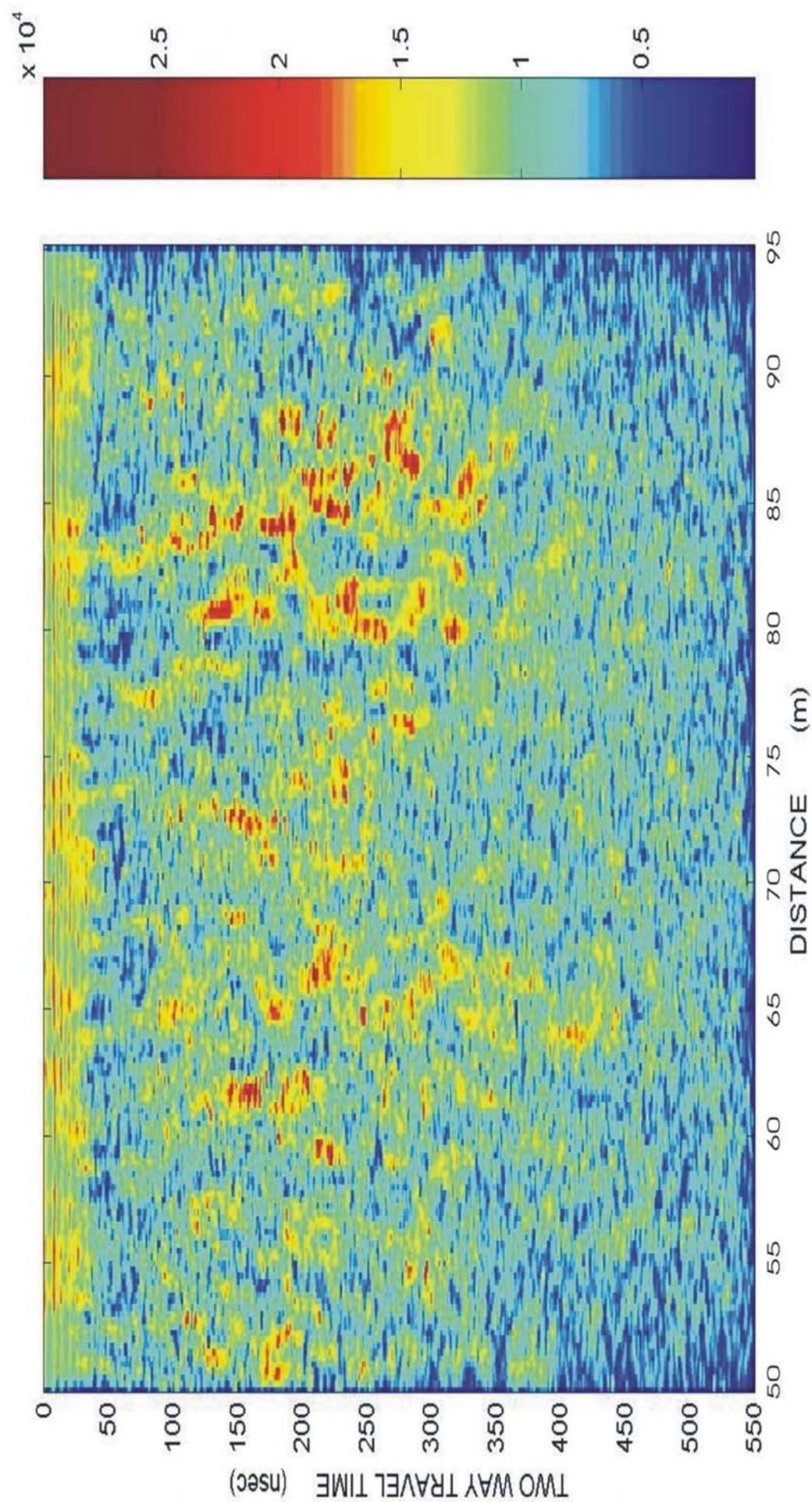
Σχ.5.26 Δεύτερο μέρος της εικόνας του στιγμιαίου πλάτους για τη δεύτερη γραμμή μελέτης



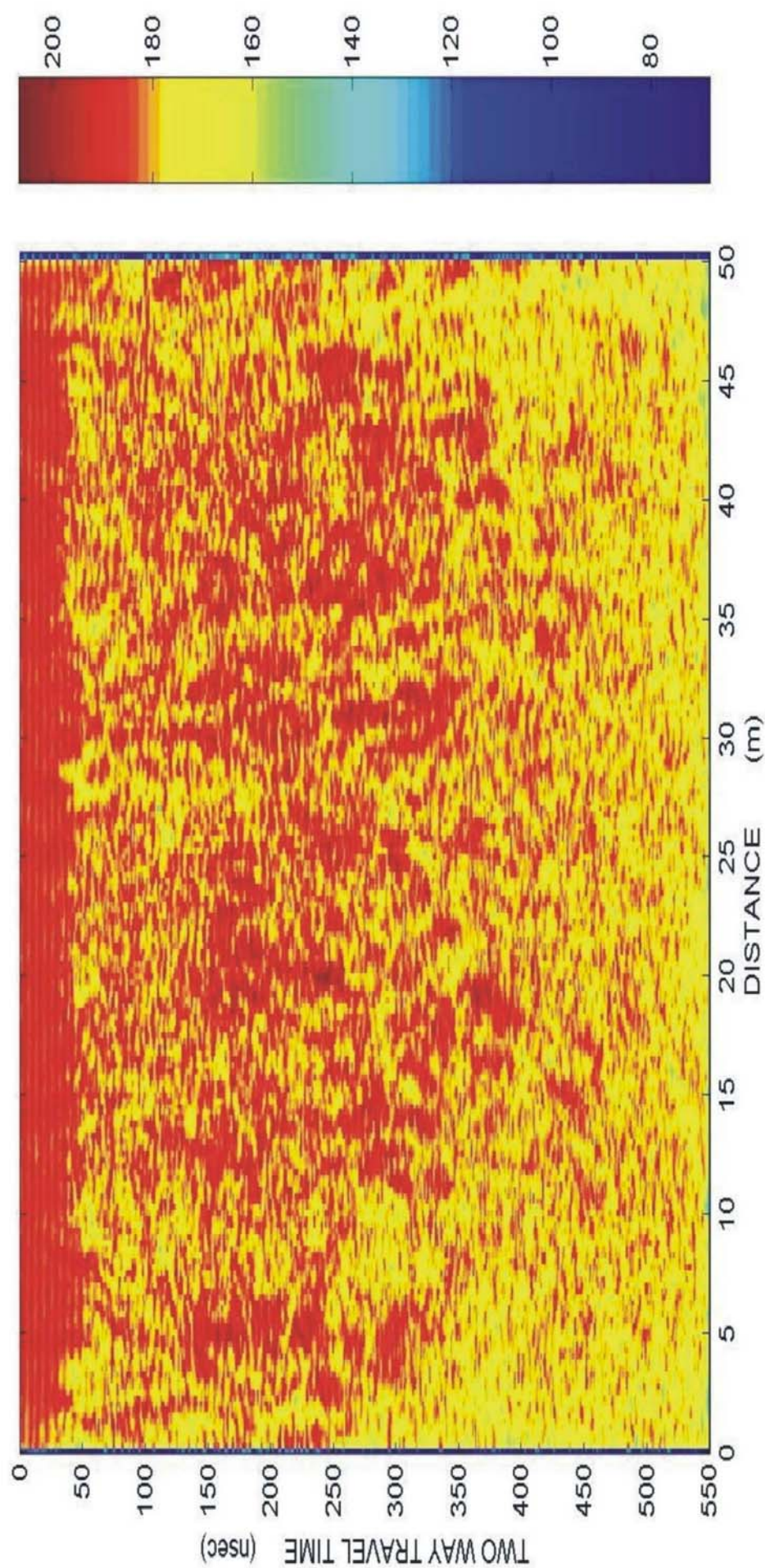
Σχ.5.27 Πρώτο μέρος της εικόνας του στιγμιαίου πλάτους για τη τρίτη γραμμή μελέτης



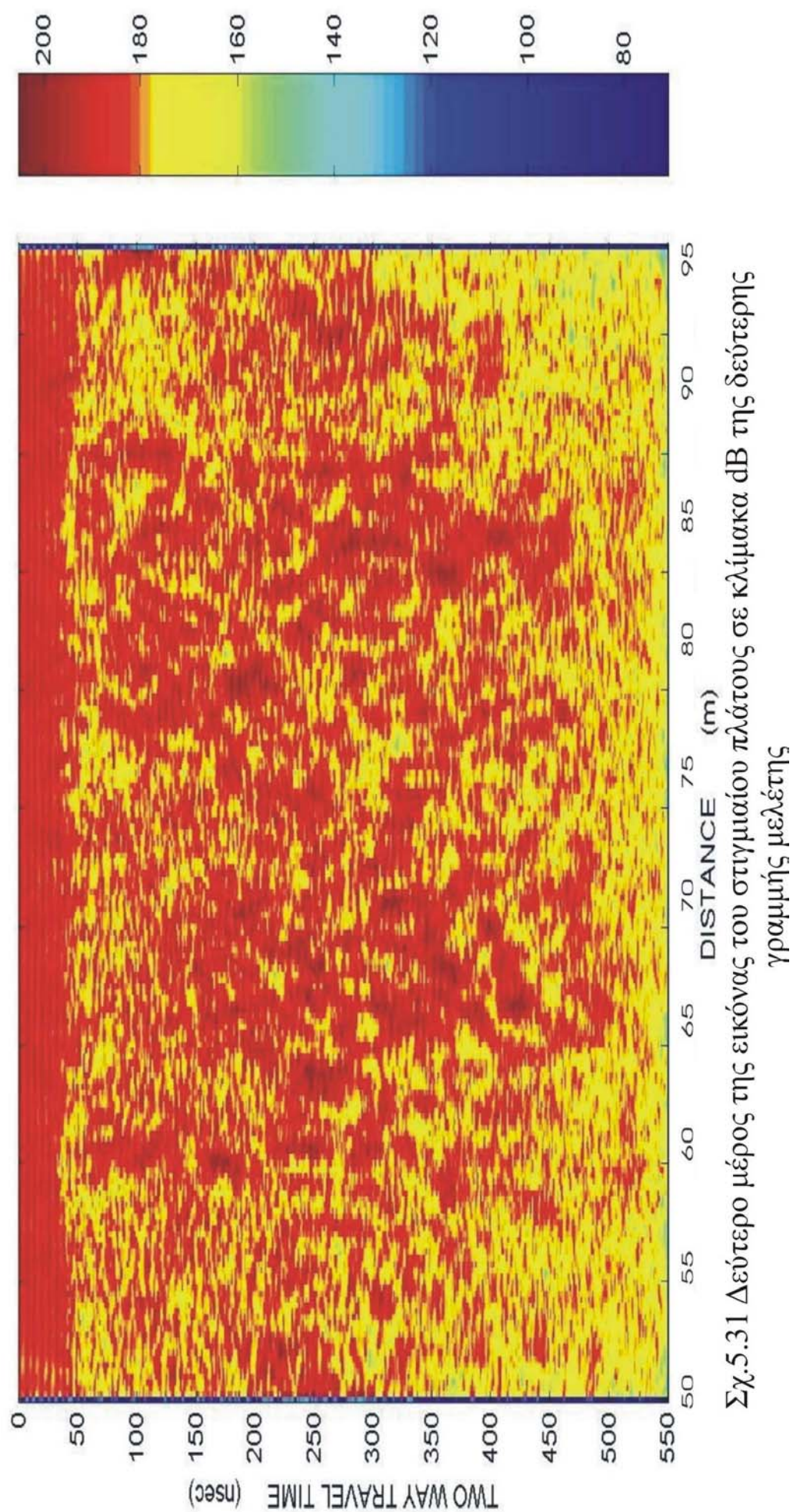
Σχ.5.28 Δεύτερο μέρος της εικόνας του στιγμιαίου πλάτους για τη τρίτη γραμμή μελέτης

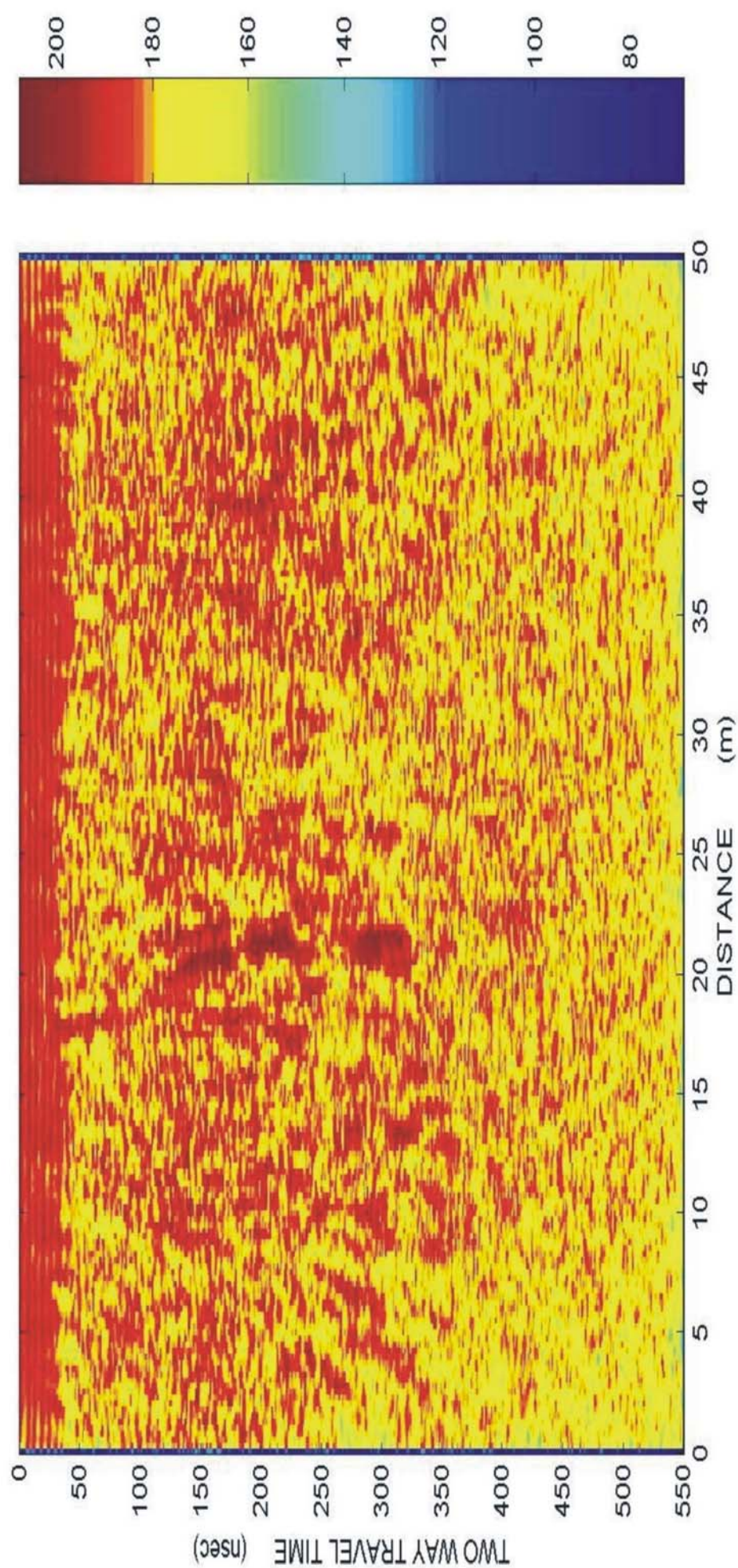


Σχ.5.29 Εικόνα του σιγνμιαίου πλάτους για τη τέταρτη γραμμή μελέτης

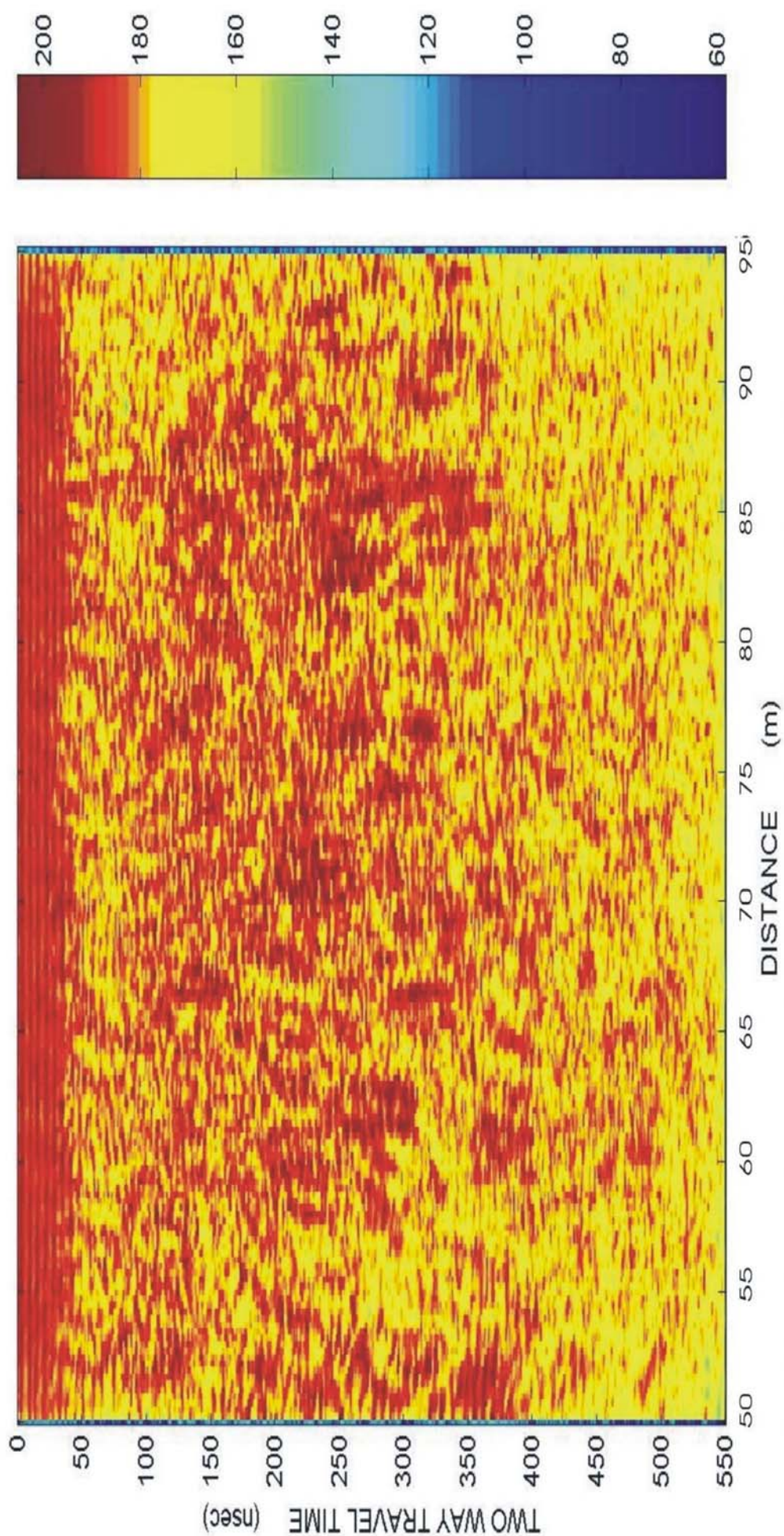


Σχ.5.30 Πρώτο μέρος της εικόνας του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB της δεύτερης γραμμής μελέτης

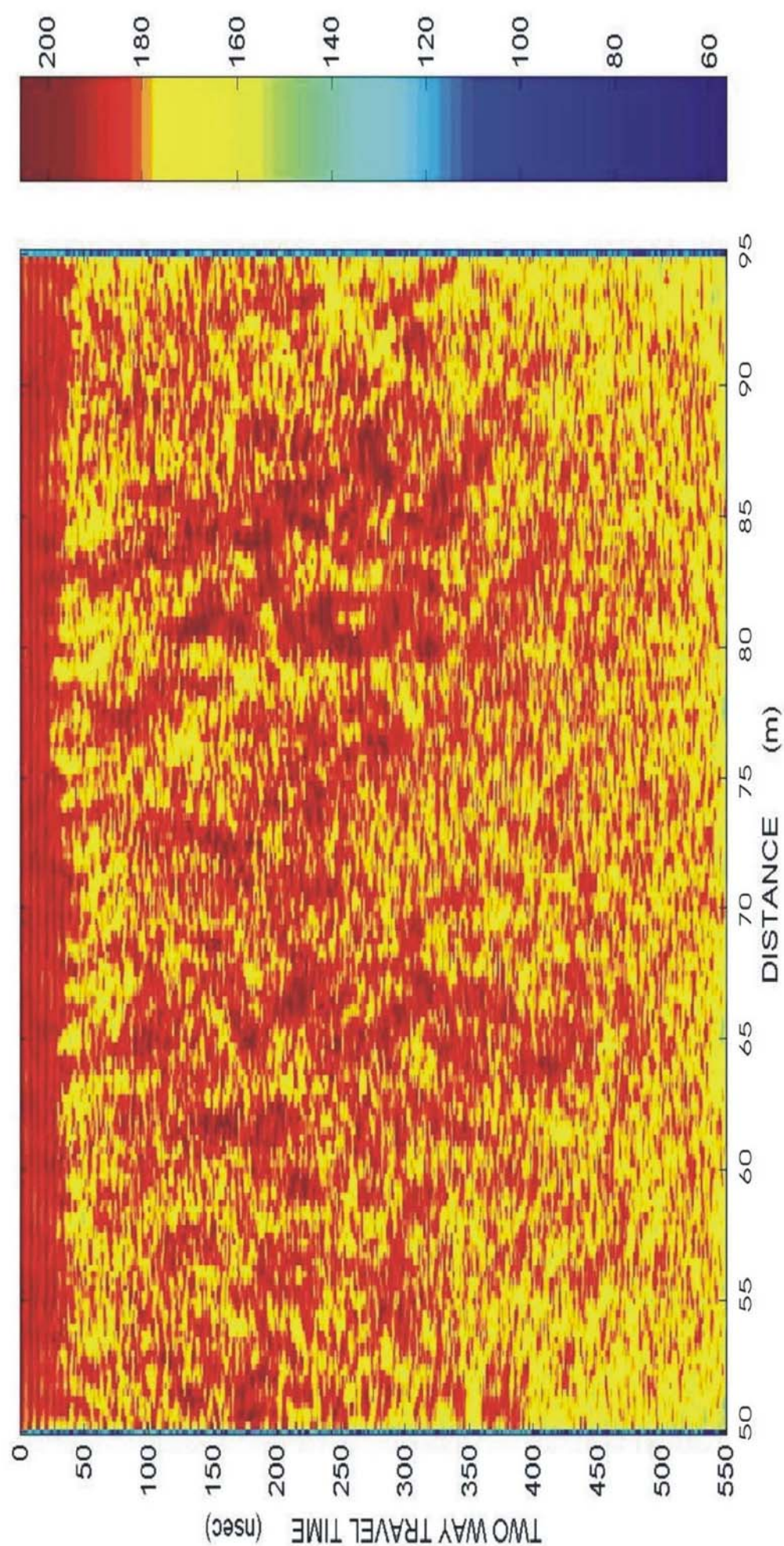




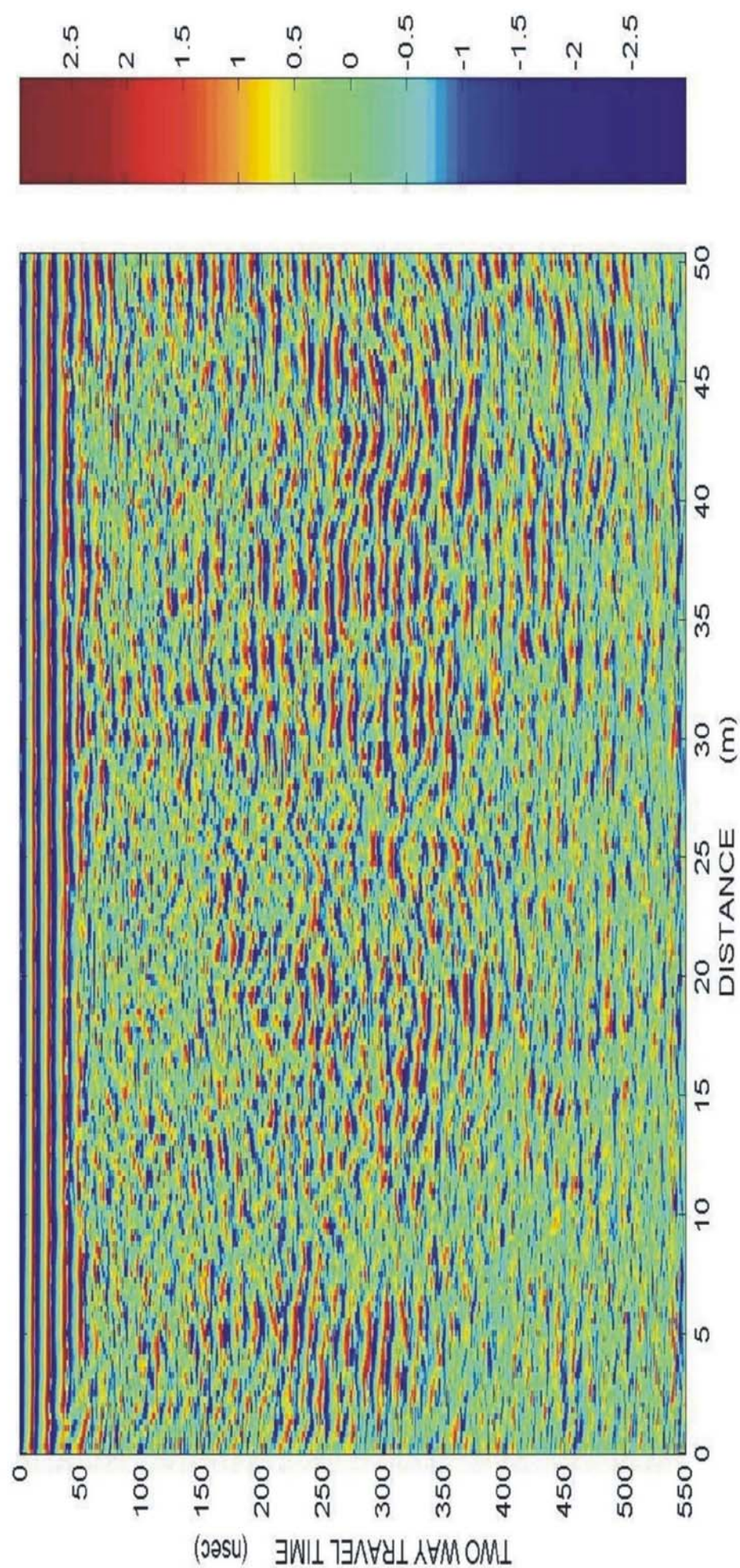
Σχ.5.32 Πρώτο μέρος της εικόνας του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB της τρίτης γραμμής μελέτης



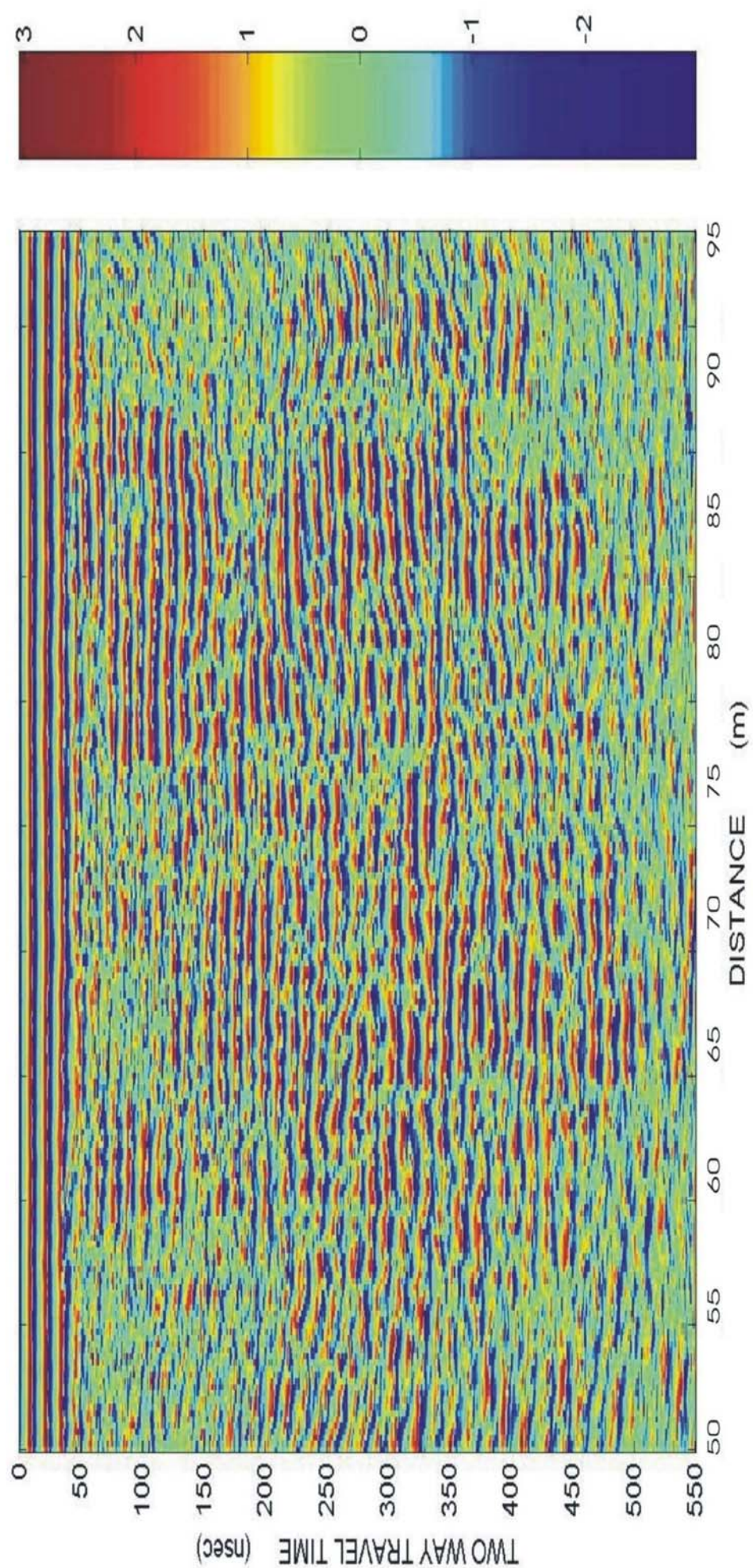
Σχ.5.33 Δεύτερο μέρος της εικόνας του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB της τρίτης γραμμής μελέτης



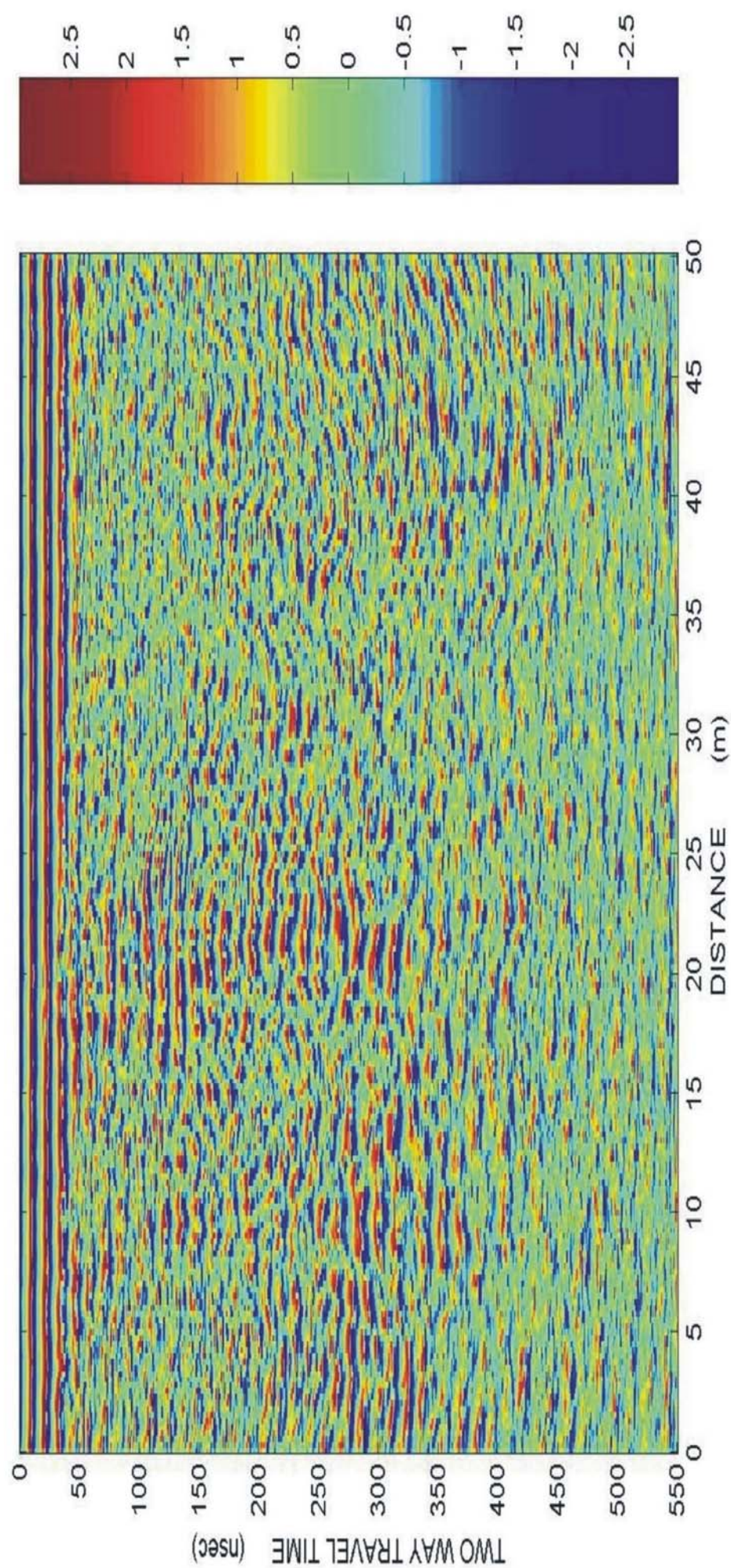
Σχ.5.34 Εικόνα του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB της τέταρτης γραμμής μελέτης



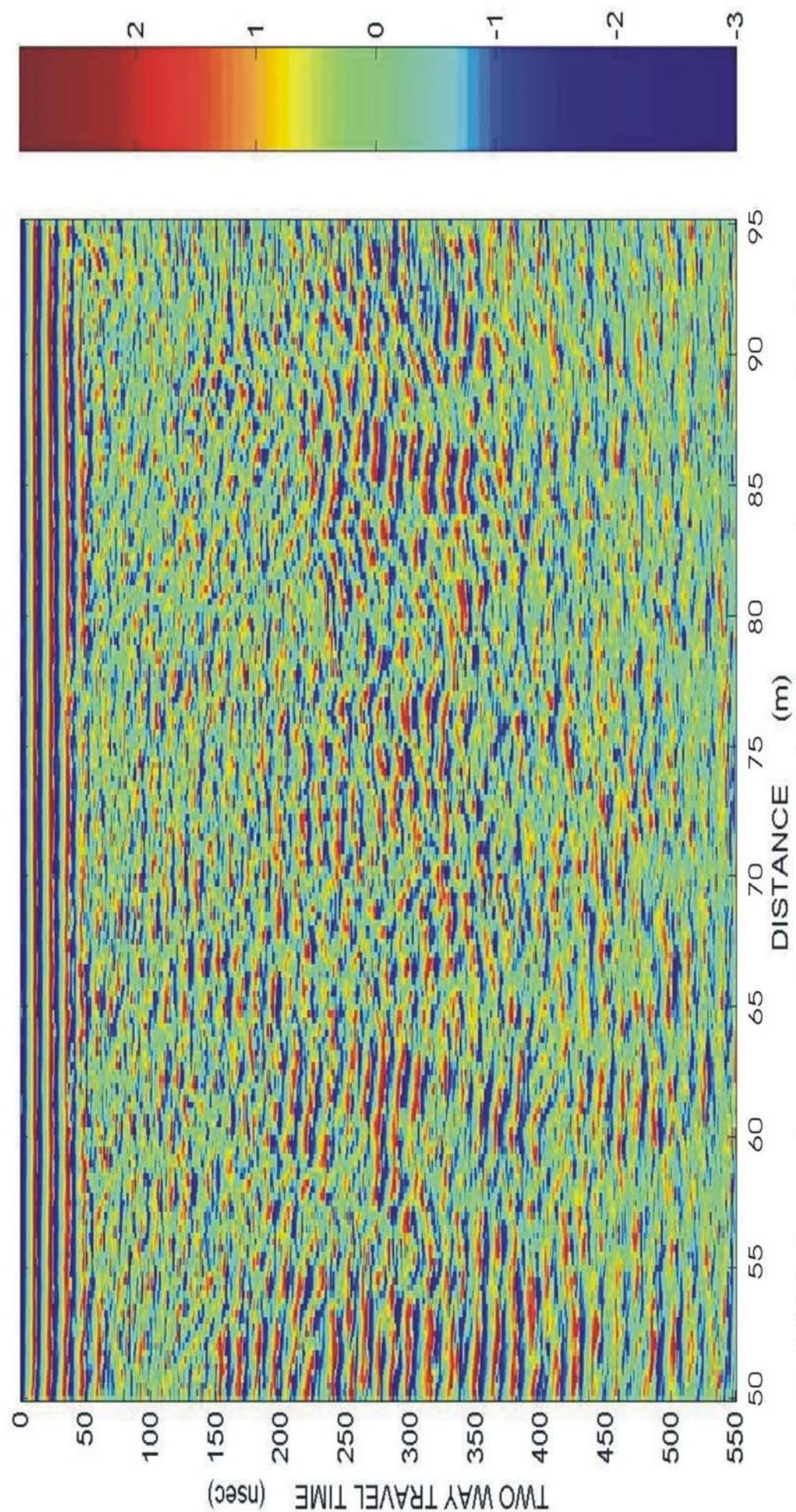
Σχ.5.35 Πρώτο μέρος της εικόνας της στιγμιαίας φάσης της δεύτερης γραμμής μελέτης



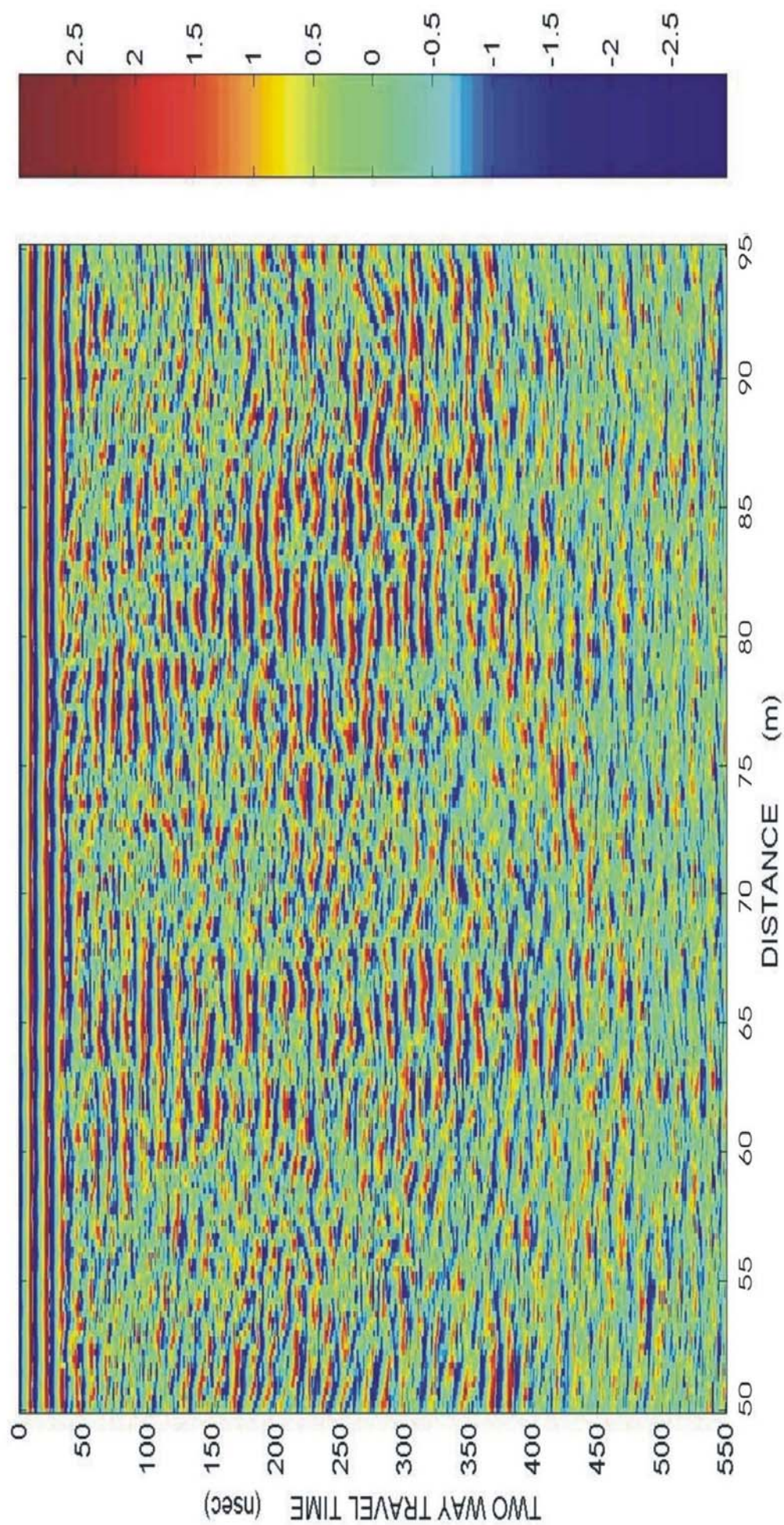
Σχ.5.36 Δεύτερο μέρος της εικόνας της στιγμιαίας φάσης της δεύτερης γραμμής μελέτης



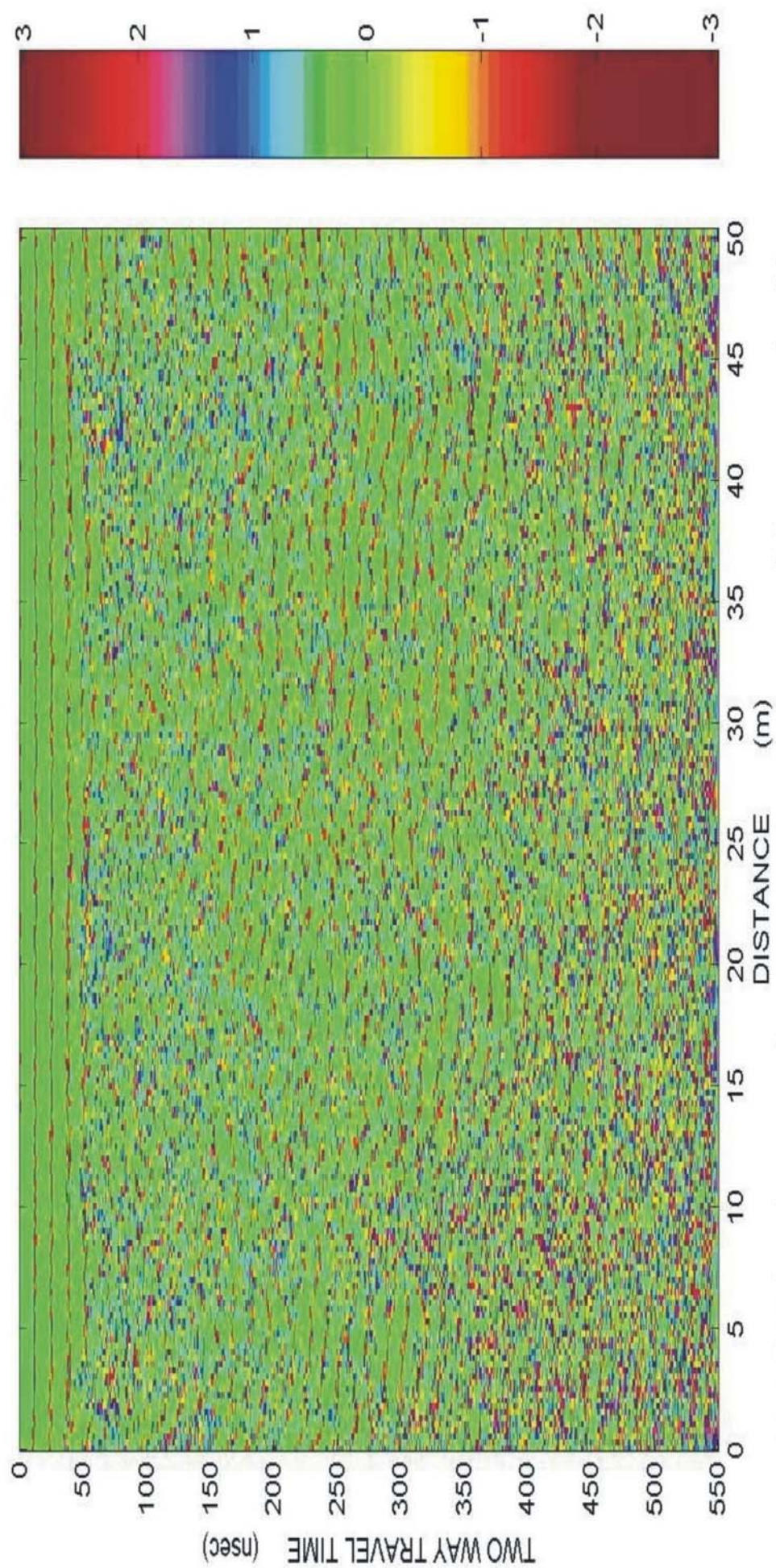
Σχ.5.37 Πρώτο μέρος της εικόνας της στιγμιαίας φάσης της τρίτης γραμμής μελέτης



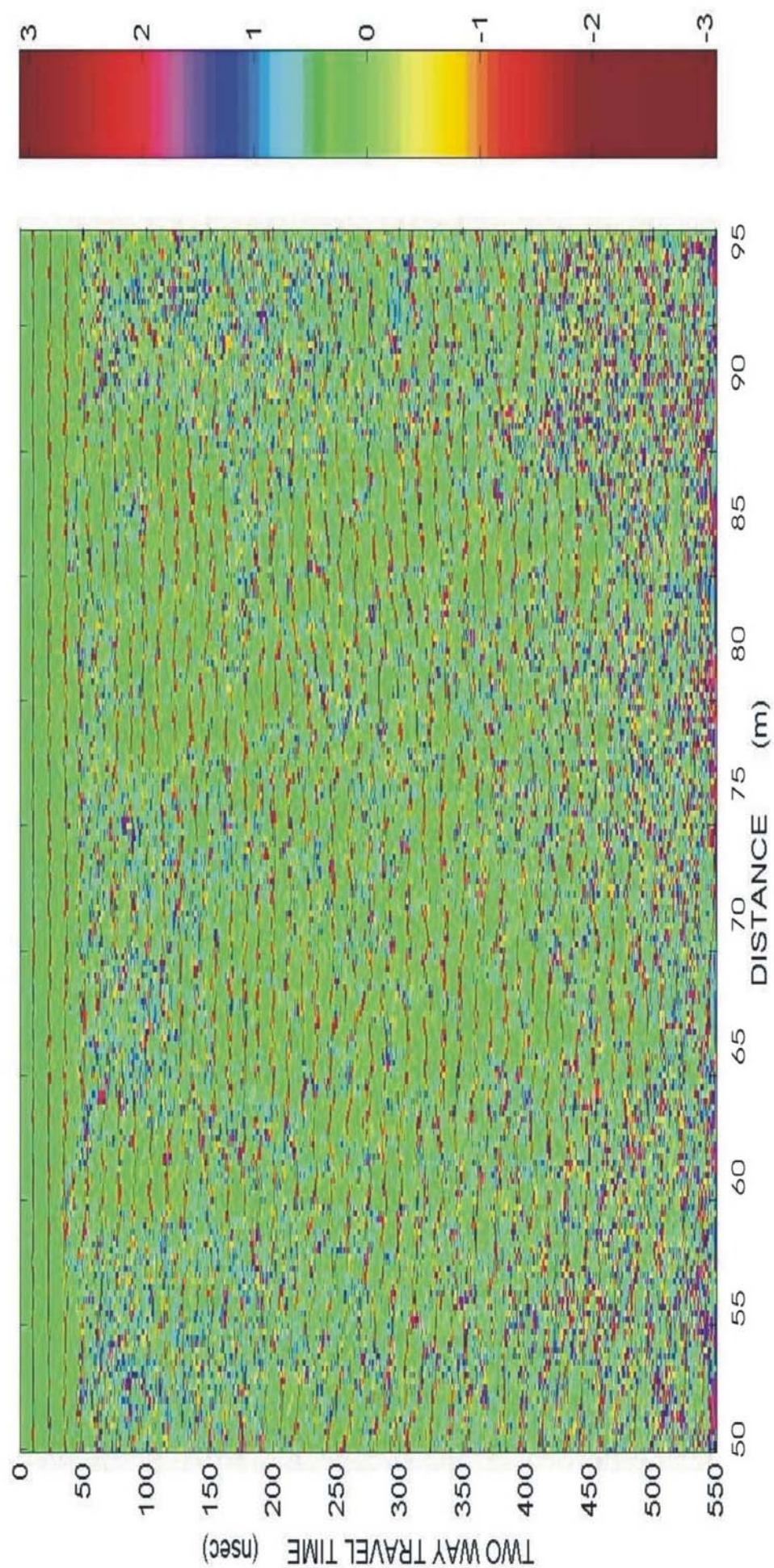
Σχ.5.38 Δεύτερο μέρος της εικόνας της στιγμιαίας φάσης της τρίτης γραμμής μελέτης



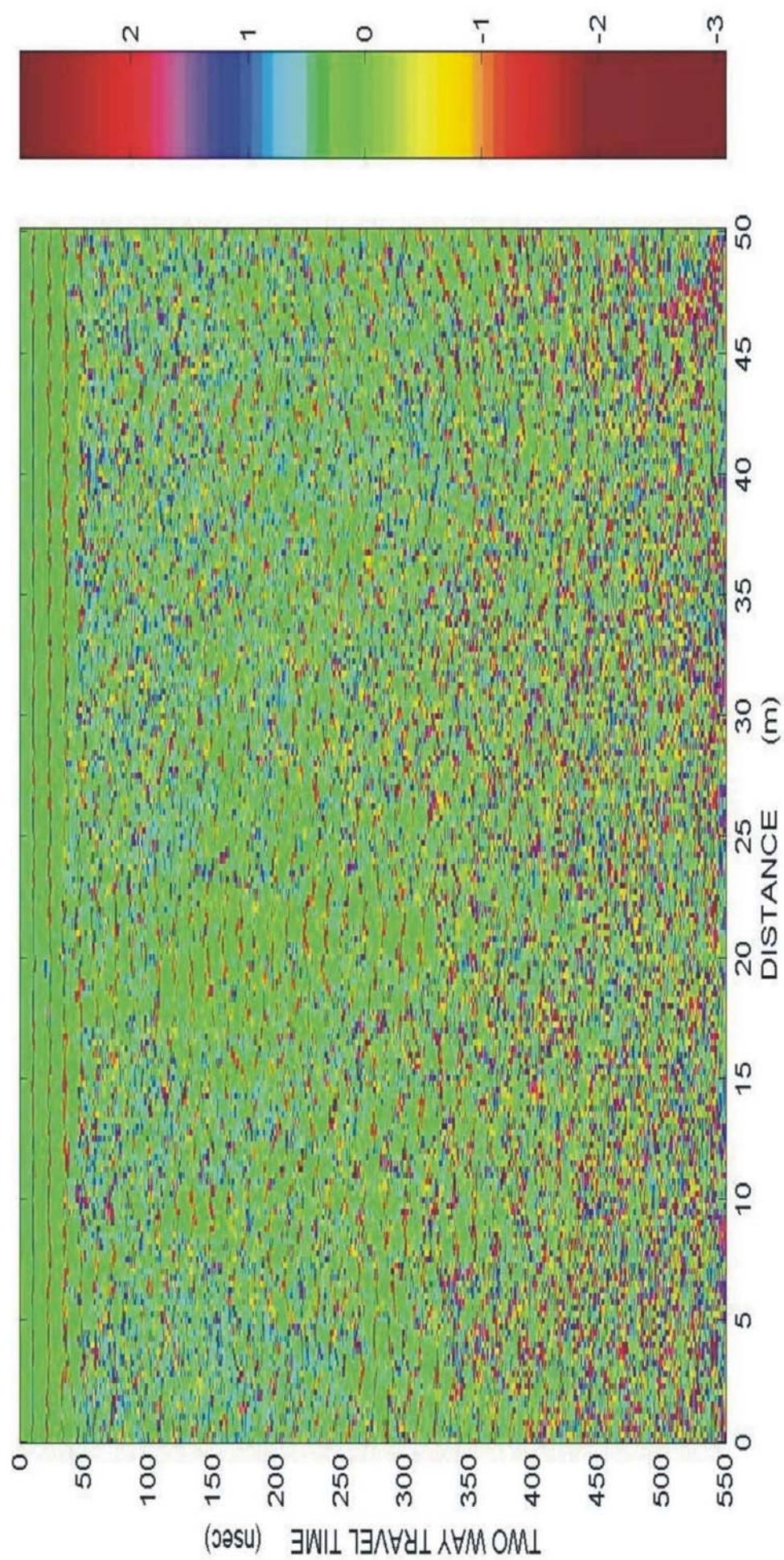
Σχ.5.39 Εικόνα της στιγμιαίας φάσης της τέταρτης γραμμής μελέτης



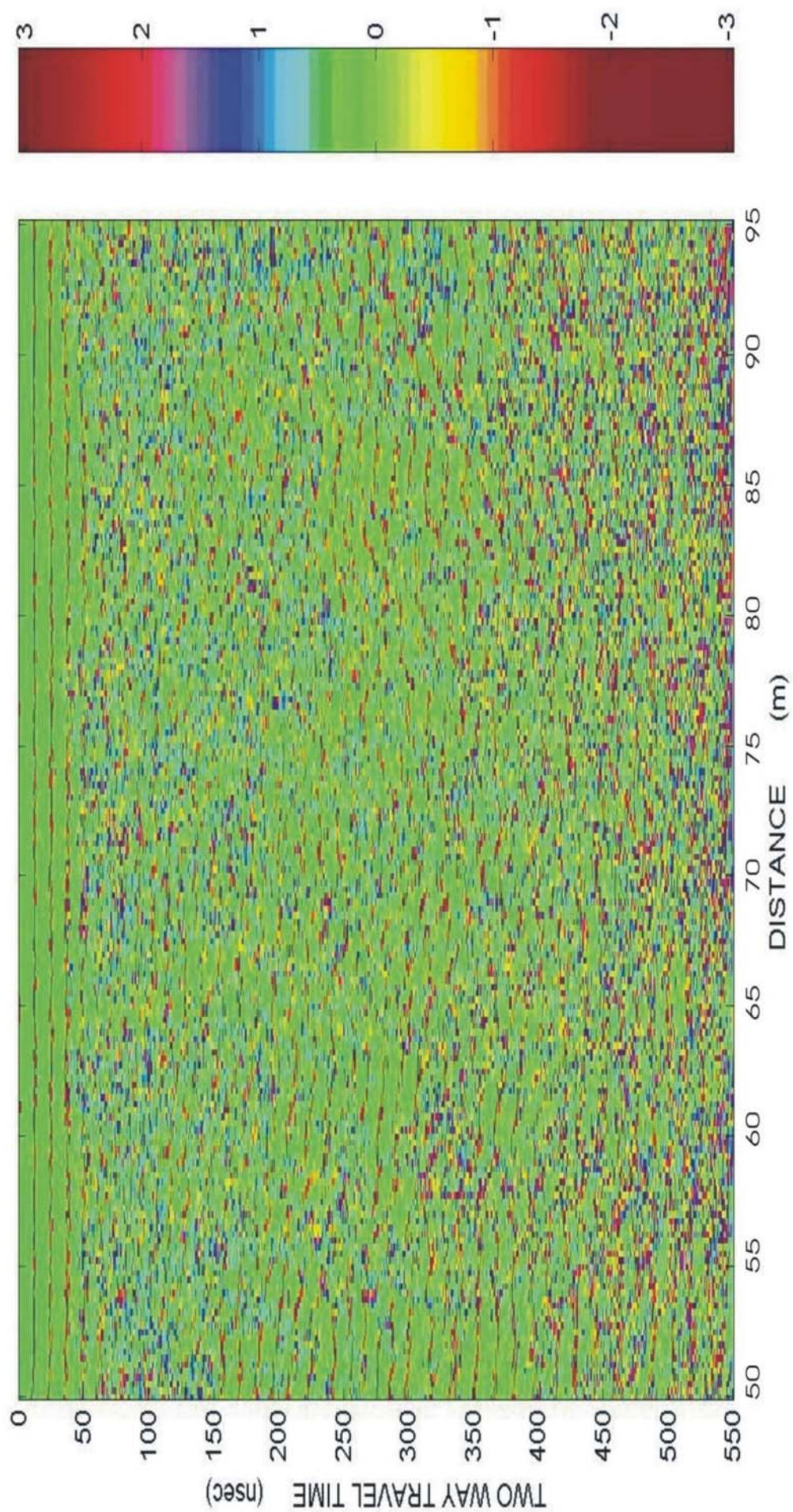
Σχ.5.40 Πρώτο μέρος της εικόνας της στιγμιαίας συχνότητας της δεύτερης γραμμής μελέτης



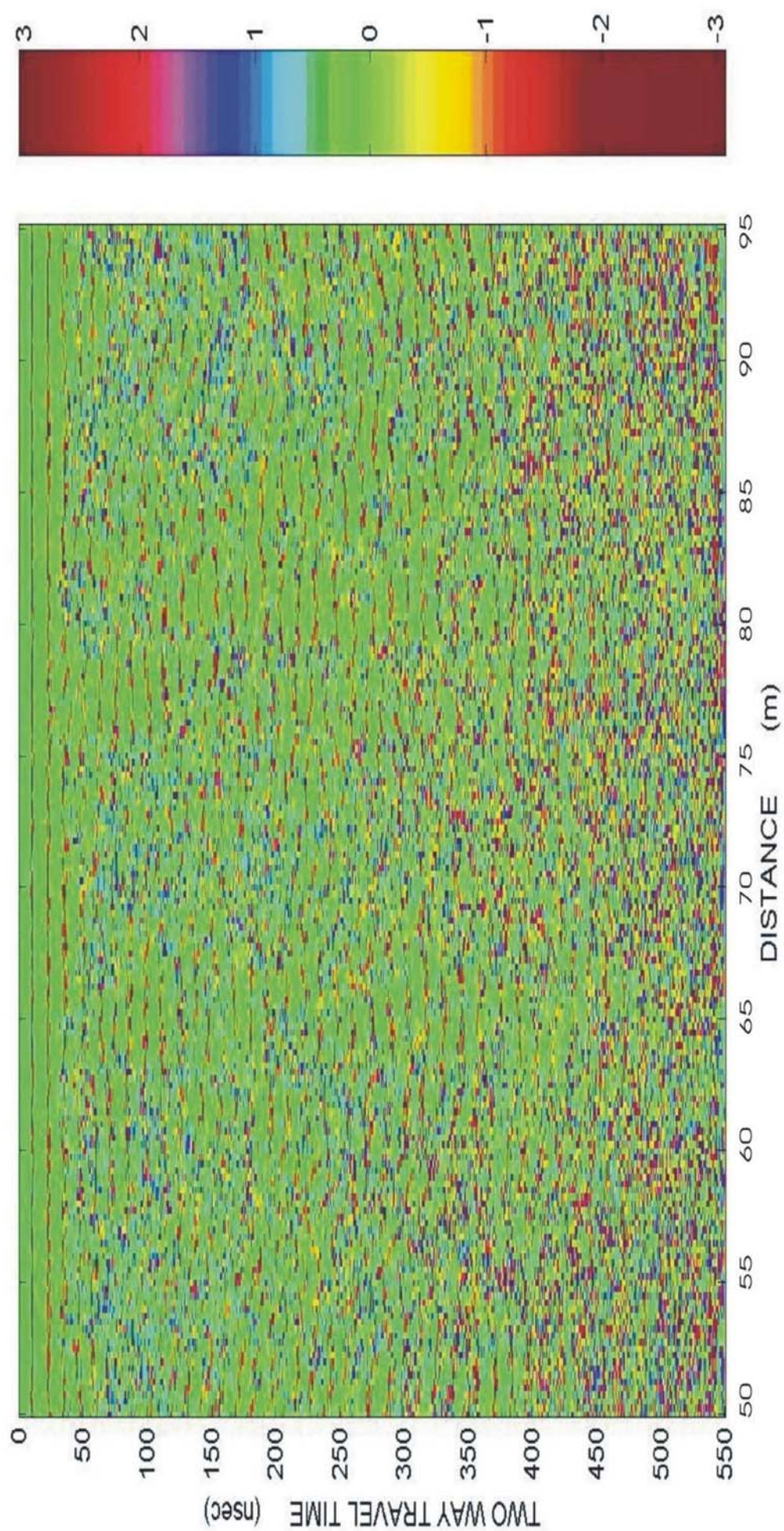
Σχ.5.41 Δεύτερο μέρος της εικόνας της στιγμιαίας συχνότητας της δεύτερης γραμμής μελέτης



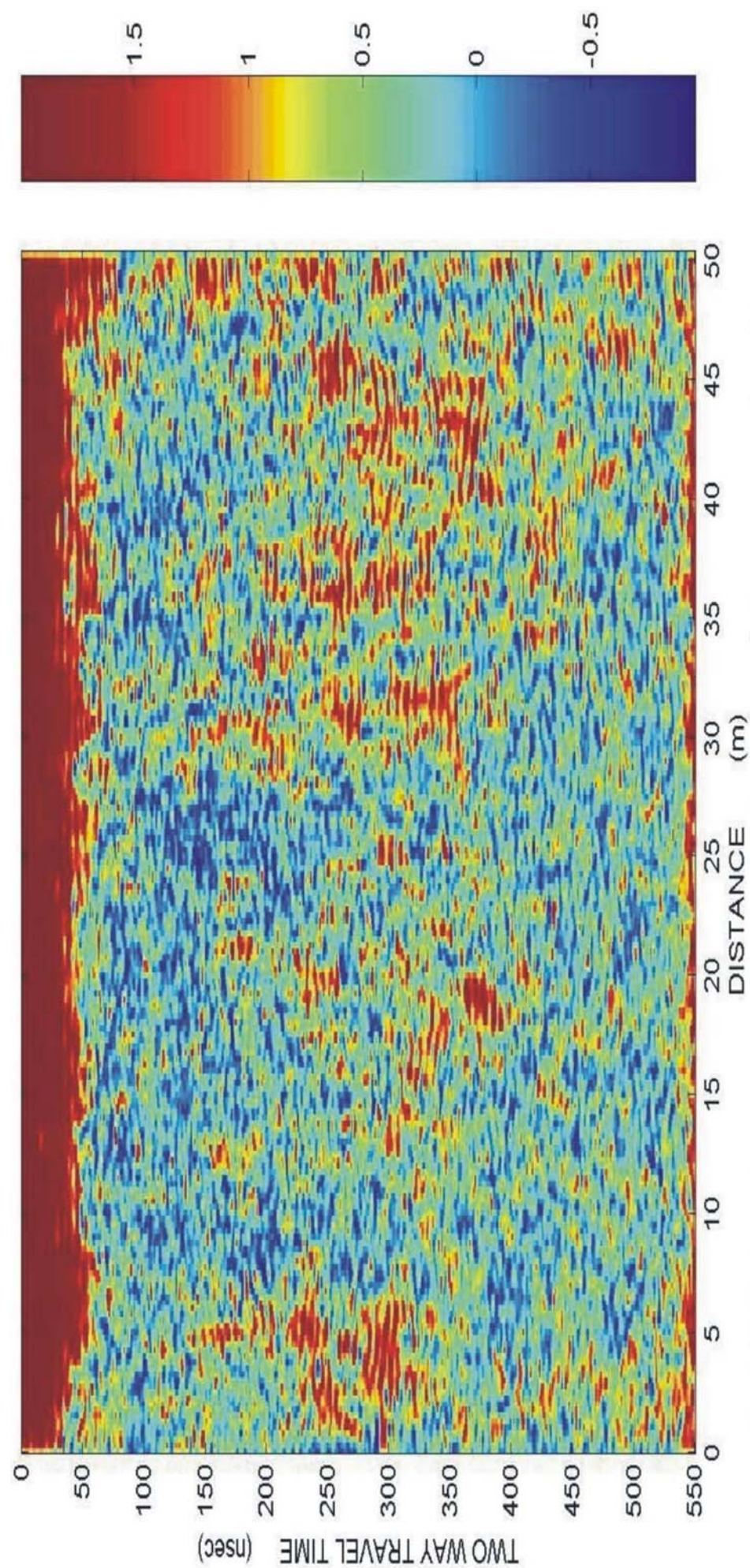
Σχ.5.42 Πρώτο μέρος της εικόνας της στιγμιαίας συχνότητας της τρίτης γραμμής μελέτης



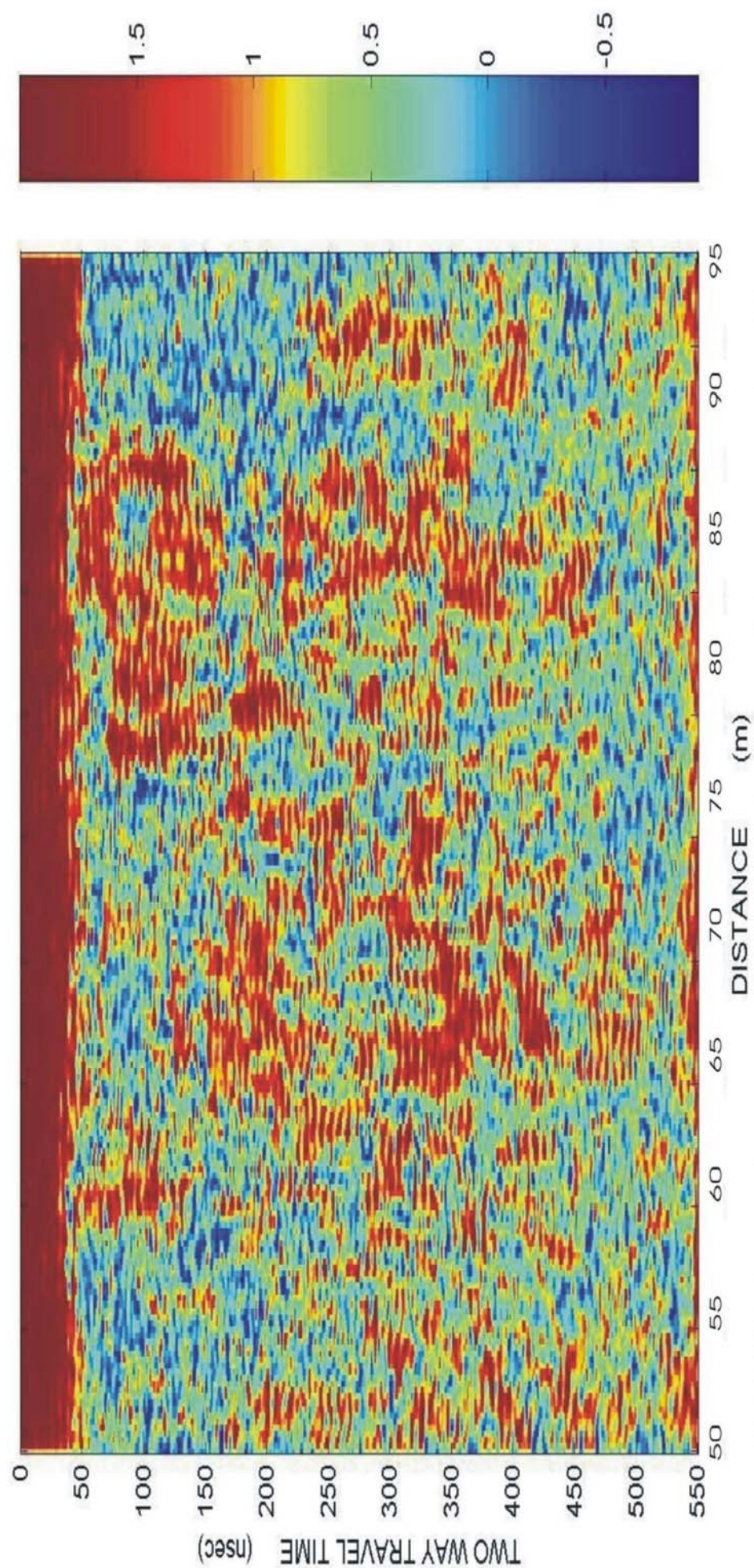
Σχ.5.43 Δεύτερο μέρος της εικόνας της στιγμιαίας συχνότητας της τρίτης γραμμής μελέτης



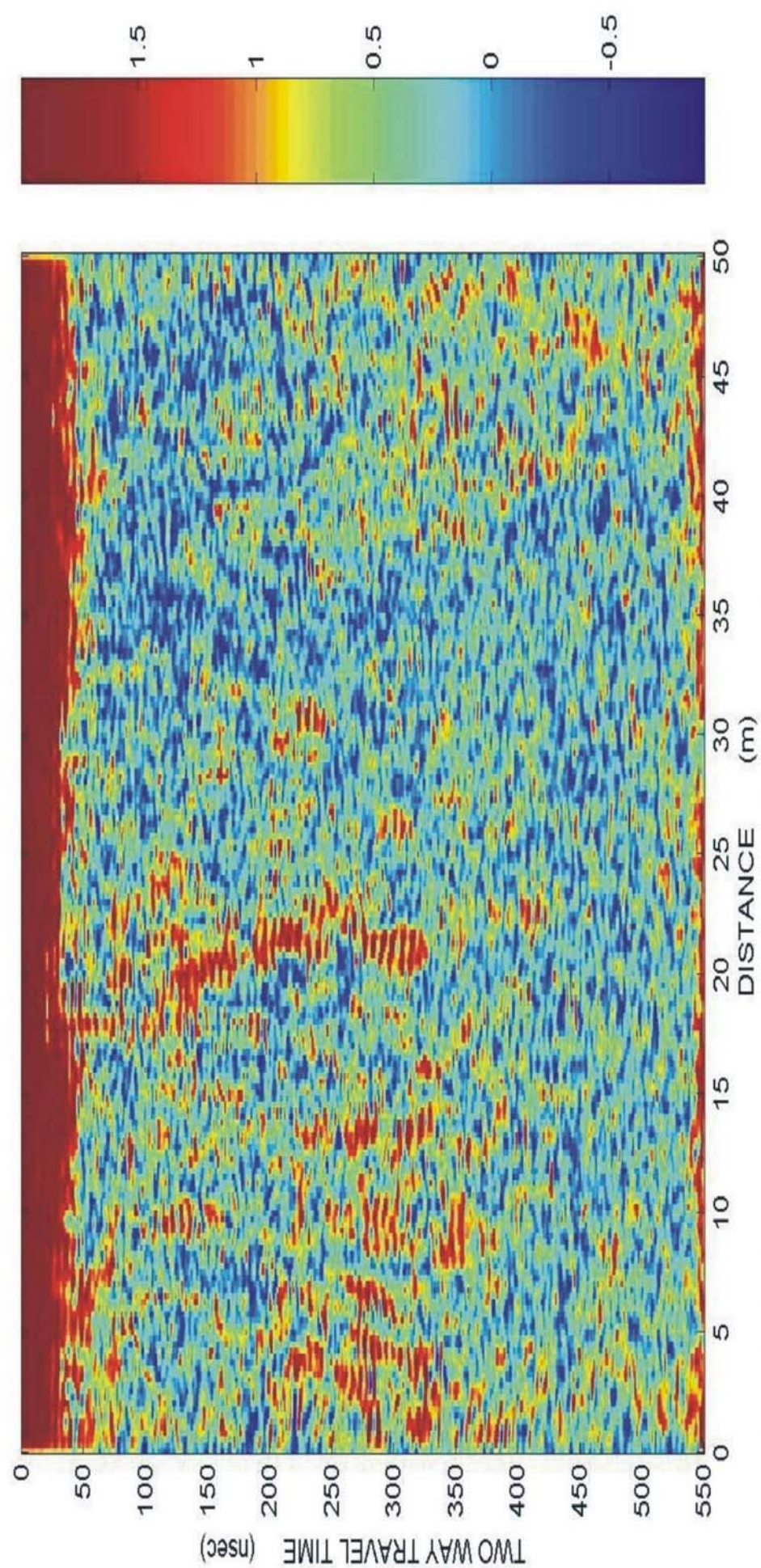
Σχ.5.44 Εικόνα της στιγμιαίας συχνότητας της τέταρτης γραμμής μελέτης



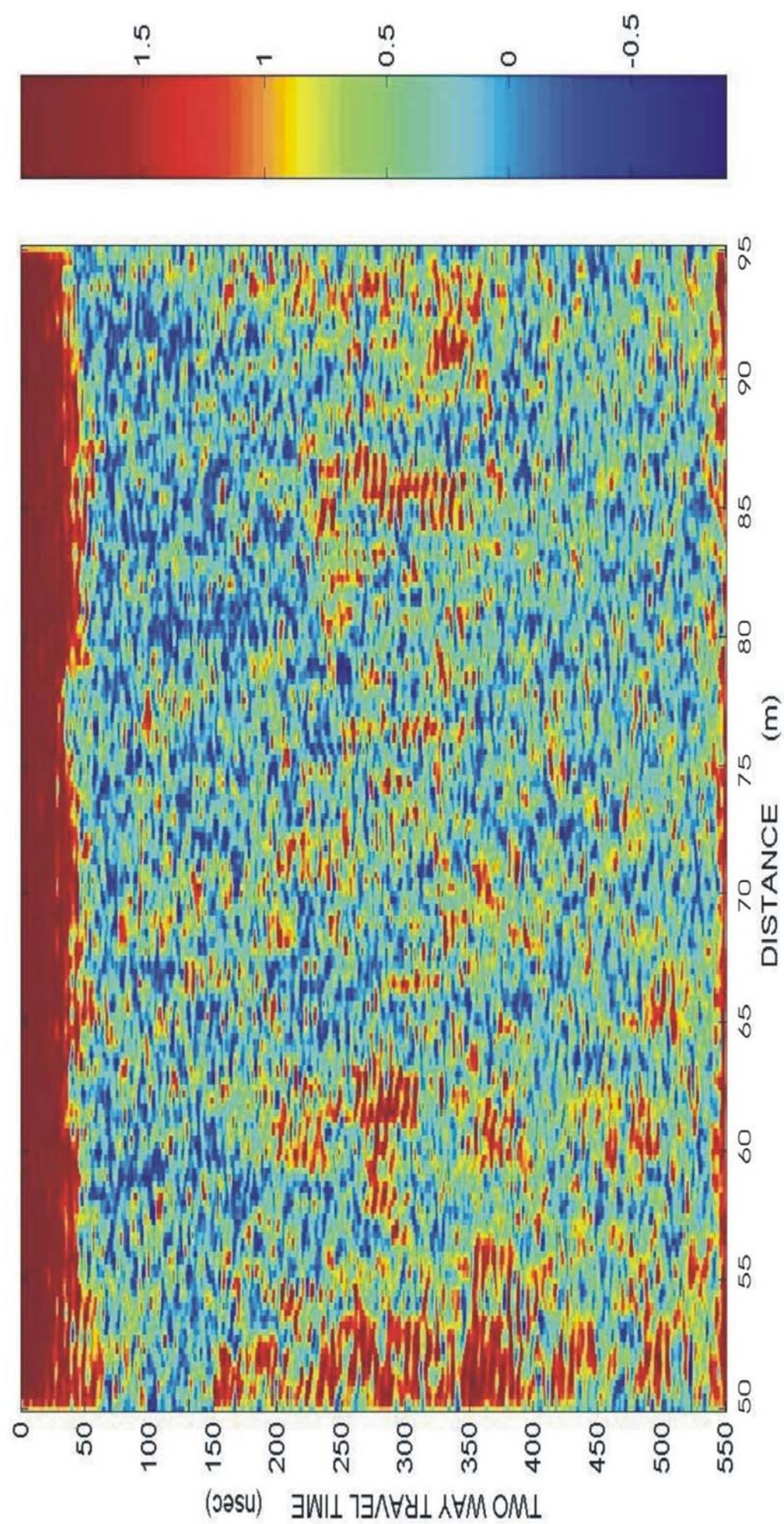
Σχ.5.45 Πρώτο μέρος της εικόνας της συνάφειας της δεύτερης γραμμής μελέτης



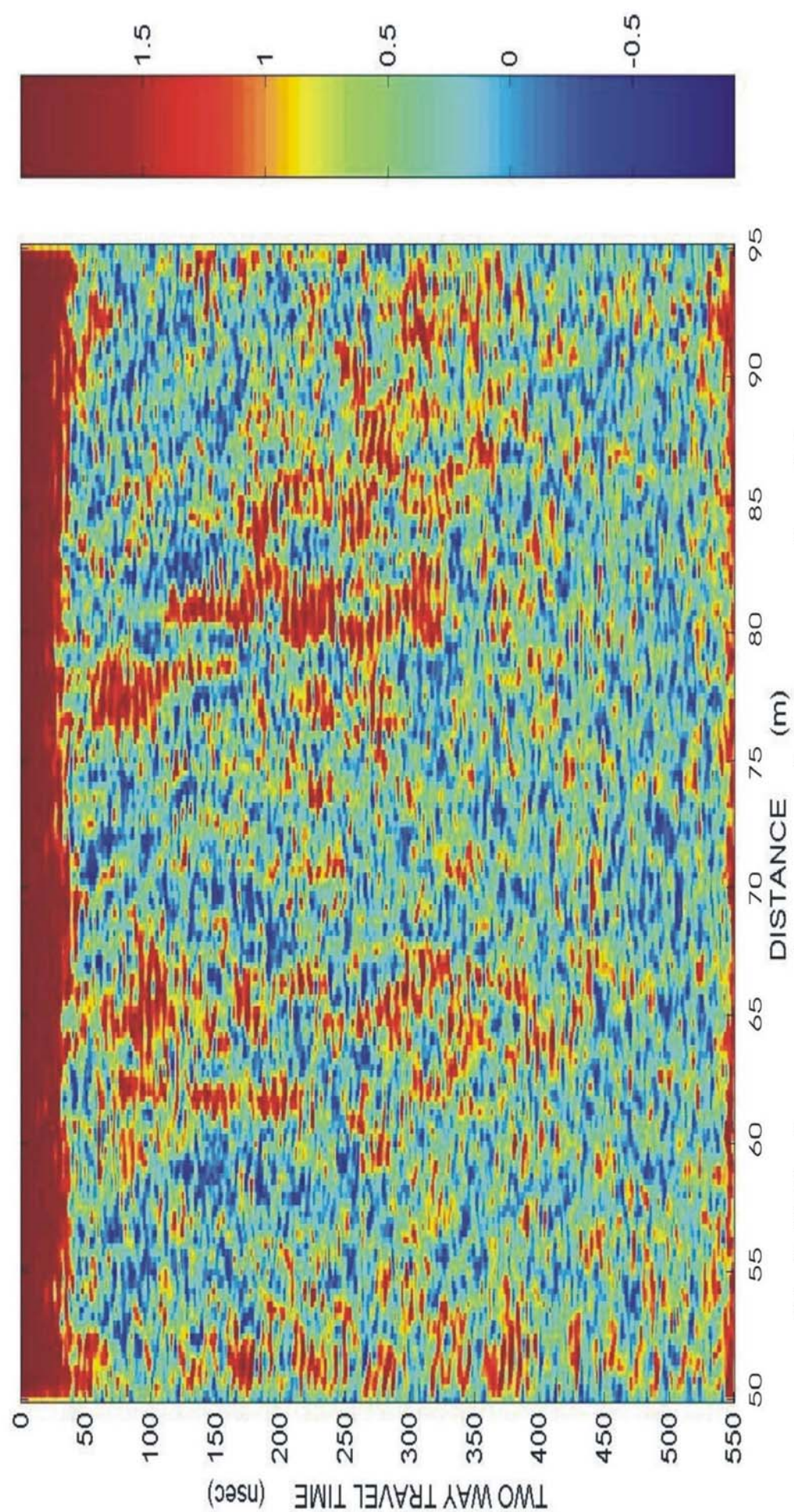
Σχ.5.46 Δεύτερο μέρος της εικόνας της συνάφειας της δεύτερης γραμμής μελέτης



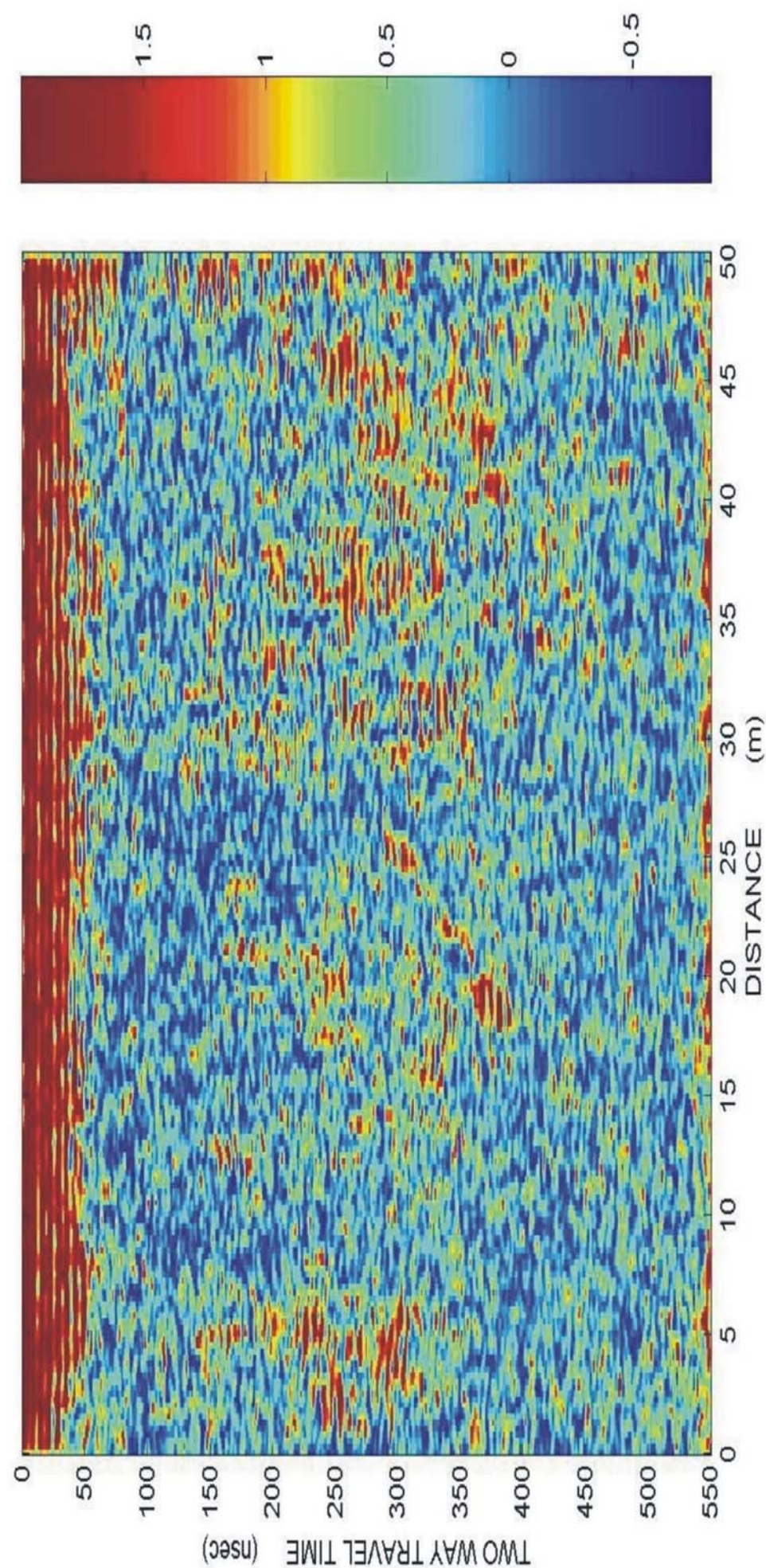
Σχ.5.47 Πρώτο μέρος της εικόνας της συνάφειας της τρίτης γραμμής μελέτης



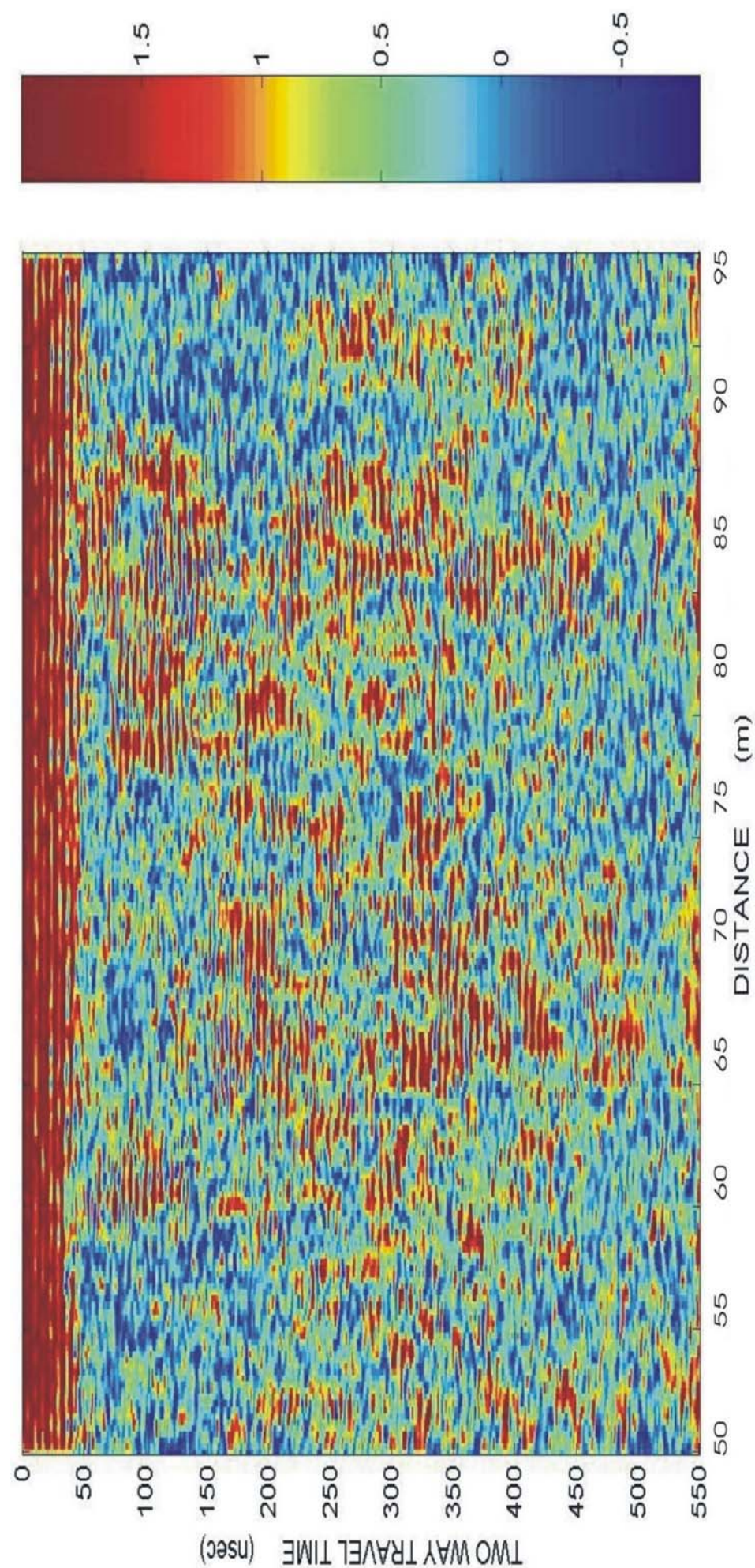
Σχ.5.48 Δεύτερο μέρος της εικόνας της συνάφειας της τρίτης γραμμής μελέτης



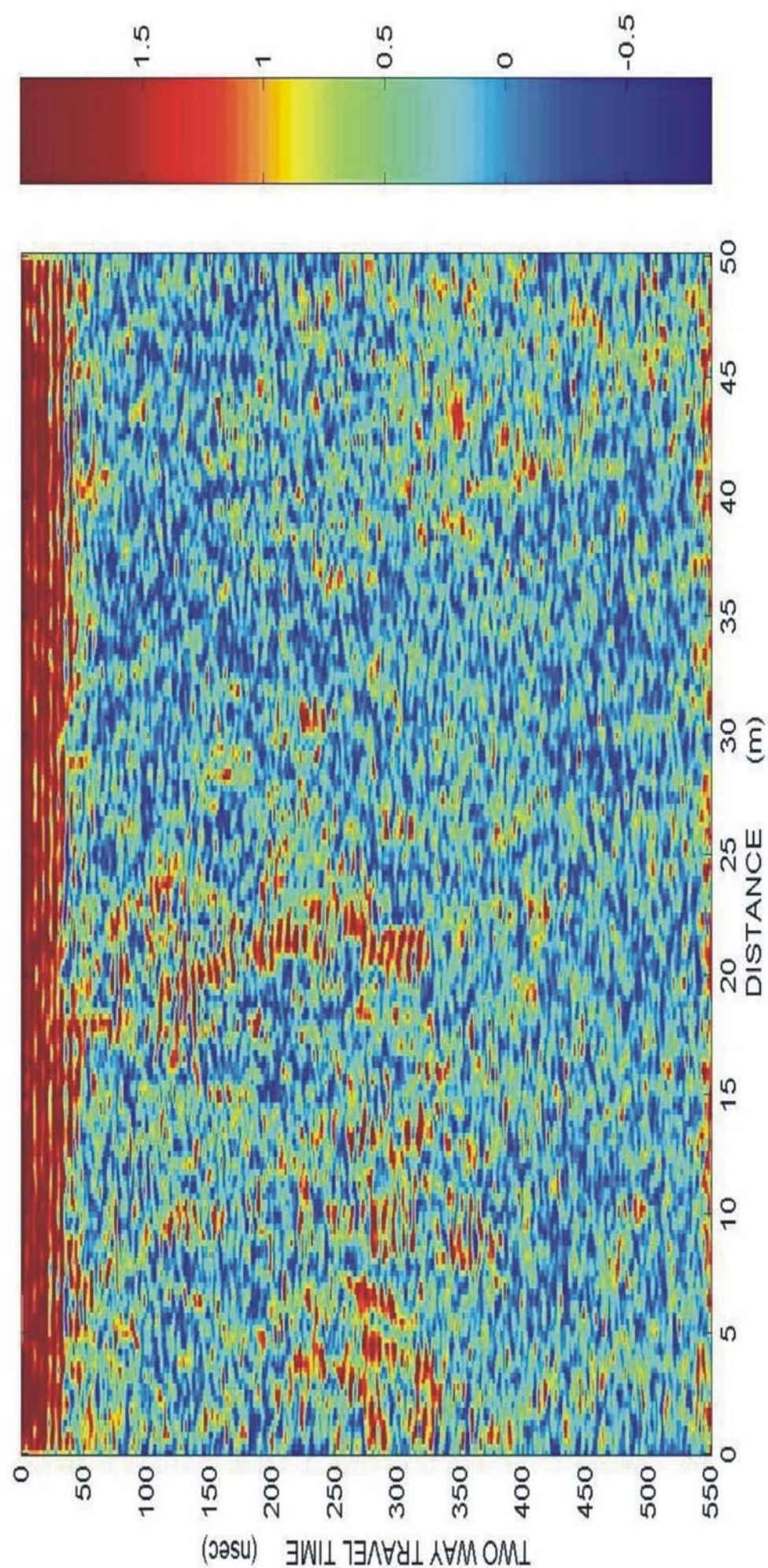
Σχ.5.49 Εικόνα της συνάφειας της τέταρτης γραμμής μελέτης



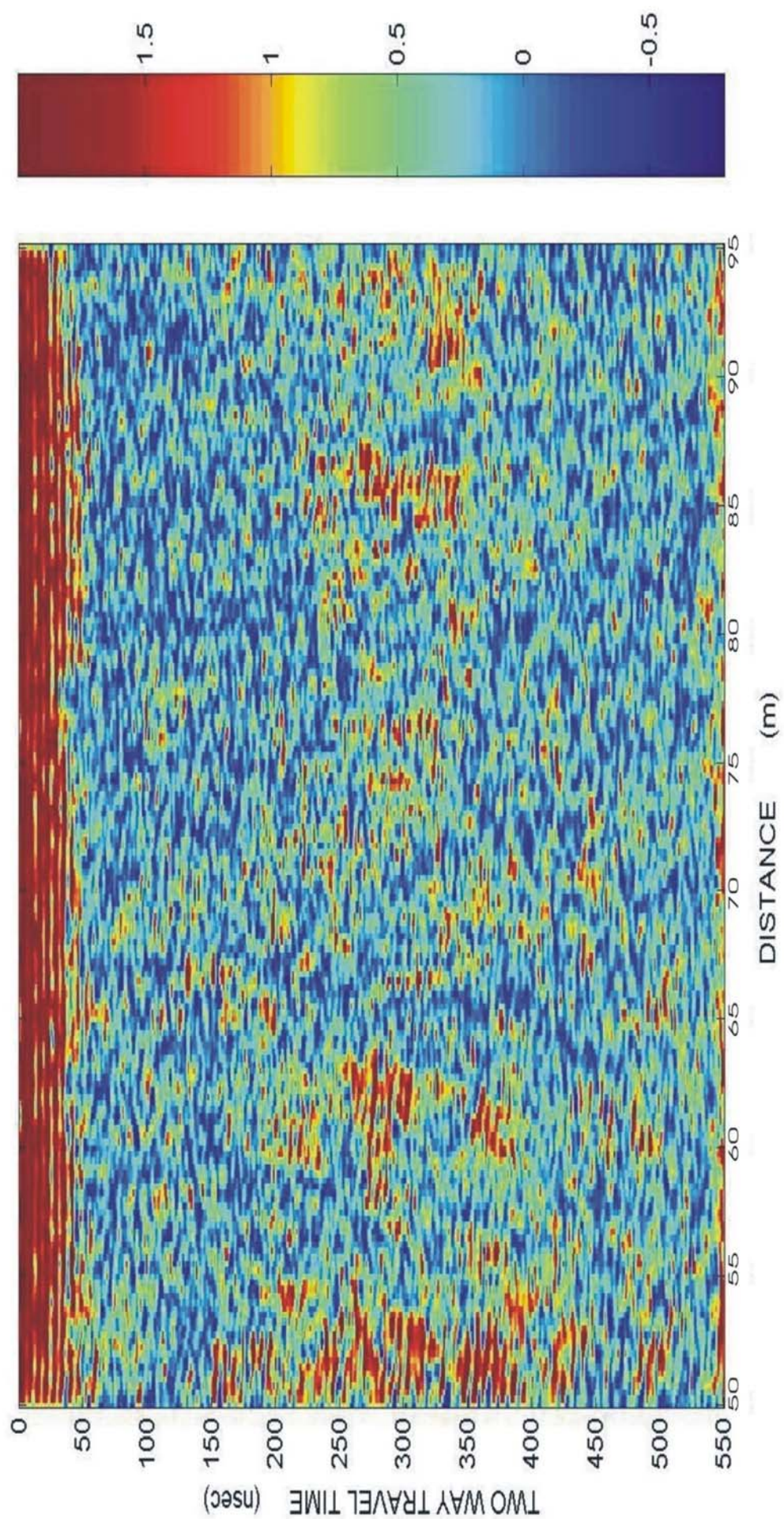
Σχ.5.50 Πρώτο μέρος της εικόνας της συνάφειας της στιγμιαίας φάσης της δεύτερης γραμμής μελέτης



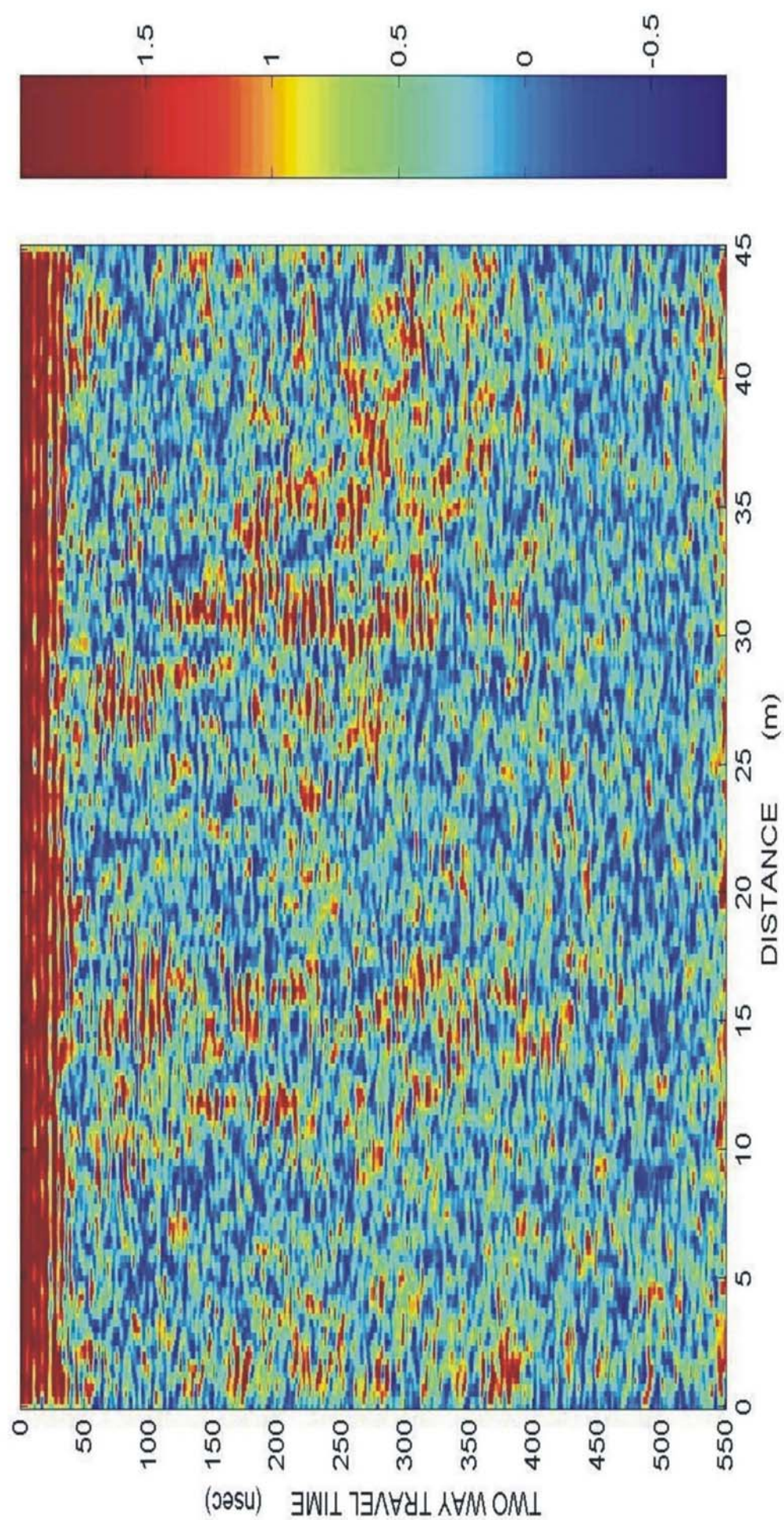
Σχ.5.51 Δεύτερο μέρος της εικόνας της συνάφειας της στιγμιαίας φάσης της δεύτερης γραμμής μελέτης



Σχ.5.52 Πρώτο μέρος της εικόνας της συνάφειας της στιγμιαίας φάσης της τρίτης γραμμής μελέτης



Σχ.5.53 Δεύτερο μέρος της εικόνας της συνάφειας της στιγμιαίας φάσης της τρίτης γραμμής μελέτης



Σχ.5.54 Εικόνα της συνάφειας της στιγμιαίας φάσης της τέταρτης γραμμής μελέτης

Τέλος παρουσιάζονται οι εικόνες της συνάφειας (Σχ.5.45 – 5.49) και της συνάφειας της στιγμιαίας φάσης (Σχ.5.50-54) εικόνες που δεν διαφέρουν πολύ μεταξύ τους. Και στις δυο περιπτώσεις επιλέχτηκαν τρία ίχνη και πέντε δείγματα από κάθε ίχνο.

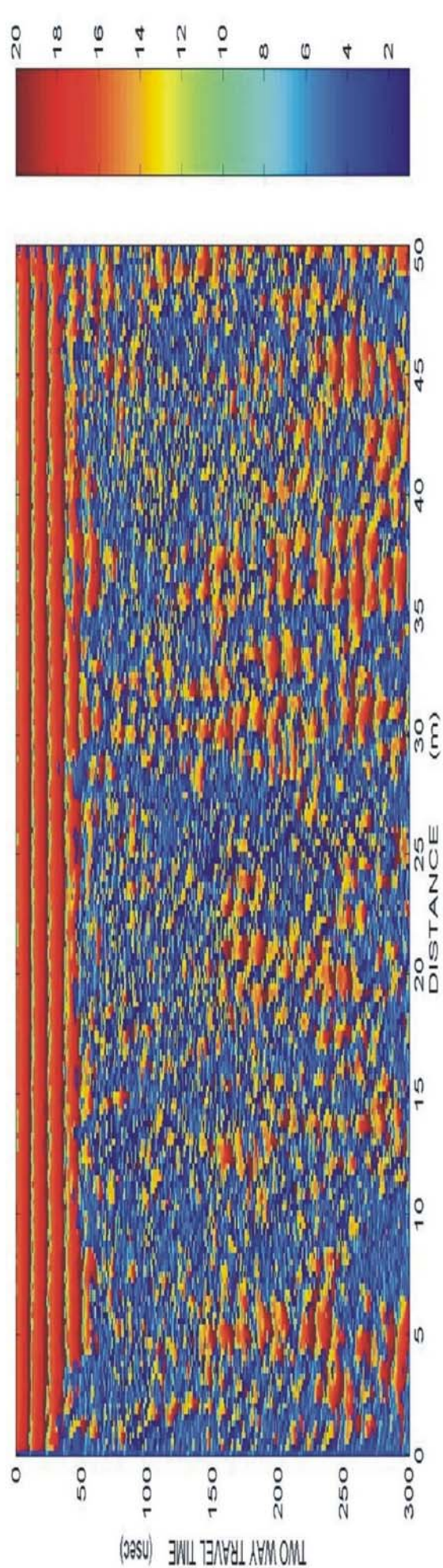
Και στις εικόνες της συνάφειας και της συνάφειας της στιγμιαίας φάσης παρατηρείται η ύπαρξη περιοχών με ερυθρά χρώματα (κόκκινο) που διαφοροποιούνται από το σύνολο της εικόνας όπου οι ανακλαστήρες παρουσιάζουν μεγαλύτερη τιμή της συνάφειας και αντιστοιχούν σε λιγότερο διαταραγμένο ασβεστόλιθο. Σημειώνεται ότι η συνάφεια της στιγμιαίας φάσης παρουσιάζει καλύτερη ανάλυση.

Εικόνες ταξινόμησης

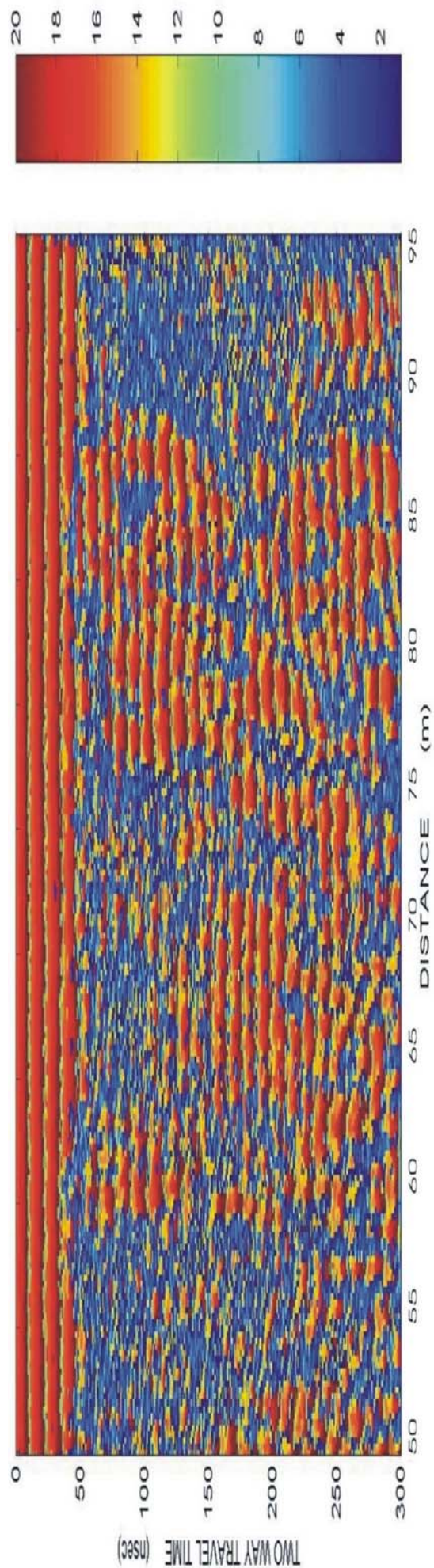
Το επόμενο βήμα της επεξεργασίας είναι ο χωρισμός των χαρακτηριστικών σε 3 ομάδες και η ανάλυση των κυρίων συνιστωσών ανά ομάδα. Οι τρεις ομάδες είναι: α) Στιγμιαίο πλάτος και στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB, β) Στιγμιαία φάση και στιγμιαία συχνότητα και γ) συνάφεια και συνάφεια της στιγμιαίας φάσης. Μετά την ανάλυση των κυρίων συνιστωσών επιλέχτηκαν οι εξής κύριες συνιστώσες όπου συγκεντρώνουν το 80% της πληροφορίας. Από την πρώτη και την τρίτη ομάδα επιλέχτηκε η πρώτη συνιστώσα και από την δεύτερη ομάδα και οι δυο κύριες συνιστώσες.

Μετά την επιλογή των συνιστωσών πραγματοποιήθηκε αυτόματη ταξινόμηση των εικόνων σε 50 τάξεις με τη μέθοδο των κ - μέσων τιμών και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε χάρτης αυτοδιοργάνωσης σε 20 τάξεις.

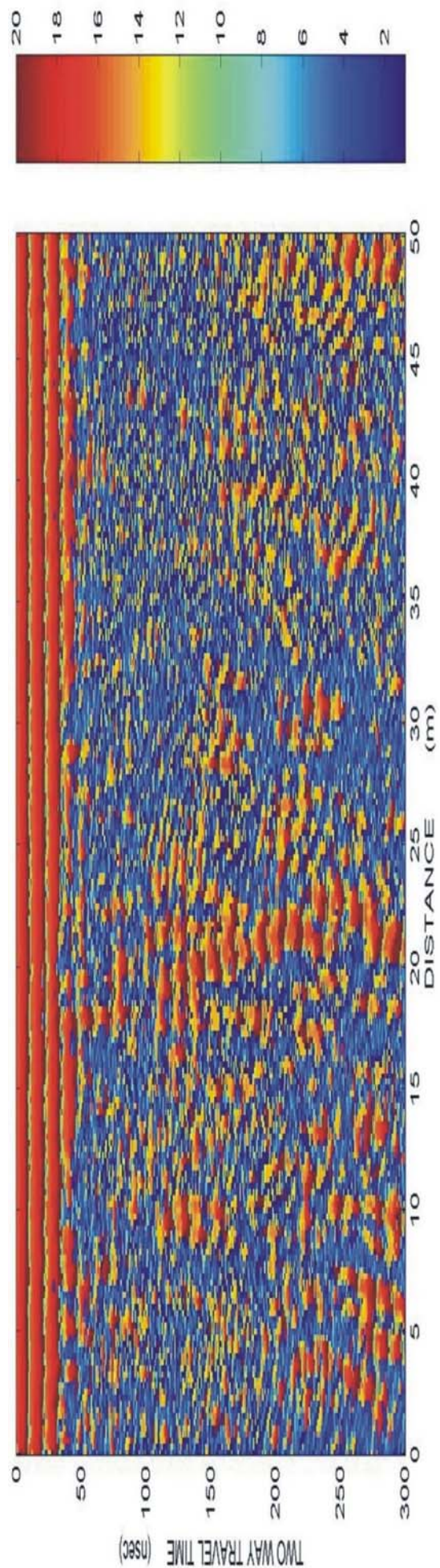
Στις εικόνες παρατηρούνται 2 μεγάλες ομάδες, μια με ψυχρά χρώματα και μια με θερμά. Επομένως, το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στα σημεία που υπάρχει αυτή η μεταβολή. Στις περιοχές με θερμά χρώματα εμφανίζονται οι ανακλάσεις οπότε αναμένεται, στα σημεία όπου διακόπτονται από τα ψυχρά χρώματα, να υπάρχει και διαφοροποίηση στο έδαφος και πιθανότατα και στις αντιστάσεις των πετρωμάτων στην τομογραφία.



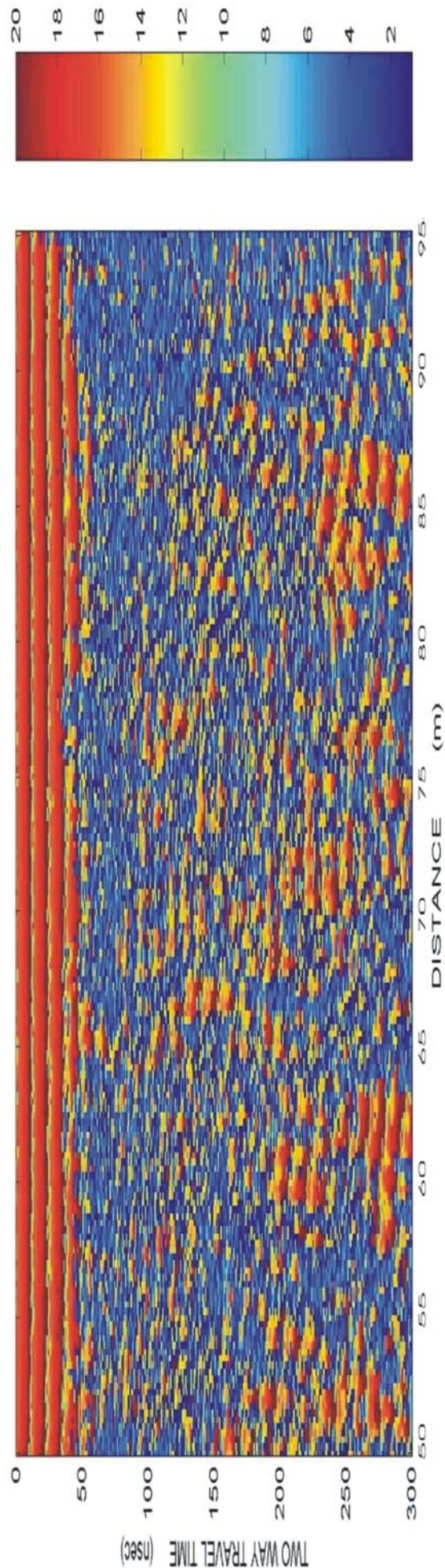
Σχ.5.55 Πρώτο μέρος της εικόνας της ταξινόμησης σε 20 τάξεις της δεύτερης γραμμής μελέτης



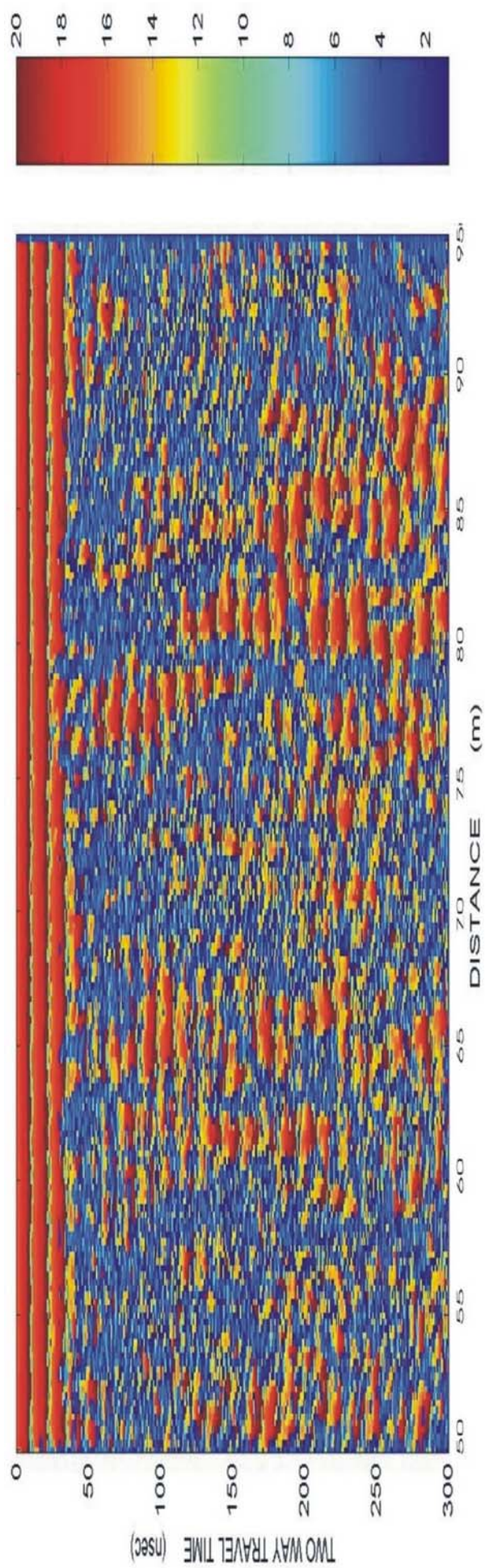
Σχ.5.56 Δεύτερο μέρος της εικόνας της ταξινόμησης σε 20 τάξεις της δεύτερης γραμμής μελέτης



Σχ.5.57 Πρώτο μέρος της εικόνας της ταξινόμησης σε 20 τάξεις της τρίτης γραμμής μελέτης



Σχ.5.58 Δεύτερο μέρος της εικόνας της ταξινόμησης σε 20 τάξεις της τρίτης γραμμής μελέτης



Σχ.5.59 Εικόνα της ταξινόμησης σε 20 τάξεις της τέταρτης γραμμής μελέτης

5.6 Ερμηνεία αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

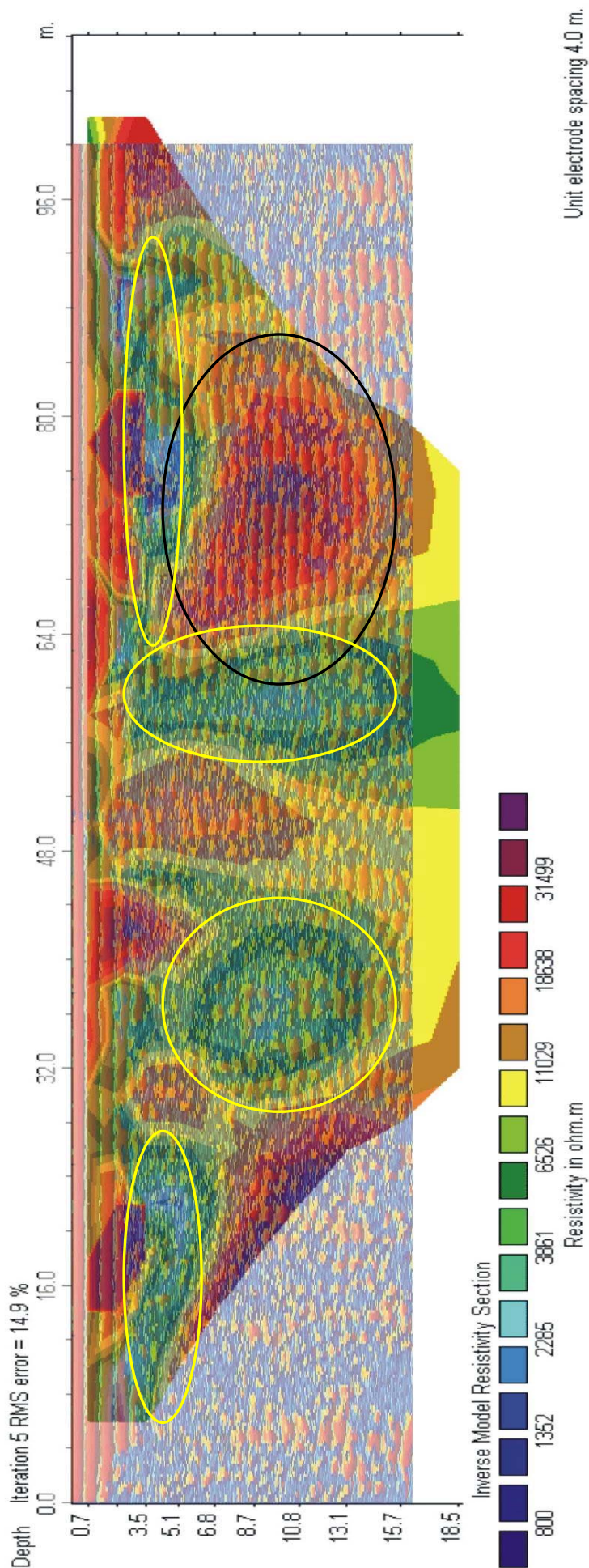
Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε υπέρθεση των εικόνων της ηλεκτρικής τομογραφίας και των εικόνων του γεωραντάρ από το τελικό στάδιο της ταξινόμησης.

Στις εικόνες εμφανίζονται περιοχές (μαύροι κύκλοι) οι οποίες έχουν υψηλότερες αντιστάσεις, σχετικά με τις γειτονικές περιοχές, και ταυτόχρονα ανήκουν σε τάξεις με θερμά χρώματα όπου δεν διακόπτονται οι ανακλάσεις.

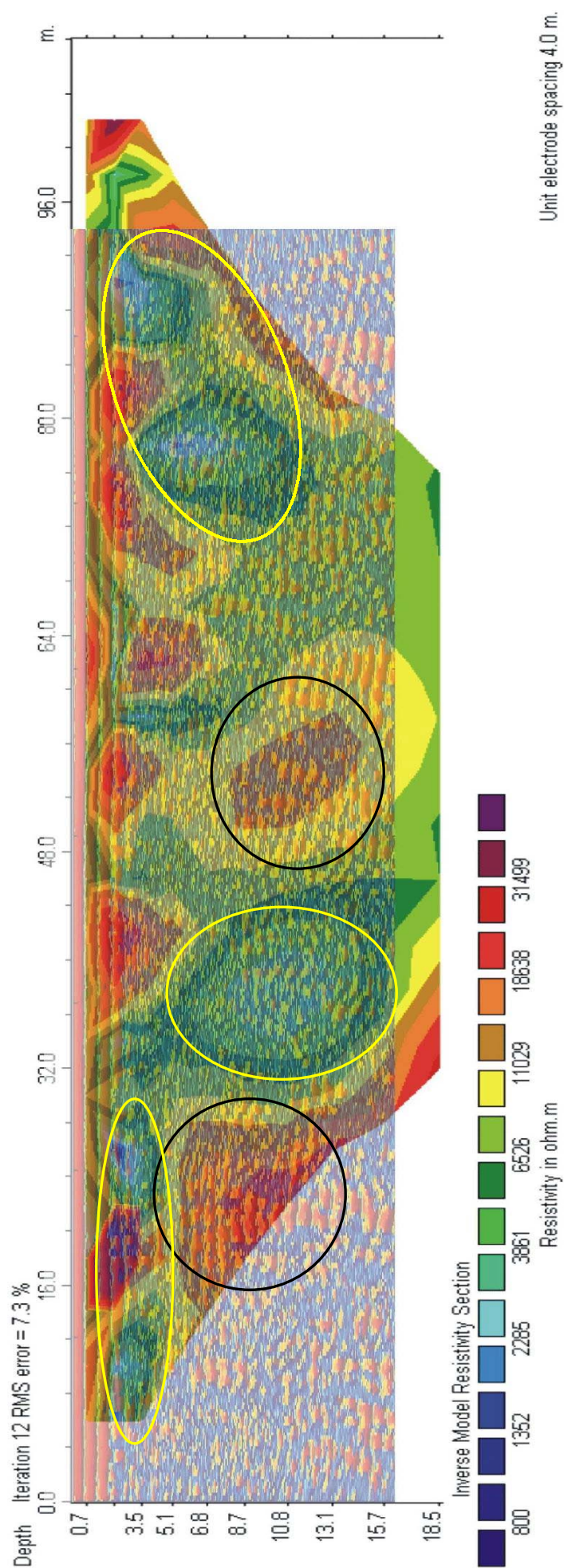
Αντίθετα στις ίδιες εικόνες εμφανίζονται περιοχές (κίτρινοι κύκλοι) οι οποίες χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες αντιστάσεις και ταυτόχρονα ανήκουν σε τάξεις με ψυχρά χρώματα όπου διακόπτεται η συνέχεια των ανακλάσεων. Οι περιοχές αυτές είναι εκείνες που παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Οι περιοχές όπου αναμένεται να υπάρχουν έγκοιλα είναι εκείνες που συνδυάζουν διακοπή της συνέχειας του ανακλαστήρα και χαμηλότερες αντιστάσεις σε σχέση με το περιβάλλον πέτρωμα.

Από την επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ επιτεύχθηκε ο εντοπισμός των περιοχών όπου συγκεντρώνεται το ενδιαφέρον. Αρχικά γίνεται προσπάθεια απόκτησης πληροφορίας ακόμα και στα μεγαλύτερα βάθη, στη συνέχεια τονίζονται οι ανακλαστήρες, και τέλος εντοπίζονται οι περιοχές όπου διακόπτεται η συνέχεια των ανακλαστήρων και συνδυάζονται με εκείνες τις περιοχές που παρουσιάζουν χαμηλότερες αντιστάσεις.

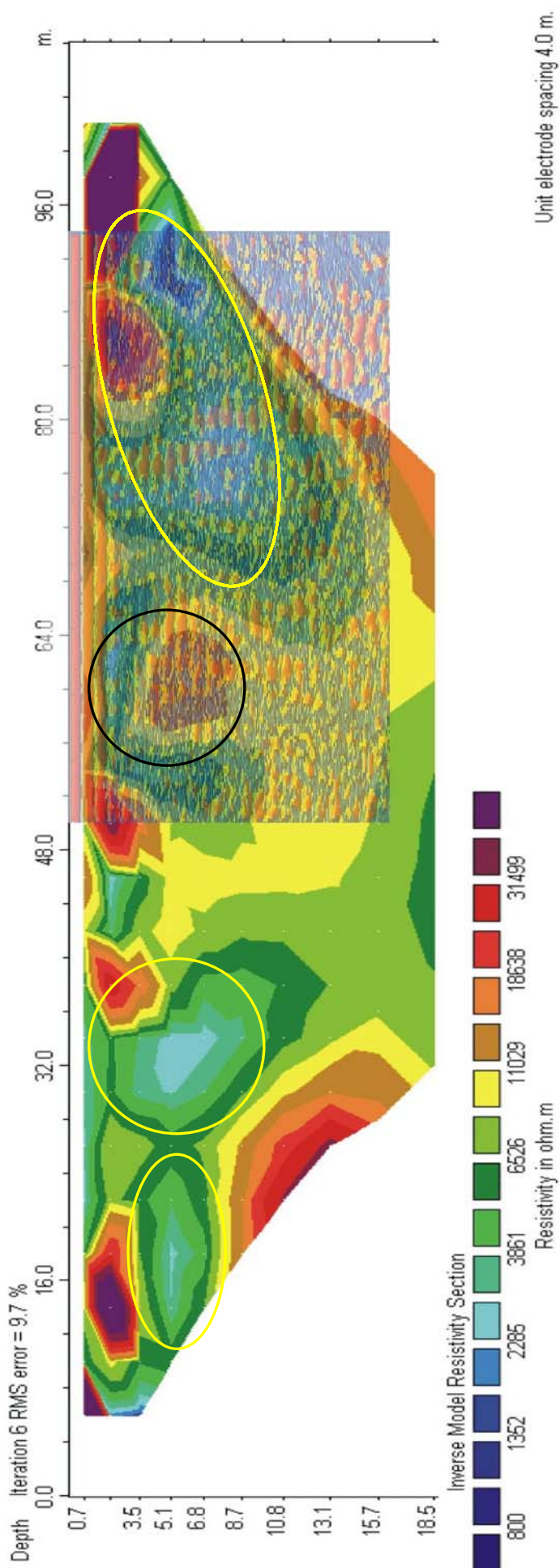
Από την επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ και την σύγκριση με τις εικόνες της ηλεκτρικής τομογραφίας συμπεραίνεται και επιβεβαιώνεται η παρουσία των τριών ανωμαλιών που αναφέρθηκαν στην διπλωματική εργασία (Χορευτάκη, 2003). Μετά την απαραίτητη επεξεργασία των δεδομένων διαπιστώνεται, για άλλη μια φορά, η σημασία της γεωφυσικής έρευνας στο έργο του μηχανικού παραγωγής για το βέλτιστο σχεδιασμό εκμεταλλεύσεων.



Σχ.5.60 Υπέρθωση εικόνων της ταξινόμησης και της ηλεκτρικής τομογραφίας της δεύτερης γραμμής μελέτης



Σχ.5.61 Υπέρθεση εικόνων της ταξινόμησης και της ηλεκτρικής τομογραφίας της τρίτης γραμμής μελέτης



Σχ.5.62 Υπερθεση εικόνων της ταξινόμησης και της ηλεκτρικής τομογραφίας της τέταρτης γραμμής μελέτης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ν. Σπανουδάκης, «Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ και εφαρμογή σε περιβαλλοντικά προβλήματα», μεταπτυχιακή εργασία (2002) τμήμα Μηχ. Ορυκτών Πόρων πολυτεχνείου Κρήτης
2. Γ. Χορευτάκη, «Γεωφυσική διασκόπηση με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας και του υπεδάφειου ραντάρ στο λατομείο Ζωφόρων του Ν. Ηρακλείου», διπλωματική εργασία (2003) τμήμα Μηχ. Ορυκτών Πόρων πολυτεχνείου Κρήτης.
3. Π. Παπακωνσταντίνου, «Φεωφυσική διασκόπηση με τη μέθοδο του γεωραντάρ για τον εντοπισμό καρστικών δομών στο οροπέδιο Ομαλού Χανίων», διπλωματική εργασία (2006) τμήμα Μηχ. Ορυκτών Πόρων πολυτεχνείου Κρήτης.
4. Α. Παπαβασιλείου, «Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ με την χρήση νευρωνικών δικτύων – εφαρμογές σε περιβαλλοντικά προβλήματα», διπλωματική εργασία (2004) τμήμα Μηχ. Ορυκτών Πόρων πολυτεχνείου Κρήτης
5. Σ. Μερτίκας, (1999). Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας. (Σημειώσεις)
6. H. Hamdan, «Ανάπτυξη μεθόδου εξασθένισης πολλαπλά ανακλώμενων κυμάτων σε καταγραφές γεωραντάρ και εφαρμογή σε περιβαλλοντικά προβλήματα», μεταπτυχιακή εργασία (2004) τμήμα Μηχ. Ορυκτών Πόρων πολυτεχνείου Κρήτης
7. E. Cardarelli, C. Marrone, L. Orlando, «Evaluation of tunnel stability using integrated geophysical methods», Journal of Applied Geophysics 52 (2003), Pages 93 - 102
8. L. Orlando, «Semi quantitative evaluation of massive rock quality using ground penetrating radar», Journal of Applied Geophysics 52 (2003), Pages 1 – 9
9. R. Bachrach, A. Nur, «Same wavelength GPR and ultra shallow seismic reflection on a river point bar: Sand stratigraphy and water table complexity», Geophysics, (1998) Expanded Abstracts
10. R. Bachrach, J. Rickett, «Ultra Shallow Seismic Reflection in Depth: Examples from 3D and 2D ultra shallow surveys with application to joint Seismic and GPR imaging», Geophysics, (1999) Expanded Abstracts

11. M. Rasheda, D. Kawamura, H. Nemoto, T. Miyata, K. Nakagawa, «Ground penetrating radar investigations across the Uemachi fault, Osaka, Japan», *Journal of Applied Geophysics* 53 (2003), Pages 63 – 75
12. G. Grandjean, J. C. Gourry, « GPR data processing for 3D fracture mapping in a marble quarry (Thassos, Greece)», *Journal of Applied Geophysics* 36 (1996), Pages 19-30
13. T. Toshioka, T. Tsuchida, K. Sasahara, «Application of GPR to detecting and mapping cracks in rock slopes», *Journal of Applied Geophysics* 33 (1995), Pages 119-124
14. G. Leucci, «Contribution of Ground-penetrating Radar and Electrical Resistivity Tomography to identify the cavity and fractures under the main Church in Botrugno (Lecce, Italy) »
15. G. F. Margrave, «Numerical Methods of Exploration Seismology with algorithms in MATLAB», Department of Geology and Geophysics, University of Calgary (2001), Pages 77 – 134
16. Taner M. T. (1992-2000). Attributes Revisited <http://www.rocksolidimages.com>
17. Barnes A.E. (1998) The Complex Seismic Trace Made Simple. *The Leading Edge* 17, pp 473-476.
18. Kulkarni A. (1998). Artificial Neural Networks for Image Understanding.
19. Stolt, R. H., 1978, Migration by Fourier transform: *Geophysics*, 43, 23–48.