

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»

**Επεξεργασία θαλάσσιων σεισμικών
καταγραφών για την απεικόνιση δομών σε
περιοχή του Ιονίου**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΡΙΟΣ ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγ. Α. Βαφείδης (επιβλέπων)

Καθηγ. Ε. Μανούτσου

Αναπλ. Καθηγ. Ε. Στειακάκης

Χανιά

Ιούλιος, 2021

Περίληψη

Αντικείμενο της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η επεξεργασία των θαλάσσιων σεισμικών δεδομένων μεγάλου βάθους που αντιστοιχούν σε γραμμή μελέτης στο νότιο Ιόνιο, μήκους 80 km. Σκοπός ήταν η δημιουργία σεισμικής τομής για την απεικόνιση της γεωλογικής δομής του υπεδάφους κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Η επεξεργασία των δεδομένων σεισμικής ανάκλασης πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα ProMAX 2D. Εφαρμόστηκαν τεχνικές για την εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων και την αύξηση της διακριτικής ικανότητας της σεισμικής τομής.

Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκε αποκοπή των πρώτων αφίξεων, διαγραφή των καναλιών θορύβου και διόρθωση για την γεωμετρική διασπορά. Στο δεύτερο στάδιο έγινε ανάλυση ταχυτήτων και δημιουργήθηκε μοντέλο ταχυτήτων. Στο τρίτο στάδιο εφαρμόστηκε φίλτρο f-k για την εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων μεγάλης περιόδου. Στο τέταρτο στάδιο εφαρμόστηκε η μέθοδος υπέρθεσης σταθερής ταχύτητας και εφαρμογής φίλτρων κλίσης. Στο πέμπτο στάδιο εφαρμόστηκε αποσυνέλιξη πρόβλεψης για την εξασθένηση των περιοδικών πολλαπλών ανακλάσεων στην τομή υπέρθεσης. Στο έκτο στάδιο χωροθετήθηκε η τομή υπέρθεσης με την μέθοδο Kirchhoff. Στο έβδομο στάδιο εφαρμόστηκε χωροθέτηση Kirchhoff στα δεδομένα διάταξης σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη και ακολούθησε η υπέρθεση τους με σκοπό την παραγωγή χωροθετημένης τομής με αυξημένο λόγο σήματος προς θόρυβο. Οι τελικές τομές χωροθέτησης από την εφαρμογή τεχνικών για την εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων συγκρίθηκαν και προτάθηκαν τεχνικές για την περαιτέρω αύξηση της διακριτικής ικανότητας της τελικής τομής υπέρθεσης.

Η διαδικασία εξασθένησης των πολλαπλών ανακλάσεων με το φίλτρο f-k αποδείχθηκε αρκετά αποτελεσματική στην εξασθένηση της ενέργειας των πολλαπλών ανακλάσεων μεγάλης περιόδου. Η αποσυνέλιξη πρόβλεψης εξασθένησε την απομένουσα ενέργεια των πολλαπλών ανακλάσεων σε βαθμό που να μην παρεμβάλλεται στο σήμα των κύριων ανακλάσεων στην τομή χωροθέτησης. Η μέθοδος υπέρθεσης σταθερής ταχύτητας και εφαρμογής φίλτρων κλίσης παρήγαγε υψηλότερης διακριτικής ικανότητας σεισμική τομή από την χωροθέτηση Kirchhoff στα δεδομένα διάταξης σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη.

Abstract

Seismic reflection data for a 2D offshore seismic line (80 Km) located in the south Ionian Sea was processed for this thesis. The purpose of the seismic data processing was the subsurface imaging of the aforementioned deep-sea region. Marine seismic data are typically imprinted with multiples energy, which is undesirable in seismic imaging. In order to increase S/N ratio, two methods for the suppression of multiples were applied and two processing sequences were introduced which provide an improved image.

The processing of the seismic data has been implemented using the seismic processing and imaging software ProMAX 2D. Prior to poststack Kirchhoff time migration and constant-offset prestack Kirchhoff migration, multiple attenuation methods and trace processing methods were applied. A velocity analysis has been accomplished by using the semblance method to determine the RMS velocities, further used for multiple constant velocity stacks

with dip filter method. Multiple attenuation methods include f-k filtering for the suppression of long period multiples and predictive deconvolution, which was applied to the stacked section to suppress water column reverberations.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου Αντώνιο Βαφείδη και Νικόλαο Ανδρονικίδη για την ανάθεση του θέματος, για την διάθεση των σεισμικών δεδομένων και του απαραίτητου εξοπλισμού και για την καθοδήγησή τους κατά την διάρκεια της επεξεργασίας και καθ' όλη την διάρκεια του μεταπτυχιακού.

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract.....	2
Κεφάλαιο 1 ^ο : Μέθοδος σεισμικής ανάκλασης	7
1.1 Εισαγωγή	7
1.2 Βασικές αρχές της μεθόδου.....	8
1.3 Λήψη δεδομένων στη θαλάσσια σεισμική έρευνα.....	11
1.4 Ψηφιοποίηση δεδομένων	16
Κεφάλαιο 2 ^ο : Επεξεργασία δεδομένων ενδιάμεσου κοινού σημείου	21
2.1 Εισαγωγή	21
2.2 Αποσυνέλιξη.....	22
• 2.2.1 Εισαγωγή	22
• 2.2.2 Συνελικτικό μοντέλο.....	25
• 2.2.3 Αποσυνέλιξη αιχμής με αντίστροφο φίλτρο	26
• 2.2.4 Στατιστική αποσυνέλιξη	28
• 2.2.5 Φίλτρα Wiener.....	30
• 2.2.6 Αποσυνέλιξη αιχμής.....	32
• 2.2.7 Αποσυνέλιξη πρόβλεψης	33
2.3 Δυναμική Διόρθωση-Ανάλυση Ταχυτήτων- Υπέρθεση	35
• 2.3.1 Εισαγωγή	35
• 2.3.2 Δυναμική διόρθωση οριζόντιου ανακλαστήρα	36
• 2.3.3 Δυναμική διόρθωση κεκλιμένης διαχωριστικής επιφάνειας.....	38
• 2.3.4 Ανάλυση ταχυτήτων	39
• 2.3.5 Υπέρθεση	40
2.4 Εξασθένηση σεισμικού κύματος.....	41
2.5 Μέθοδοι εξασθένησης πολλαπλών ανακλάσεων	44
• 2.5.1 Εισαγωγή	44
• 2.5.2 Φίλτρο f-k	47
• 2.5.3 SRME.....	51
2.6 Χωροθέτηση.....	55
• 2.6.1 Εισαγωγή	55
• 2.6.2 Χρόνος διαδρομής περιθλώμενης ακτίνας	57
• 2.6.3 Περίθλαση στον όγκο των δεδομένων.....	58
• 2.6.4 Περίθλαση σε σεισμική τομή σταθερού h	61
• 2.6.5 Μοντελοποίηση ανακλαστήρα	61

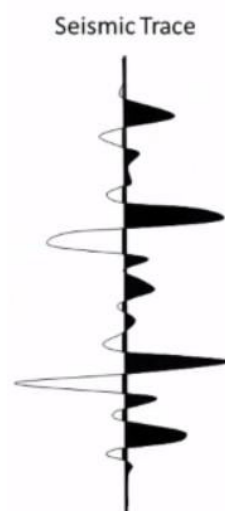
• 2.6.6 Χωροθέτηση Kirchhoff	63
• 2.6.7 Χωροθέτηση σε σεισμική τομή σταθερού h	64
Κεφάλαιο 3 ^ο : Επεξεργασία δεδομένων της γραμμής AEG-1	65
3.1 Εισαγωγή	65
3.2 Γεωλογία περιοχής μελέτης.....	67
3.3 Πρώτο διάγραμμα ροής.....	68
• 3.3.1 Αποκοπή πρώτων αφίξεων -διαγραφή των καναλιών θορύβου και διόρθωση γεωμετρικής διασποράς.....	68
• 3.3.2 Ανάλυση ταχυτήτων	70
• 3.3.3 Φίλτροf-κ για την εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων	73
• 3.3.4 Δυναμική διόρθωση και υπέρθεση	77
• 3.3.5 Αποσυνέλιξη πρόβλεψης	84
• 3.3.6 Χωροθέτηση Kirchhoff μετά την υπέρθεση	86
3.4 Δεύτερο διάγραμμα ροής.....	93
• 3.4.1 Χωροθέτηση Kirchhoff σε τομές σταθερού h	93
Κεφάλαιο 4 ^ο : Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	101
4.1 Εισαγωγή.....	101
4.2 Συμπεράσματα από την εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων	101
4.3 Συμπεράσματα από την σύγκριση των τομών χωροθέτησης	102
4.4 Προτάσεις.....	103
Βιβλιογραφία	104

Κεφάλαιο 1^ο: Μέθοδος σεισμικής ανάκλασης

1.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης είναι γεωφυσική μέθοδος για την μελέτη του φλοιού της Γης και διακρίνεται στη χερσαία και στη θαλάσσια μεθοδολογία έρευνας. Η θαλάσσια σεισμική έρευνα μελετά τα υποκείμενα του πυθμένα στρώματα. Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στην καταγραφή του χρόνου που χρειάζεται ένα σεισμικό κύμα, που εκπέμπεται από σεισμική πηγή, να φθάσει στον πυθμένα και στα υποκείμενα στρώματα, να ανακλαστεί και να επιστρέψει στην επιφάνεια. Το σεισμικό κύμα διαδίδεται σαν ελαστικό κύμα μέσα στα υποκείμενα στρώματα. Ένα μέρος της ενέργειας του ανακλάται στις διαχωριστικές επιφάνειες των στρωμάτων, ανάλογα με την διαφορά της ακουστικής εμπεδησής (γινόμενο πυκνότητας και σεισμικής ταχύτητας) τους, και καταγράφεται από δέκτες στην επιφάνεια. Το υπόλοιπο μέρος διαθλάται και εισχωρεί στα κατώτερα στρώματα έως ότου εξασθενήσει χωρίς να επιστρέψει στην επιφάνεια.

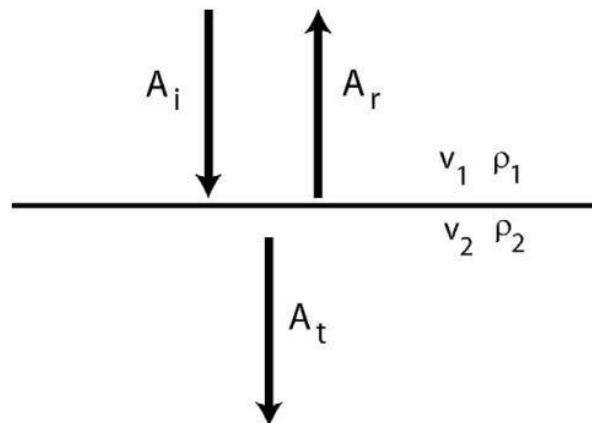
Υπάρχουν δύο είδη σεισμικών καταγραφών θαλάσσιων ερευνών: α) απλής κάλυψης και β) πολλαπλής κάλυψης. Η πρώτη χρησιμοποιείται για την μελέτη επιφανειακών στρωμάτων και η δεύτερη για την μελέτη και των βαθύτερων στρωμάτων. Η αρχή της μεθόδου της πολλαπλής κάλυψης είναι η καταγραφή από το ίδιο σημείο του υπεδάφους πολλών ανακλώμενων σεισμικών κυμάτων. Ο συνδυασμός τους με την κατάλληλη επεξεργασία, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία σεισμικής τομής με αυξημένο λόγο σήματος προς θόρυβο. Η πηγή συνήθως είναι το αεροβόλο και οι δέκτες είναι τα υδρόφωνα. Τα υδρόφωνα περιέχονται σε καλώδιο και σύρονται από πλοίο. Οι ομάδες υδρόφωνων σχηματίζουν τα κανάλια καταγραφής. Κάθε υδρόφωνο μετατρέπει το σεισμικό σήμα σε ηλεκτρικό, το οποίο αποθηκεύεται σε ψηφιακή μορφή. Οι καταγραφές των καναλιών αποτελούν τα σεισμικά δεδομένα ή τα σεισμικά ίχνη. Η καταγραφή των ανακλώμενων κυμάτων κατά μήκος κάθε ίχνους αντιστοιχεί στα τοπικά μέγιστα.



Σχήμα 1.1 Σεισμικό ίχνος

1.2 Βασικές αρχές της μεθόδου

Στη μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης χρησιμοποιούνται τεχνητές πηγές παραγωγής σεισμικών κυμάτων, τα οποία διαδίδονται στο υπέδαφος σαν ελαστικά κύματα, ανακλώνται και διαθλώνται στις διαχωριστικές επιφάνειες των σχηματισμών εξαιτίας της διαφορετικής ακουστικής εμπίδησής τους και επιστρέφουν στην επιφάνεια, όπου η κίνηση των υλικών σημείων του εδάφους που προκαλείται από τα ανακλώμενα σεισμικά κύματα και ο χρόνος που απαιτείται για να διαδοθούν από την πηγή στους δέκτες καταγράφονται.



Σχήμα 1: Πρόσπτωση κύματος υπό φυσιολογική γωνία σε διαχωριστική επιφάνεια. A_i είναι το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος, A_r είναι το πλάτος του ανακλώμενου κύματος και A_t είναι το πλάτος του διαθλώμενου κύματος

Για γνωστό πλάτος προσπίπτοντος P κύματος τα πλάτη των ανακλώμενων και διαθλώμενων κυμάτων υπολογίζονται από τις εξισώσεις του Zoeppritz. Αν δύο στρώματα χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ταχύτητα διάδοσης του σεισμικού κύματος και πυκνότητα, τότε μέρος της ενέργειας της προσπίπτουσας σεισμικής ακτίνας στην διαχωριστική τους επιφάνεια μερικώς θα ανακλαστεί και μερικώς θα διαθλαστεί. Το ποσό της ενέργειας που θα ανακλαστεί εξαρτάται από την διαφορά της ακουστικής εμπίδησης (acoustic impedance) των σχηματισμών, AI . Η ακουστική εμπίδηση ορίζεται ως το γινόμενο της ταχύτητας διάδοσης του σεισμικού κύματος V και της πυκνότητας ρ του μέσου μετάδοσης

$$AI = V\rho \quad (1)$$

Στο σχήμα 1, απεικονίζονται δυο στρώματα με ταχύτητα και πυκνότητα V_1, ρ_1 και V_2, ρ_2 αντίστοιχα και ένα σεισμικό P κύμα με πλάτος A_i , που προσπίπτει κάθετα στην οριζόντια διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των σχηματισμών με αποτέλεσμα να μην παράγονται S κύματα. Ο συντελεστής ανάκλασης (reflection coefficient), RC , της διαχωριστικής επιφάνειας των σχηματισμών, ορίζεται από την σχέση:

$$RC = \frac{AI_2 - AI_1}{AI_2 + AI_1} = \frac{V_2 * \rho_2 - V_1 * \rho_1}{V_2 * \rho_2 + V_1 * \rho_1} \quad (2)$$

Οπότε, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά της ακουστικής εμπίδησης των στρωμάτων τόσο περισσότερη ενέργεια θα ανακλαστεί. Η διαφορά της ακουστικής εμπίδησης μπορεί να οφείλεται σε αλλαγές στη λιθολογία, στο πορώδες και στον βαθμό κορεσμού των

στρωμάτων. Ο συντελεστής διάθλασης, TC, της διαχωριστικής επιφάνειας των σχηματισμών, ορίζεται από την σχέση:

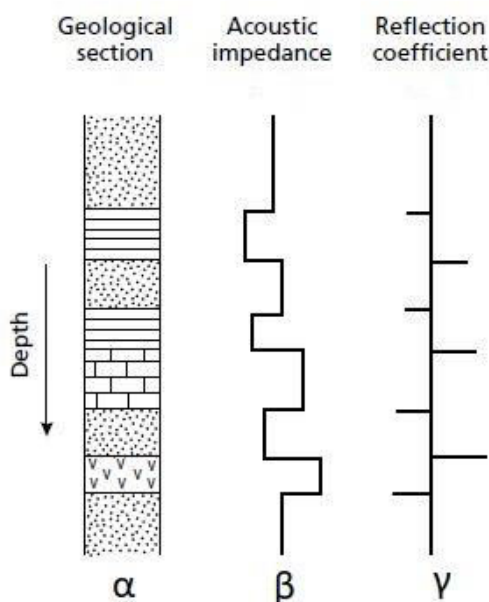
$$TC = \frac{2 * AI_1}{AI_2 + AI_1} = \frac{2V_1 * \rho_1}{V_2 * \rho_2 + V_1 * \rho_1} \quad (3)$$

Τα πλάτη A_r και A_t των ανακλώμενων και διαθλώμενων P κυμάτων εξαρτώνται από το πλάτος A_i του προσπίπτοντος κύματος και τον συντελεστή ανάκλασης και διάθλασης της διαχωριστικής επιφάνειας.

$$RC = \frac{A_r}{A_i} \quad (4)$$

$$TC = \frac{A_t}{A_i} \quad (5)$$

Όταν κύμα ανακλάται στην επιφάνεια στρώματος με υψηλότερη ακουστική εμπέδηση $AI_2 > AI_1$, ο συντελεστής ανάκλασης, RC, είναι θετικός και το ανακλώμενο κύμα βρίσκεται σε φάση με το προσπίπτον. Όταν ανακλάται στην επιφάνεια στρώματος με μικρότερη ακουστική εμπέδηση, ο συντελεστής ανάκλασης είναι αρνητικός και το ανακλώμενο κύμα παρουσιάζει διαφορά φάσης 180° με το προσπίπτον. Στο σχήμα 2, φαίνονται τα γεωλογικά στρώματα, η ακουστική εμπέδησή τους και οι συντελεστές ανάκλασης των διαχωριστικών τους επιφανειών συνάρτηση του βάθους. Η θέση κάθε συντελεστή δείχνει το βάθος κάθε διαχωριστικής επιφάνειας και ο συντελεστής αντιστοιχεί στην τιμή του πλάτους του ανακλώμενου κύματος αν το προσπίπτον κύμα είχε μοναδιαίο πλάτος. Η μετατροπή των συντελεστών ανάκλασης συνάρτηση του βάθους, RC(z), σε χρόνο αποδίδει την χρονοσειρά των συντελεστών ανάκλασης, RC(t).

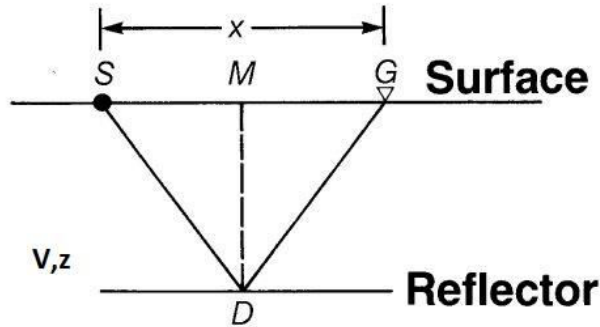


Σχήμα 2: (α) Γεωλογική τομή, (β) Ακουστική εμπέδηση σχηματισμών, (γ) Συντελεστές ανάκλασης των διαχωριστικών επιφανειών τους. (Philip Kearey & Michael Brooks & Ian Hill, 1988)

Ο διπλός χρόνος διαδρομής (TWT) ανακλώμενης ακτίνας, $t(x)$, η οποία παράγεται από την πηγή στη θέση S σε ομοιογενές μέσο με ταχύτητα V, ανακλάται σε οριζόντια επιφάνεια στο

σημείο D σε βάθος z και καταγράφεται από δέκτη στη θέση G σε οριζόντια απόσταση x (source-receiver offset) από την πηγή (σχήμα 3), δίνεται από την εξίσωση.

$$t(x) = \frac{\sqrt{x^2 + 4z^2}}{V} \quad (6)$$



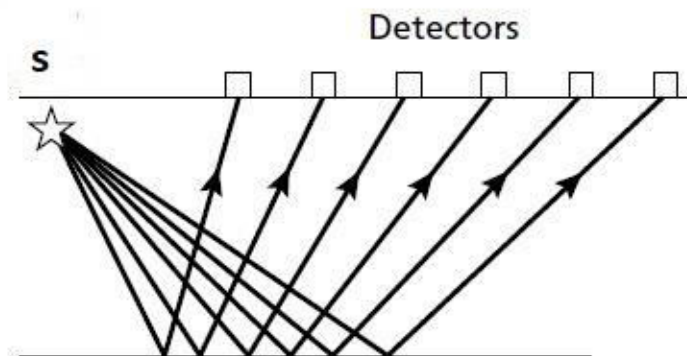
Σχήμα 3: Διαδρομή ανακλώμενης ακτίνας σε οριζόντια διαχωριστική επιφάνεια. M είναι το ενδιάμεσο σημείο της πηγής, S, και του δέκτη, G (Yilmaz, 1987).

Για μηδενική απόσταση πηγής-δέκτη στο σημείο M, ο κατακόρυφος χρόνος, $t(0)$, της ακτίνας που ανακλάται κάθετα στο σημείο D οριζόντιας διαχωριστικής επιφάνειας, δηλαδή έχει πορεία 2MD, δίνεται από την εξίσωση:

$$t(0) = \frac{2z}{V} \quad (7)$$

Ο διπλός χρόνος διαδρομής (TWT) ανακλώμενης ακτίνας, $t(x)$, ως συνάρτηση της οριζόντιας απόστασης, x , της ταχύτητας του μέσου, V , και του κατακόρυφου χρόνου δίνεται από την εξίσωση:

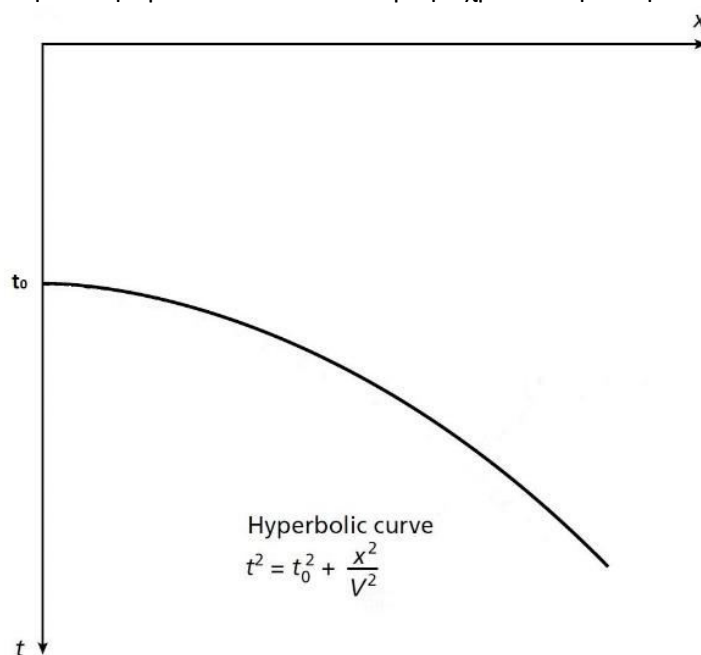
$$t(x)^2 = \frac{4z^2}{V^2} + \frac{x^2}{V^2} = t(0)^2 + \frac{x^2}{V^2} \quad (8)$$



Σχήμα 4: Διαδρομές ανακλώμενων ακτινών, που παράγονται από την πηγή S, σε οριζόντια διαχωριστική επιφάνεια

Στη μέθοδο σεισμικής ανάκλασης ο διπλός χρόνος διαδρομής των ανακλώμενων ακτινών του κύματος (TWT) που παράγονται από την πηγή S καταγράφεται συναρτήση της

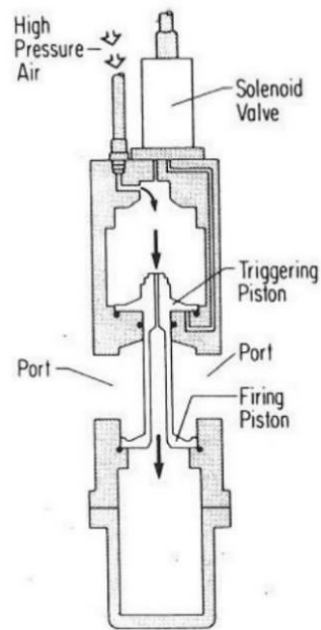
οριζόντιας απόστασης πηγής-δέκτη, x . Στο σχήμα 4 απεικονίζονται οι διαδρομές των ανακλώμενων σεισμικών ακτίνων από οριζόντια διαχωριστική επιφάνεια του κύματος, που παράγονται από την πηγή S . Οι ακτίνες ανακλώνται στην διαχωριστική επιφάνεια και καταγράφονται από δέκτες. Σε διάγραμμα του διπλού χρόνου διαδρομής των ανακλώμενων ακτίνων με την απόσταση πηγής-δέκτη (δρομοχρονικό) η καμπύλη των TWT είναι υπερβολικού τύπου όπως φαίνεται στο σχήμα 5. Χρονική απόκλιση, Δt , είναι η διαφορά δύο TWT, t_1 και t_2 , που καταγράφονται σε διαφορετικές αποστάσεις πηγής-δέκτη, x_1 και x_2 . Κανονική χρονική απόκλιση, Δt_{NMO} , είναι η διαφορά του TWT της σεισμικής ακτίνας που καταγράφεται στην θέση x με τον διπλό κατακόρυφο χρόνο στη θέση $x=0$.



Σχήμα 5: Υπερβολικού τύπου καμπύλη των χρόνων διαδρομής των ανακλώμενων σεισμικών ακτίνων συνάρτηση του offset. x είναι το offset και t ο χρόνος καταγραφής τους

1.3 Λήψη δεδομένων στη θαλάσσια σεισμική έρευνα

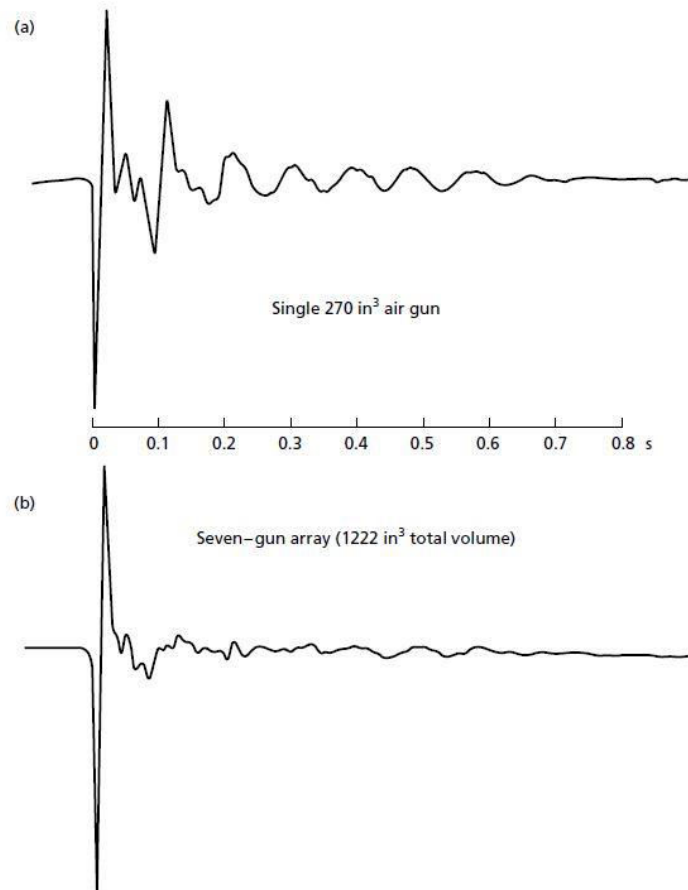
Ο σκοπός της συλλογής των δεδομένων είναι η καταγραφή της κίνησης των υλικών σημείων του εδάφους που προκαλείται από τα ανακλώμενα σεισμικά κύματα στις διαχωριστικές επιφάνειες των σχηματισμών, τα οποία παράγονται από πηγή σε γνωστή θέση και χρόνο. Η καταγραφή της κίνησης συνάρτηση του διπλού χρόνου διαδρομής των ανακλώμενων ακτίνων αποτελεί το σεισμόγραμμα ή το σεισμικό ίχνος και είναι η βασική πηγή πληροφορίας της γεωλογικής δομής του υπεδάφους. Τα βασικότερα όργανα για την λήψη δεδομένων σε θαλάσσια σεισμική έρευνα είναι η σεισμική πηγή, τα υδρόφωνα και το καταγραφικό σύστημα.



Σχήμα 6: Αεροβόλο (Hutchinson&Detrick, 1984)

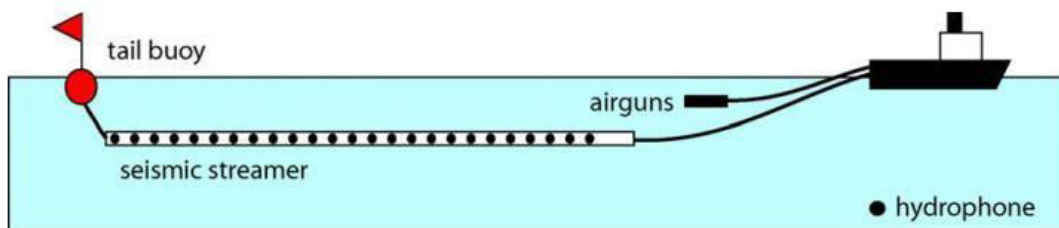
Η παραγωγή των σεισμικών κυμάτων στην ξηρά γίνεται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τη μορφολογία του αναγλύφου και το επιθυμητό βάθος. Στις θαλάσσιες σεισμικές έρευνες χρησιμοποιούνται σεισμικές πηγές υψηλών συχνοτήτων. Οι υψηλές συχνότητες αυξάνουν την κατακόρυφη ανάλυση των σεισμικών δεδομένων αλλά τα αντίστοιχα κύματα εξασθενούν περισσότερο με το βάθος. Μια σεισμική πηγή η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στις θαλάσσιες έρευνες μεγάλου βάθους είναι το αεροβόλο με συχνοτικό εύρος 10-100 Hz. Συνήθως αποτελείται από δοχείο υψηλής πίεσης, θάλαμο πυροδότησης και έμβολο εκτόνωσης. Κατά την έναρξη του κύκλου φόρτισης του όπλου το δοχείο πληρούται με αέρα υψηλής πίεσης, με τη χρήση αεροσυμπιεστών. Στη συνέχεια ο αέρας απελευθερώνεται μέσω βαλβίδας και διοχετεύεται κάτω από την επιφάνεια του εμβόλου, προκαλώντας την προς τα κάτω κίνησή του και την απότομη εκτόνωση του αέρα στον θάλαμο πυροδότησης. Ακολούθως ο αέρας που βρίσκεται στον κάτω θάλαμο απελευθερώνεται στο νερό προκαλώντας παλμό, ο οποίος αποτελεί την κυματομορφή της πηγής.

Η κυματομορφή της πηγής πρέπει να έχει την ελάχιστη δυνατή διάρκεια, δηλαδή να προσεγγίζει τον μοναδιαίο παλμό, για να αυξηθεί η ανάλυση των δεδομένων. Όμως το αεροβόλο δημιουργεί φουσαλίδα υψηλής πίεσης η οποία καθώς ταλαντώνεται δημιουργεί μια αλληλουχία παλμών. Επιπρόσθετοι παλμοί δημιουργούνται από την απελευθέρωση του εναπομένοντα αέρα. Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της διάρκειας της κυματομορφής της πηγής. Για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο συνδυάζονται κυματομορφές από αεροβόλα με διαφορετικές περιόδους. Οι αρχικοί παλμοί θα ενισχυθούν ενώ οι δευτερογενείς παλμοί από τις φουσαλίδες θα αλληλοεξουδετερωθούν με αποτέλεσμα την μείωση της επίδρασης της φουσαλίδας και της διάρκειας της κυματομορφής της πηγής. Στο σχήμα 7, παρουσιάζεται κυματομορφή της πηγής ενός αεροβόλου με μέγιστη πίεση 4,6 bar και κυματομορφή από τον συνδυασμό επτά αεροβόλων με μέγιστη πίεση 19,9 bar. Παρατηρείται ότι ο συνδυασμός έχει συμπίεσει το φαινόμενο της φουσαλίδας. Αυτή η πηγή αν και έχει υψηλό κόστος δεν έχει σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και έχει καλή επαναληψιμότητα (Βαφειδής, 2011).



Σχήμα 7: Κυματομορφή της πηγής ενός αεροβόλου (α) και επτά αεροβόλων (β). (Philip Kearey & Michael Brooks, & Ian Hill, 1988)

Η μετατροπή της κίνησης των υλικών σημείων σε ηλεκτρικό σήμα απαιτεί την χρήση μορφοτροπέα, ο οποίος μπορεί να εντοπίσει το απαιτούμενο εύρος συχνοτήτων και τα απαιτούμενα πλάτη χωρίς παραμόρφωση. Το υδρόφωνο είναι ένας ηλεκτροακουστικός μορφοτροπέας, ο οποίος χρησιμοποιείται για την λήψη σεισμικών κυμάτων μέσα στο νερό. Τα S κύματα δεν διαδίδονται στο νερό. Επομένως, εντοπίζεται η μεταβολή της πίεσης εξαιτίας των P κυμάτων από τα υδρόφωνα. Οι θαλάσσιοι σεισμικοί δέκτες ή υδρόφωνα είναι συνήθως πιεζοηλεκτρικού τύπου. Οι μεταβολές της πίεσης διαβιβάζονται μέσω του κελύφους του οργάνου επάνω σε λεπτά φύλλα χαλαζία, αναπτύσσοντας έτσι πιεζοηλεκτρικές τάσεις που είναι ανάλογες της μεταβολής πίεσης (Αποστολόπουλος, 2013). Τα υδρόφωνα τοποθετούνται σε θαλάμους κυλινδρικού καλωδίου, το οποίο κατασκευάζεται από υλικά παραπλήσιας ακουστικής εμπέδησης με του νερού, και σύρονται μαζί με τις διατάξεις των αεροβόλων από εξειδικευμένα πλοία σε μικρό βάθος για να αποφευχθεί ο θόρυβος που προέρχεται από τον κυματισμό και τα ρεύματα. Οι αποστάσεις πηγής-υδροφώνων παραμένουν σταθερές κατά την κίνηση του πλοίου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ομάδες υδροφώνων, που περιέχουν δεκάδες ή και εκατοντάδες υδρόφωνα των οποίων οι μεμονωμένες αποκρίσεις στο σεισμικό κύμα αθροίζονται και αποτελούν τα σήματα των καναλιών. Το μειονέκτημα της θαλάσσιας σεισμικής έρευνας είναι τα ρεύματα και ο κυματισμός της θάλασσας που προκαλούν παρέκκλιση του καλωδίου από την πορεία του πλοίου και αποτελούν πηγή θορύβου.

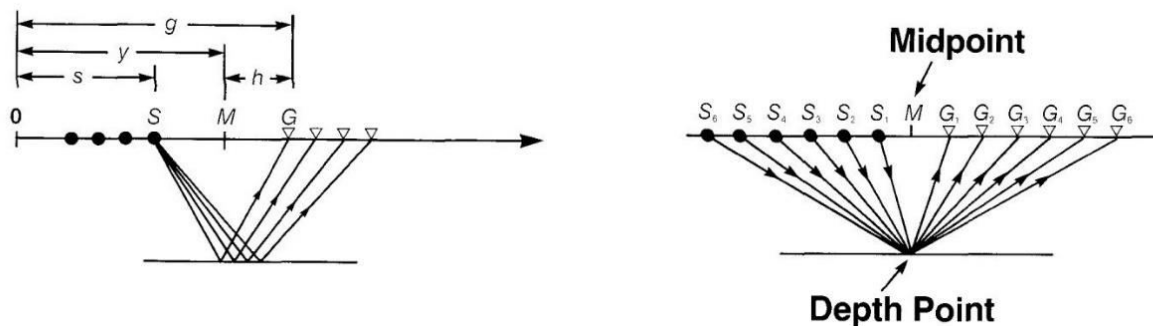


Σχήμα 8: Διάταξη συλλογής δεδομένων σε θαλάσσια σεισμική έρευνα. Το tail buoy καθορίζει την διεύθυνση του καλωδίου σε σχέση με το πλοίο.

Κατά τη διάρκεια της έρευνας πραγματοποιούνται συνεχείς καταγραφές καθώς μετακινείται το πλοίο. Αλλάζουν οι θέσεις της πηγής και των δεκτών αλλά οι αποστάσεις μεταξύ τους παραμένουν σταθερές, με αποτέλεσμα τα σημεία ανάκλασης να καταγράφονται παραπάνω από μια φορά. Στο σχήμα 9, παρουσιάζεται η γεωμετρία της συλλογής των δεδομένων για οριζόντιο ανακλαστήρα, η οποία πραγματοποιείται με βάση τις θέσεις των πηγών, S , με συντεταγμένες s και τις θέσεις δεκτών, G , με συντεταγμένες g . Τα ενδιάμεσα σημεία, M , μεταξύ πηγής και δέκτη, έχουν συντεταγμένες $y = (s+g)/2$. Η συλλογή των ιχνών που αντιστοιχούν στο ίδιο σημείο ανάκλασης αποτελούν τη διάταξη ενδιάμεσου κοινού σημείου (CMP gather). Ο αριθμός των ιχνών σε ένα CMP gather δίνεται από την εξίσωση 9 και καλείται υπεδαφική κάλυψη (fold).

$$n_f = \frac{n_g \Delta g}{2 \Delta s} \quad (9)$$

,όπου n_g είναι το σύνολο των καναλιών, Δg είναι η ισαπόσταση των ομάδων των δεκτών (receiver interval) και Δs είναι η ισαπόσταση των θέσεων των πηγών (source interval).

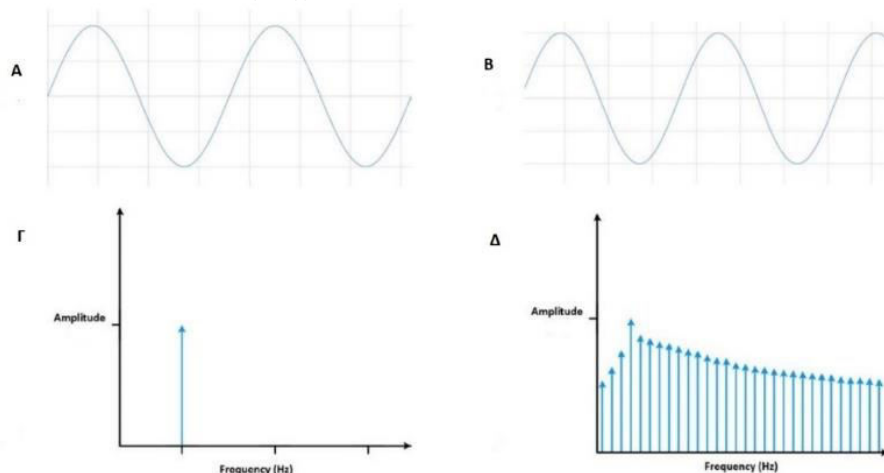


Σχήμα 9: Γεωμετρία της συλλογής των δεδομένων για οριζόντιο ανακλαστήρα (αριστερά). Οι διαδρομές των ανακλώμενων ακτινών που απαρτίζουν τα ίχνη του CMP gather για το σημείο M (δεξιά). S είναι η θέση της πηγής κάθε ίχνους και G είναι η θέση του δέκτη του. (Yilmaz, 1987)

Τα σήματα από τους μορφοτροπείς καταγράφονται σε συγχρονισμό με την εκτόνωση της πηγής. Στη συνέχεια ενισχύονται, φιλτράρονται, ψηφιοποιούνται και αποθηκεύονται με προτυποποιημένο τρόπο κωδικοποίησης σε μαγνητικό μέσο αποθήκευσης μεγάλης χωρητικότητας.

Η διάρκεια της καταγραφής είναι ίση με αυτή τετραγωνικού παλμού και η καταγραφή προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της με τον τετραγωνικό παλμό δηλαδή επιβάλλεται ένα χρονικό παράθυρο με αποτέλεσμα να γίνεται πεπερασμένης διάρκειας. Το αποτέλεσμα είναι η διαπλάτυνση των φασματικών κορυφών. Για τετραγωνικό παράθυρο η διάρκεια της

καταγραφής T πρέπει να είναι μεγαλύτερη από $1/(f_1-f_2)$ για να διαχωριστούν οι συχνότητες f_1 και f_2 του σήματος στο φάσμα συχνοτήτων. Όταν η διάρκεια καταγραφής έχει γίνει σε ακέραια πολλαπλάσια της περιόδου του σήματος, ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier αποδίδει σωστά το φασματικό περιεχόμενο του σήματος. Στο σχήμα 10, φαίνεται ημιτονοειδές σήμα, $g(t)$, με περίοδο T και με συχνότητα f , που έχει αποκοπεί σε χρόνο διπλάσιο της περιόδου του, $2T$, και το φάσμα πλάτους του. Όταν η διάρκεια της καταγραφής δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της περιόδου, το καταγεγραμμένο σήμα θα εμφανίζει ασυνέχειες στα άκρα του. Το αποτέλεσμα είναι η φασματική διαρροή και στην πράξη είναι αδύνατο να αποφευχθεί.

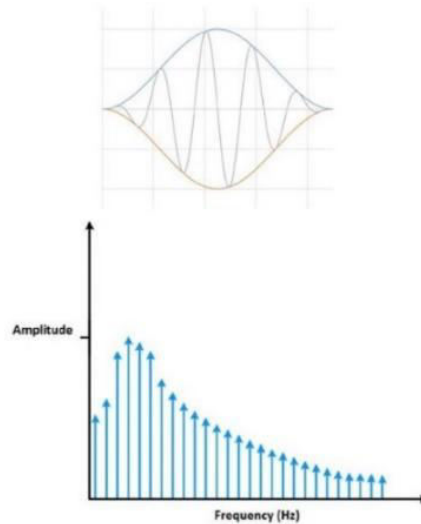


Σχήμα 10: (Α) Διάρκεια καταγραφής με τετραγωνικό χρονικό παράθυρο που αντιστοιχεί σε ακέραιο πολλαπλάσιο της περιόδου του σήματος και το φάσμα πλάτους του (Γ). (Β) Διάρκεια καταγραφής με τετραγωνικό χρονικό παράθυρο που δεν αντιστοιχεί σε ακέραιο πολλαπλάσιο της περιόδου του σήματος και το φάσμα πλάτους του (Δ).
(<https://download.ni.com/evaluation/pxi/Understanding%20FFTs%20and%20Windowing.pdf>)

Τα παράθυρα εξομάλυνσης μειώνουν την επίδραση της φασματικής διαρροής μειώνοντας τη συνεισφορά των άκρων της καταγραφής. Έτσι μειώνονται οι συνέπειες του μη ακέραιου πολλαπλάσιου της περιόδου της καταγραφής του παραθύρου. Ένα παράθυρο εξομάλυνσης επιβάλλει μια συνάρτηση βάρους στις τιμές της καταγραφής, με μειούμενο βάρος των τιμών, καθώς πλησιάζουν στα άκρα της καταγραφής. Τα δειγματοληπτικά σημεία της καταγραφής πολλαπλασιάζονται με την συνάρτηση βάρους. Ένα παράθυρο εξομάλυνσης που εκπληρώνει αυτό το σκοπό δίνεται από την σχέση:

$$w_m = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2m\pi}{n}\right) \right], \text{ για } m = 0, 1, \dots, n-1 \quad (10)$$

, όπου n είναι ο αριθμός των δειγμάτων του σήματος. Καθώς η συνάρτηση w_m τείνει στο 0, δηλαδή, πλησιάζοντας στα άκρα της δειγματοληψίας, οι τιμές του γινομένου θα τείνουν στο 0. Το φάσμα πλάτους της αποκομμένης καταγραφής με παράθυρο εξομάλυνσης φαίνεται στο σχήμα 11. Παρατηρείται ότι η φασματική διαρροή έχει μειωθεί αλλά το φάσμα έχει τροποποιηθεί.



Σχήμα 11: Διάρκεια καταγραφής με παράθυρο εξομάλυνσης του σήματος (πάνω) και το φάσμα πλάτους του (κάτω). (<https://download.ni.com/evaluation/pxi/Understanding%20FFTs%20and%20Windowing.pdf>)

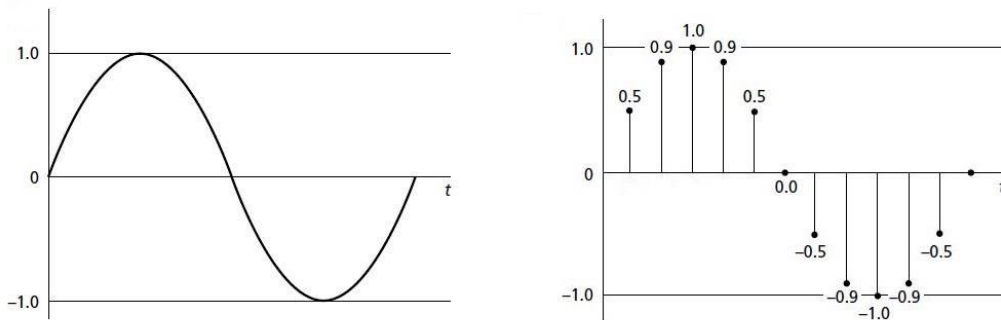
Το αρχείο SEG-Y αποτελεί ένα από τα μορφότυπα που ανέπτυξε η Society of Exploration Geophysicists για την αποθήκευση σεισμικών δεδομένων. Εκτός από τα σεισμικά ίχνη το αρχείο περιέχει και επικεφαλίδες. Οι επικεφαλίδες περιέχουν πληροφορίες που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία των δεδομένων όπως: η γεωμετρία της απόκτησης των δεδομένων, οι συντεταγμένες της πηγής και του υδροφώνου κάθε ίχνους, το διάστημα δειγματοληψίας της ψηφιοποίησης των δεδομένων, το ιστορικό επεξεργασίας, πιθανά φίλτρα κατά την λήψη των δεδομένων κ.α.

1.4 Ψηφιοποίηση δεδομένων

Το σεισμικό σήμα είναι αναλογικό σήμα που αποτελεί συνεχή συνάρτηση του χρόνου. Για την επεξεργασία του απαιτείται η ψηφιοποίησή του. Κατά την ψηφιοποίησή του λαμβάνεται δείγμα ανά τακτά χρονικά διαστήματα Δt , και διακριτοποιείται. Όταν ψηφιοποιείται μια συνεχής συνάρτηση $x(t)$, παίρνει την μορφή:

$$x(t) \equiv x(k\Delta t) = \sum_k x_k \delta(t - k\Delta t), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (11)$$

, όπου Δt είναι το διάστημα δειγματοληψίας και δίνεται η συνάρτηση του Dirac. Στο σχήμα 12, φαίνεται μια συνεχής συνάρτηση του χρόνου και η ψηφιοποιημένη μορφή της. Η συνεχής συνάρτηση έχει αντικατασταθεί από διακριτές τιμές.



Σχήμα 12: Συνεχής συνάρτηση (αριστερά) και η ψηφιοποίησή της (δεξιά). (Philip Kearey & Michael Brooks & Ian Hill, 1988)

Μια περιοδική συνάρτηση μπορεί να εκφραστεί με δύο τρόπους: στον χρόνο, όπου εκφράζεται συνάρτηση του χρόνου και στο χώρο των συχνοτήτων, όπου το πλάτος και η φάση της εκφράζονται ως συνάρτηση της συχνότητας. Η αναπαράσταση συνάρτησης $x(t)$ στο χώρο των συχνοτήτων πραγματοποιείται μέσω της φασματικής ανάλυσης ή ανάλυσης Fourier. Η ανάλυση αυτή στηρίζεται στο θεώρημα Fourier, σύμφωνα με το οποίο μια περιοδική συνάρτηση $x(t)$, με περίοδο T , μπορεί να παρασταθεί ως άθροισμα άπειρων ημιτονικών και συνημιτονικών όρων, οι συχνότητες των οποίων είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας $f_0 = 1/T$. Για διακριτή συνάρτηση του χρόνου το ολοκλήρωμα του μετασχηματισμού Fourier προσεγγίζεται από το άθροισμα:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \approx \sum_k x_k e^{-i\omega k \Delta t}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

, όπου ω είναι η γωνιακή συχνότητα. Η συχνότητα f , σχετίζεται με την γωνιακή συχνότητα με την σχέση $\omega = 2\pi f$. Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier, όπως και ο συνεχής, είναι μιγαδικός αριθμός, δηλαδή:

$$X(\omega) = X_r(\omega) + iX_i(\omega) \quad (13)$$

, όπου $X_r(\omega)$ και $X_i(\omega)$ είναι η πραγματική και η φανταστική συνιστώσες του $X(\omega)$. Στην εκθετική της μορφή η εξίσωση 13 είναι:

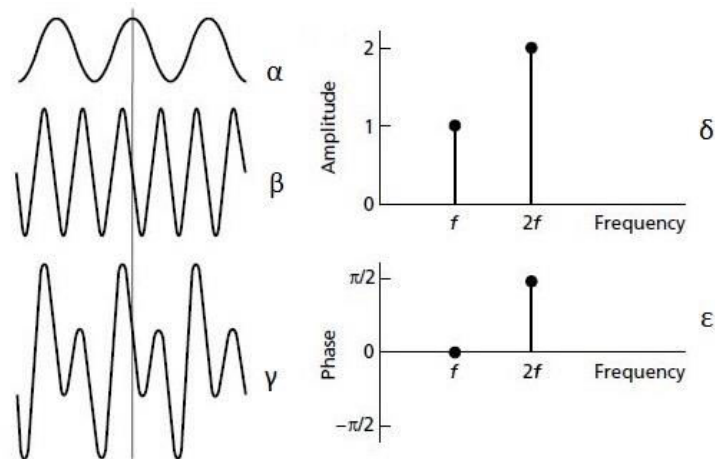
$$X(\omega) = A(\omega) e^{i\varphi(\omega)} = A(\omega) [\cos \varphi(\omega) + i \sin \varphi(\omega)] \quad (14)$$

όπου

$$A(\omega) = \sqrt{X_r^2(\omega) + X_i^2(\omega)} \quad (15)$$

$$\varphi(\omega) = \tan^{-1} \frac{X_i(\omega)}{X_r(\omega)} \quad (16)$$

Η εξίσωση 14 ονομάζεται φάσμα Fourier της συνάρτησης $x(t)$ και το μέτρο της, $A(\omega)$, είναι το φάσμα πλάτους και η γωνία, $\varphi(\omega)$, είναι το φάσμα φάσης του. Στο σχήμα 13, φαίνεται περιοδική συνάρτηση (γ) που αποτελείται από δύο αρμονικές συνιστώσες (β και α), το φάσμα πλάτους της (δ) και το φάσμα φάσης (ε) της. Την μεγαλύτερη συνεισφορά στην συνάρτηση έχει η συνιστώσα β με συχνότητα $2f$ και οι συνιστώσες έχουν διαφορά φάσης $\pi/2$.



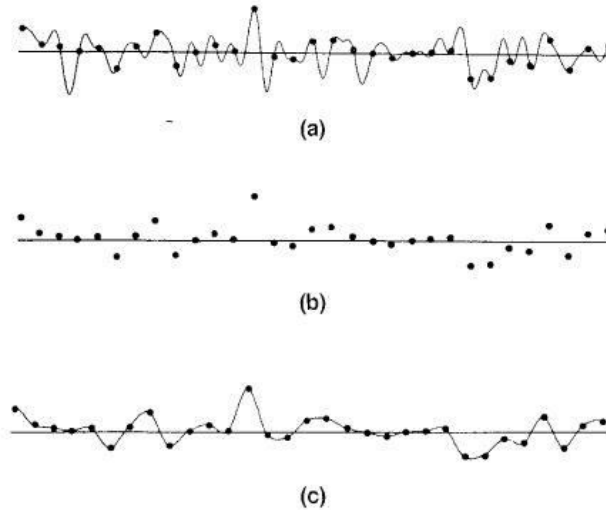
Σχήμα 13: Περιοδική συνάρτηση του χρόνου (γ) που αποτελείται από δύο αρμονικές συνιστώσες (β και α), το φάσμα πλάτους της (δ) και το φάσμα συχνοτήτων της (ϵ). (Philip Kearey & Michael Brooks & Ian Hill, 1988)

Ένας ιδανικός δέκτης θα παράγει σήμα εξόδου που είναι πανομοιότυπο με το σήμα εισόδου, δηλαδή θα περιέχει όλες τις συνιστώσες της εδαφικής κίνησης. Όμως, στην πράξη οι δέκτες παρουσιάζουν πεπερασμένο εύρος του φασματικού περιεχομένου της εδαφικής κίνησης που μπορούν να εντοπίσουν. Ένας ψηφιακός καταγραφέας δειγματοληπτεί και αποθηκεύει το σήμα εξόδου του δέκτη με σταθερό διάστημα δειγματοληψίας μετατρέποντας το σε ακολουθία αριθμών. Ο βαθμός που οι διακριτές τιμές αντιπροσωπεύουν το αρχικό σήμα του δέκτη εξαρτάται από το διάστημα δειγματοληψίας και από την ακρίβεια της κωδικοποίησης του σήματος στα σημεία δειγματοληψίας, η οποία εξαρτάται από το δυναμικό εύρος (dynamic range) του ψηφιακού καταγραφέα.

Το δυναμικό εύρος είναι ο λόγος του μέγιστου A_{\max} προς το ελάχιστο A_{\min} της διακριτοποίησης του αναλογικού σήματος. Όσο μεγαλύτερο είναι το δυναμικό εύρος τόσο ακριβέστερα θα αναπαράγεται το αναλογικό σήμα από την ψηφιοποιημένη μορφή του, επειδή αυξάνονται τα επίπεδα κωδικοποίησης του αναλογικού σήματος. Το δυναμικό εύρος εκφράζεται σε decibel (dB), σύμφωνα με την σχέση:

$$20 \log_{10} \left(\frac{A_{\max}}{A_{\min}} \right) \quad (17)$$

Όσο μικρότερο είναι το διάστημα δειγματοληψίας, τόσο περισσότερα θα είναι τα δειγματοληπτικά σημεία. Με αποτέλεσμα ο ψηφιακός καταγραφέας να εντοπίζει περισσότερες συνιστώσες του σήματος εξόδου του δέκτη. Συνήθως το διάστημα δειγματοληψίας στα σεισμικά δεδομένα ανάκλασης είναι 1 με 4 msec. Στο σχήμα 14, φαίνεται σεισμικό σήμα (α), τα σημεία δειγματοληψίας (β) του και η προσπάθεια ανακατασκευής του από την δειγματοληψία του (γ). Παρατηρούμε ότι το αρχικό σήμα διαφέρει από την ανακατασκευή του. Η διαφορά τους οφείλεται στην έλλειψη των συνιστωσών υψηλών συχνοτήτων του αρχικού σήματος που οφείλεται στο μεγάλο διάστημα δειγματοληψίας. Αν το αρχικό σήμα ήταν πιο πυκνά δειγματοληπτημένο η ανακατασκευή του σήματος θα ήταν πιο αποτελεσματική.



Σχήμα 14: Σεισμικό σήμα δέκτη (α), τα σημεία δειγματοληψίας του (β) του και η προσπάθεια ανακατασκευής του από την δειγματοληψία του (c). (Yilmaz, 1987)

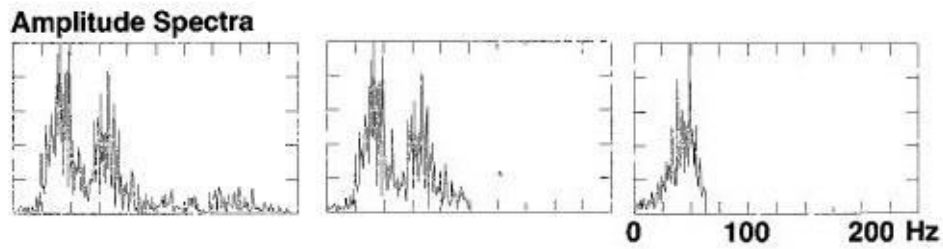
Το ψηφιοποιημένο σεισμικό σήμα είναι χρονοσειρά που υφίσταται με την μορφή διακριτών τιμών που απέχουν ίσο διάστημα δειγματοληψίας, Δt , στο χρόνο:

$$x(t) \equiv x(k\Delta t), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (18)$$

Το αντίστροφο του διαστήματος δειγματοληψίας, Δt , ονομάζεται ταχύτητα ή ρυθμός ή συχνότητα δειγματοληψίας, $\frac{1}{\Delta t}$ και μετριέται σε samples/s. Δεν θα υπάρξει απώλεια πληροφορίας κατά την ψηφιοποίηση του αναλογικού σήματος, δηλαδή θα εντοπίζονται όλες οι συνιστώσες του, αν ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι υψηλότερος από την υψηλότερη συχνότητα του σήματος. Στην περίπτωση που το αναλογικό σήμα είναι ημιτονοειδές, αποδεικνύεται ότι, η επαρκής ψηφιοποίηση του επιτυγχάνεται όταν υπάρχουν τουλάχιστον δύο δείγματα ανά κύκλο της περιόδου του ημιτονοειδούς σήματος. Για οποιοδήποτε διάστημα δειγματοληψίας, Δt , υπάρχει η κρίσιμη συχνότητα δειγματοληψίας του Nyquist:

$$F_N = \frac{1}{2\Delta t} \quad (19)$$

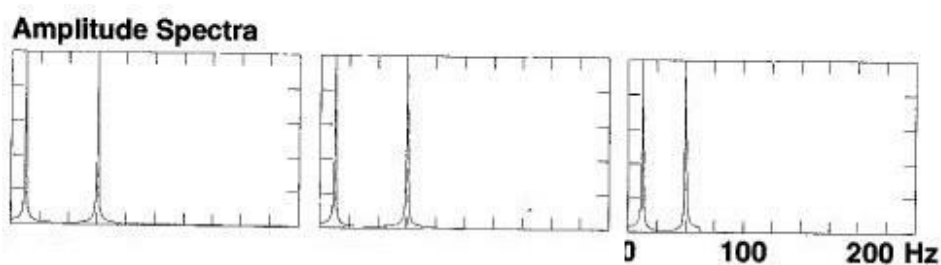
Η συχνότητα F_N είναι σημαντική επειδή αν γίνει δειγματοληψία μιας συνεχούς συνάρτησης με διάστημα δειγματοληψίας Δt , το φάσμα της παρουσιάζει περιορισμένο εύρος ζώνης των συχνοτήτων της, το οποίο είναι, $-F_N < f < F_N$. Στο σχήμα 15, φαίνονται τα φάσματα πλάτους ψηφιοποιημένου σήματος με διαστήματα δειγματοληψίας 2, 4 και 8 ms. Για κάθε διάστημα δειγματοληψίας η υψηλότερη συχνότητα που μπορεί να ανακτηθεί, σύμφωνα με το θεώρημα είναι Nyquist, είναι 250 Hz, 125 Hz και 62,5 Hz, αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι και το εύρος των συχνοτήτων κάθε φάσματος περιορίζεται μέχρι την συχνότητα Nyquist.



Σχήμα 15: Φάσματα πλάτους ψηφιοποιημένου σήματος με διαστήματα δειγματοληψίας 2,4 και 8 ms. (Yilmaz, 1987)

Αν η συνάρτηση περιέχει σήμα σε συχνότητες εκτός του $-F_N < f < F_N$ θα μετατοπιστούν πλασματικά μέσα σε αυτήν τη ζώνη. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται αναδίπλωση συχνοτήτων (Aliasing). Στο σχήμα 16, φαίνονται τα φάσματα πλάτους ψηφιοποιημένου σήματος, που αποτελείται από την υπέρθεση δύο αρμονικών σημάτων συχνότητας 12,5 και 75 Hz, με διαστήματα δειγματοληψίας 2,4 και 8 ms. Η ψηφιοποίηση του σήματος με διαστήματα δειγματοληψίας 2 και 4 ms δεν τροποποιεί το φασματικό περιεχόμενο του αρχικού σήματος, επειδή οι συχνότητες Nyquist είναι υψηλότερες από 12,5 και 75 Hz. Παρατηρούμε ότι οι θεμελιώδεις συχνότητες του σήματος εμφανίζονται στη σωστή θέση. Αντίθετα, στο φάσμα με διάστημα δειγματοληψίας 8 ms η συχνότητα 75 Hz εμφανίζεται σε λάθος θέση στα 50 Hz. Αυτό συμβαίνει επειδή το διάστημα δειγματοληψίας δεν είναι αρκετά μικρό ώστε να ψηφιοποιήσει συχνότητες άνω των 62,5 Hz. Μια αναδιπλωμένη συχνότητα f_s , θα εμφανιστεί στη θέση $|2F_N - f_s|$.

Για να αποφευχθούν φαινόμενα αναδίπλωσης συχνοτήτων πρέπει να είναι γνωστό το φυσικό φασματικό εύρος του συνεχούς σήματος πριν γίνει η δειγματοληψία και η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια από την υψηλότερη συχνότητα του σήματος. Αν το σήμα περιέχει συχνότητες υψηλότερες από την κρίσιμη συχνότητα πρέπει να φιλτραρισθεί με antialiasfilter. Το φίλτρο αποκόπτει συχνότητες που είναι υψηλότερες από την συχνότητα Nyquist.



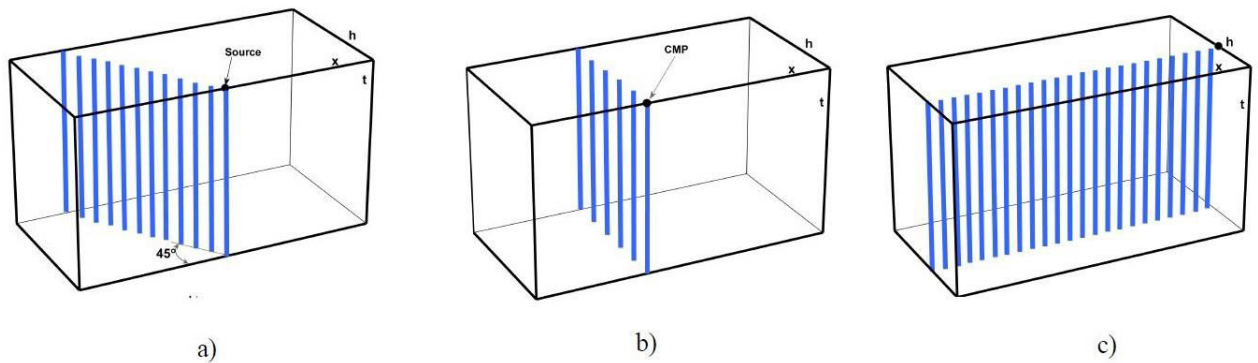
Σχήμα 16: Φάσματα πλάτους για σήμα, που αποτελείται από την υπέρθεση δύο σημάτων με συχνότητες 12,5 και 75 Hz, με διάστημα δειγματοληψίας 2(α), 4(β) και 8(γ) ms. (Yilmaz, 1987)

Κεφάλαιο 2^ο : Επεξεργασία δεδομένων ενδιάμεσου κοινού σημείου

2.1 Εισαγωγή

Η διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου είναι η πιο διαδεδομένη στην επεξεργασία σεισμικών δεδομένων. Οι τρεις βασικές τεχνικές επεξεργασίας των σεισμικών δεδομένων είναι η αποσυνέλιξη, η υπέρθεση και η χωροθέτηση. Η αποσυνέλιξη βελτιώνει την χρονική διακριτική ικανότητα των δεδομένων μειώνοντας την διάρκεια της κυματομορφής της πηγής και εξασθενεί τις θαλάσσιες αντηχήσεις. Η υπέρθεση των ιχνών ενδιάμεσου κοινού σημείου αυξάνει τον λόγο σήματος προς θόρυβο στις καταγραφές. Πριν την υπέρθεση εφαρμόζεται η δυναμική διόρθωση, η οποία μετατρέπει τον διπλό χρόνο διαδρομής των κύριων ανακλάσεων σε διπλό κατακόρυφο χρόνο διαδρομής υποθέτοντας οριζόντιους ανακλαστήρες. Η χωροθέτηση μετακινεί τους κεκλιμένους ανακλαστήρες στην πραγματική τους θέση και μαζεύει την ενέργεια των περιθλάσεων με σκοπό την δημιουργία σεισμικής τομής, η οποία μοιάζει στην γεωλογική τομή του υπεδάφους.

Τα ίχνη από δισδιάστατη σεισμική έρευνα μπορούν να παρουσιαστούν στον τρισδιάστατο όγκο των δεδομένων ή *prestack volume*, $P(x, h, t)$, όπου x είναι η θέση του κοινού ενδιάμεσου σημείου, h είναι η μισή απόσταση πηγής-δέκτη και t ο TWT. Στο σχήμα 17, παρουσιάζεται διάγραμμα ιχνών κοινής πηγής, διάγραμμα ιχνών κοινού ενδιάμεσου σημείου και διάγραμμα ιχνών σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη στον τρισδιάστατο όγκο των δεδομένων. Τα επίπεδα ιχνών κοινής πηγής δημιουργούν γωνία 45° με το επίπεδο $h=0$. Στο επίπεδο $h=0$ θεωρείται ότι η απόσταση πηγής-δέκτη κάθε καταγραφής είναι μηδενική και οι σεισμικές ακτίνες προσπίπτουν κάθετα στις διαχωριστικές επιφάνειες.



Σχήμα 17: Διάγραμμα ιχνών κοινής πηγής (a), διάγραμμα ιχνών κοινού ενδιάμεσου σημείου (b) και διάγραμμα ιχνών σταθερής απόστασης πηγής-δέκτη (c) στον τρισδιάστατο όγκο των δεδομένων. (John C. Bancroft, 2007)

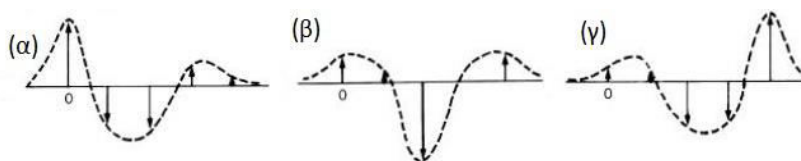
Η αποσυνέλιξη και η δυναμική διόρθωση δρουν στον άξονα του χρόνου t . Η υπέρθεση δρα στον h άξονα, μειώνει τον όγκο των δεδομένων και τα περιορίζει στο επίπεδο $h=0$. Σκοπός του συνδυασμού της δυναμικής διόρθωσης με την υπέρθεση είναι η συγκέντρωση της ενέργειας των ανακλώμενων ακτίνων στο επίπεδο $h=0$, όπου ακολουθεί η χωροθέτηση, η οποία δρα στον x άξονα. Η δυναμική διόρθωση και η υπέρθεση πριν την χωροθέτηση συγκεντρώνουν την ενέργεια των ανακλώμενων κυμάτων από οριζόντιες διαχωριστικές επιφάνειες στο επίπεδο $h=0$. Η συγκέντρωση της ενέργειας των ανακλώμενων κυμάτων από κεκλιμένες διαχωριστικές επιφάνειες στην σωστή τους θέση στο επίπεδο $h=0$ απαιτεί την

χωροθέτηση. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν οι βασικές τεχνικές επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων και οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν στην μετέπειτα επεξεργασία για την εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων.

2.2 Αποσυνέλιξη

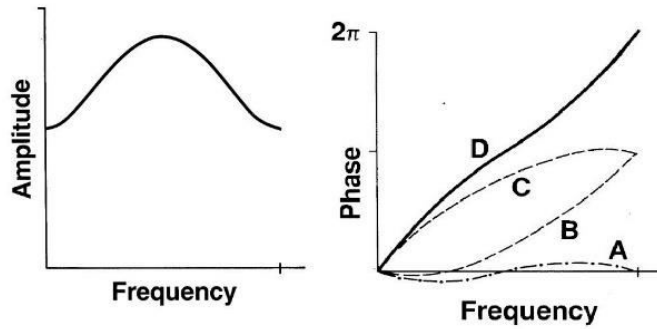
2.2.1 Εισαγωγή

Η αποσυνέλιξη βελτιώνει την χρονική διακριτική ικανότητα των δεδομένων μειώνοντας την διάρκεια της κυματομορφής της πηγής και εξασθενεί σημαντικό μέρος της ενέργειας των πολλαπλών ανακλάσεων. Μπορεί να εφαρμοστεί σε ίχνη πριν την υπέρθεση ή και σε ίχνη της τομής υπέρθεσης. Η αποσυνέλιξη αποτελεί την λύση του αντίστροφου προβλήματος, δηλαδή την εξαγωγή της χρονοσειράς των συντελεστών ανάκλασης από την καταγραφή. Για να περιγραφεί πρέπει πρώτα να οριστεί το ευθύ πρόβλημα, δηλαδή η μοντελοποίηση του σειсмоγράμματος (ή του ίχνους ή της σεισμικής καταγραφής). Η σεισμική καταγραφή μοντελοποιείται με το συνελικτικό μοντέλο, δηλαδή με την συνέλιξη της κρουστικής απόκρισης του υπεδάφους με την κυματομορφή της πηγής και την πρόσθεση χρονοσειράς τυχαίου θορύβου.



Σχήμα 18: (α) κυματομορφή ελάχιστης φάσης, (β) ενδιάμεσης φάσης, (γ) μέγιστης φάσης (https://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Phase_characteristics)

Ο παλμός (ή το ελαστικό κύμα ή η σεισμική διαταραχή) που παράγεται από μία σεισμική πηγή και διαδίδεται στο υπέδαφος καλείται υπογραφή της πηγής. Όλες οι υπογραφές χαρακτηρίζονται ως κυματομορφές περιορισμένου συχνοτικού εύρους και διάρκειας και ισχύει ότι όσο μικρότερη είναι η διάρκεια του παλμού, τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος των συχνοτήτων του. Στο σχήμα 18, παρουσιάζονται τρεις παλμοί που είναι μη περιοδικοί και πεπερασμένης διάρκειας. Έχουν το ίδιο φάσμα πλάτους και διαφορετικό φάσμα φάσης (σχήμα 20). Για αυτό το λόγο οι κυματομορφές τους διαφέρουν. Η πρώτη κυματομορφή εμφανίζει την μέγιστη τιμή της ενέργειας στην αρχή της με την μικρότερη καθυστέρηση και χαρακτηρίζεται ως ελάχιστης φάσης. Η δεύτερη κυματομορφή εμφανίζει την μέγιστη τιμή της ενέργειας στο μέσο της και χαρακτηρίζεται ως ενδιάμεσης φάσης και η τρίτη κυματομορφή, η οποία χαρακτηρίζεται ως μέγιστης φάσης, εμφανίζει την μέγιστη τιμή της ενέργειας στο τέλος της με την μεγαλύτερη καθυστέρηση. Καθώς το κύμα διαδίδεται στο υπέδαφος το πλάτος της κυματομορφής μειώνεται εξαιτίας της γεωμετρικής διασποράς και το φασματικό της περιεχόμενο μειώνεται εξαιτίας της απόσβεσης με αποτέλεσμα να εξασθενεί και να αυξάνεται η διάρκεια της.



Σχήμα 19: Φάσμα πλάτους των κυματομορφών (αριστερά) και οι γωνίες φάσης του φάσματος (δεξιά). (A) γωνίες φάσης του φάσματος της κυματομορφής ελάχιστης φάσης, (B)+(C) ενδιάμεσης φάσης και (D) μέγιστης φάσης. (Yilmaz, 1987)

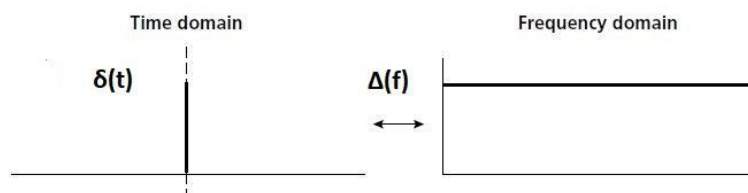
Η κρουστική απόκριση του υπεδάφους αποδίδει την χρονοσειρά των συντελεστών ανάκλασης και αποτελεί την καταγραφή αν ο σεισμικός παλμός ήταν μοναδιαίος. Ο μοναδιαίος παλμός ή συνάρτηση δέλτα ή κρουστική συνάρτηση (impulsefunction) ή συνάρτηση του Dirac ή κρουστικό σήμα μοιάζει με παλμό απειροστής διάρκειας και άπειρου πλάτους και ορίζεται με τις εξής ιδιότητες

$$\delta(t) = 0 \text{ για } t \neq 0 \quad (20)$$

$$\delta(t) = \infty \text{ για } t = 0 \quad (21)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (22)$$

Το μοναδιαίο κρουστικό σήμα είναι για όλες τις τιμές του μηδενικό, εκτός από την τιμή $t=0$ όπου απειρίζεται διατηρώντας το εμβαδόν του ίσο με την μονάδα και περιέχει όλες τις συχνότητες. Το κρουστικό σήμα $\delta(t)$ συμβολίζεται με ένα βέλος στο σημείο τομής των αξόνων (σχήμα 21).



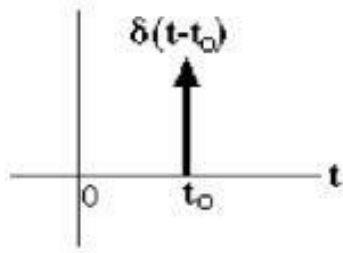
Σχήμα 21: Μοναδιαίο κρουστικό σήμα (αριστερά) και τα πλάτη του φάσματος του (δεξιά).

Το κρουστικό σήμα μπορεί να συμβεί σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή $t=t_0$ και το μετατοπισμένο κρουστικό σήμα $\delta(t-t_0)$, σχήμα 22, ορίζεται ως:

$$\delta(t-t_0) = 0 \text{ για } t \neq t_0 \quad (22)$$

$$\delta(t-t_0) = +\infty \text{ για } t = t_0 \quad (23)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t-t_0) dt = 1 \quad (24)$$



Σχήμα 22: Μετατοπισμένο κρουστικό σήμα

Από τον ορισμό της προκύπτει ότι αν η κρουστική συνάρτηση πολλαπλασιαστεί με μια συνάρτηση $g(t)$, προκύπτει:

$$\delta(t-t_0)g(t) = \delta(t-t_0)g(t_0) \quad (25)$$

και

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t-t_0)g(t)dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t-t_0)g(t_0)dt = g(t_0) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t-t_0)dt = g(t_0) \quad (26)$$

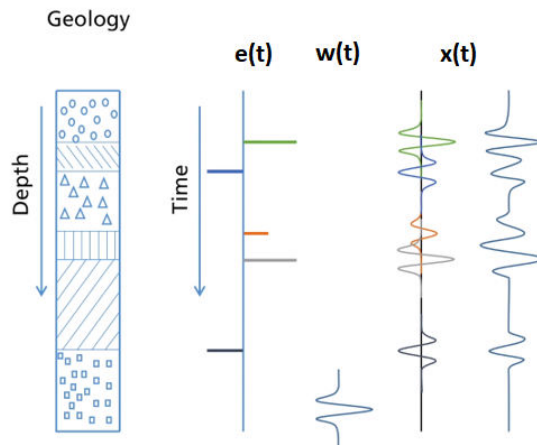
Δηλαδή, η εφαρμογή της συνάρτησης δέλτα και η ολοκλήρωση της προσδιορίζει την συνάρτησης $g(t)$ στον χρόνο t_0 . Η υπέρθεση των μονομερών κρουστικών αποκρίσεων των συντελεστών ανάκλασης τους υπεδάφους, $RC(t)$, αποδίδει την κρουστική απόκριση του υπεδάφους, $e(t)$.

$$e(t) = \sum_i RC(t_i)\delta(t-t_i) \quad (27)$$

Στις καταγραφές η κρουστική απόκριση του υπεδάφους εκτός από την χρονοσειρά των συντελεστών ανάκλασης των κύριων ανακλάσεων περιέχει και την χρονοσειρά των συντελεστών ανάκλασης των πολλαπλών ανακλάσεων.

Η αποσυνέλιξη είναι η διαδικασία που εξουδετερώνει την δράση της συνέλιξης. Ιδανικά η αποσυνέλιξη θα πρέπει να μετατρέπει την κυματομορφή της πηγής σε μοναδιαίο παλμό (αντίστροφο φίλτρο και αποσυνέλιξη αιχμής) και να αποσβένει την ενέργεια των πολλαπλών (αποσυνέλιξη πρόβλεψης) ανακλάσεων αφήνοντας μόνο την χρονοσειρά των συντελεστών ανάκλασης στην καταγραφή. Η διαδικασία της αποσυνέλιξης περιλαμβάνει δύο στάδια. Τον σχεδιασμό και την εφαρμογή του φίλτρου αποσυνέλιξης. Η εφαρμογή του φίλτρου περιλαμβάνει την συνέλιξη του φίλτρου με το σεισμόγραμμα. Όταν η κυματομορφή της πηγής θεωρείται γνωστή η αποσυνέλιξη πραγματοποιείται ντετερμινιστικά με το αντίστροφο φίλτρο. Το αντίστροφο φίλτρο όταν εφαρμόζεται στην κυματομορφή της πηγής θα πρέπει να την μετατρέπει σε μοναδιαίο παλμό και όταν εφαρμόζεται στο σεισμόγραμμα θα πρέπει να αποδίδει την κρουστική απόκριση του υπεδάφους. Όταν η κυματομορφή της πηγής δεν είναι γνωστή η αποσυνέλιξη αιχμής μπορεί να πραγματοποιηθεί στατιστικά με τα φίλτρα Wiener. Τα φίλτρα Wiener μετατρέπουν την κυματομορφή της πηγής σε οποιοδήποτε επιθυμητή κυματομορφή και χρησιμοποιούνται στην αποσυνέλιξη πρόβλεψης, όπου προβλέπεται η χρονοσειρά των πολλαπλών ανακλάσεων της καταγραφής και αφαιρείται από την καταγραφή.

2.2.2 Συνελικτικό μοντέλο



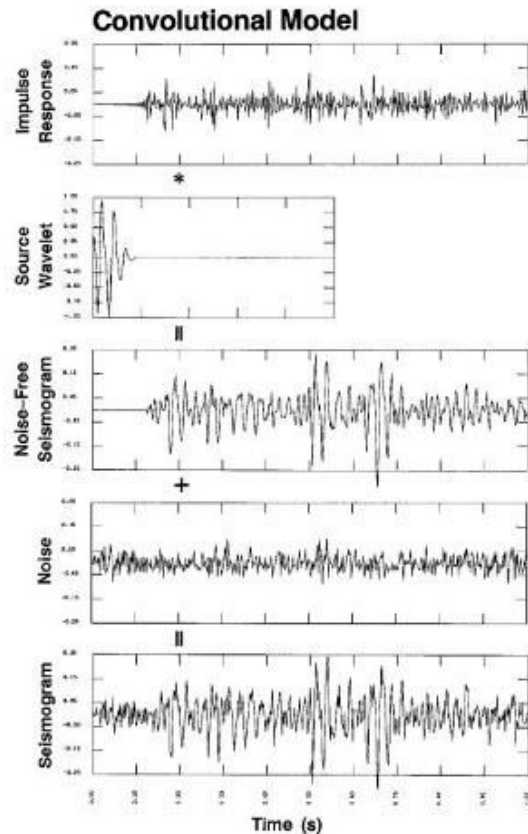
Σχήμα 23: $e(t)$ κρουστική απόκριση υπεδάφους (μόνο χρονοσειρά των κύριων ανακλάσεων), $w(t)$ κυματομορφή της πηγής, $x(t)$ συνθετικό σεισμόγραμμα

Το σεισμόγραμμα (σχήμα 23) είναι το αποτέλεσμα της συνέλιξης της κυματομορφής της πηγής, $w(t)$, με την κρουστική απόκριση του υπεδάφους, $e(t)$. Για να είναι πιο ρεαλιστικό προστίθεται και η χρονοσειρά τυχαίου θορύβου, $n(t)$, και προκύπτει το συνελικτικό μοντέλο (σχήμα 24):

$$x(t) = w(t) * e(t) + n(t) \quad (28)$$

,όπου το $x(t)$ είναι το καταγεγραμμένο σεισμόγραμμα, $w(t)$ είναι η κυματομορφή της πηγής, $e(t)$ είναι κρουστική απόκριση του υπεδάφους και $n(t)$ ο τυχαίος θόρυβος. Η μοντελοποίηση της καταγραφής βασίζεται στις εξής υποθέσεις:

- I. Το υπέδαφος αποτελείται από οριζόντια στρώματα σταθερής ταχύτητας
- II. Η πηγή παράγει P κύματα, τα οποία προσπίπτουν κάθετα στις διαχωριστικές επιφάνειες. Επομένως, δεν παράγονται S κύματα
- III. Η κυματομορφή της πηγής παραμένει σταθερή κατά την διάδοση του κύματος



Σχήμα 24: Συνελκτικό μοντέλο. (Yilmaz, 1987)

2.2.3 Αποσυνέλιξη αιχμής με αντίστροφο φίλτρο

Σκοπός της αποσυνέλιξης με το αντίστροφο φίλτρο είναι η εξαγωγή της κρουστικής απόκρισης του υπεδάφους, $e(t)$, από το καταγεγραμμένο σεισμόγραμμα, $x(t)$, δηλαδή η λύση της εξίσωσης 28 για τον άγνωστο $e(t)$. Όμως η εξίσωση έχει τρεις αγνώστους, ($w(t)$, $e(t)$, $n(t)$), και έναν γνωστό, $x(t)$. Οπότε για την λύση του αντίστροφου προβλήματος θεωρείται, ότι:

- IV. Ο τυχαίος θόρυβος είναι μηδενικός
- V. Η κυματομορφή της πηγής είναι γνωστή

Κάτω από αυτές τις προϋποθέσεις υπάρχει μία εξίσωση και ένας άγνωστος. Η πέμπτη υπόθεση αποτελεί την βάση της ντετερμινιστικής αποσυνέλιξης με το αντίστροφο φίλτρο, η οποία επιτυγχάνεται με την συνέλιξη του αντίστροφου φίλτρου, $f(t)$, με το σεισμόγραμμα. Το αντίστροφο φίλτρο, $f(t)$, σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε αν εφαρμοστεί με την πράξη της συνέλιξης στο σεισμόγραμμα θα αποδώσει την κρουστική απόκριση του υπεδάφους.

$$e(t) = f(t) * x(t) \quad (29)$$

Από τις εξισώσεις 28 και 29 προκύπτει

$$x(t) = w(t) * f(t) * x(t) \quad (30)$$

$$\text{ή } 1 = w(t) * f(t) \quad (31)$$

$$\text{ή } \delta(t) = w(t) * f(t) \quad (32)$$

Η εξίσωση 32 σημαίνει ότι το αντίστροφο φίλτρο μετατρέπει την κυματομορφή της πηγής σε μοναδιαίο παλμό. Η λύση της εξίσωσης ως προς $f(t)$ είναι

$$f(t) = \delta(t) * w'(t) \quad (33)$$

,όπου $w'(t)$ είναι το αντίστροφο της κυματομορφής της πηγής, η οποία από την πέμπτη υπόθεση θεωρείται γνωστή. Δηλαδή το αντίστροφο φίλτρο για την αποσυνέλιξη αιχμής ισούται με το αντίστροφο της κυματομορφής της πηγής. Ο υπολογισμός του $w'(t)$ επιτυγχάνεται με τον μετασχηματισμό z , $W(z)$, της κυματομορφής της πηγής (εξίσωση 34). Από την πολυωνυμική διαίρεση του με την μονάδα (εξίσωση 35) προκύπτει πολυώνυμο με συντελεστές, f_i , οι οποίοι είναι οι συντελεστές του φίλτρου και είναι άπειροι.

$$W(z) = \sum_{n=0}^{\infty} w_{n+1} z^n, \text{ όπου } z = e^{i\omega} \quad (34)$$

$$W'(z) = \frac{1}{W(z)} = f_0 + f_1 z + f_2 z^2 + \dots + f_n z^n + \dots \quad (35)$$

Η εξίσωση 31, ισοδυναμεί με πολλαπλασιασμό στο χώρο των συχνοτήτων

$$W(\omega)F(\omega) = 1 \quad (36)$$

ή

$$F(\omega) = \frac{1}{W(\omega)} \quad (37)$$

Από την εξίσωση 14 και 37 συνεπάγεται

$$A_f(\omega)e^{i\varphi_f(\omega)} = \frac{1}{A_w(\omega)e^{i\varphi_w(\omega)}} \quad (38)$$

Από την εξίσωση 38 προκύπτει ότι

$$A_f(\omega) = \frac{1}{A_w(\omega)} \text{ και } \varphi_f(\omega) = -\varphi_w(\omega) \quad (39)$$

Η εξίσωση 39 σημαίνει ότι το φάσμα πλάτους του αντίστροφου φίλτρου είναι αντίστροφο του φάσματος πλάτους της κυματομορφής της πηγής και ότι τα φάσματα φάσης τους είναι αντίθετα.

Η αποσυνέλιξη αιχμής με αντίστροφο φίλτρο μπορεί να βελτιστοποιηθεί με την έννοια των ελαχίστων τετραγώνων. Η διαδικασία προσδιορίζει τους συντελεστές του φίλτρου ώστε το

άθροισμα των τετραγωνικών διαφορών μεταξύ του επιθυμητού αποτελέσματος , δηλαδή του μοναδιαίου παλμού, και της συνέλιξης του φίλτρου με την κυματομορφή της πηγής(πραγματικό αποτέλεσμα) να ελαχιστοποιηθεί.

ÖYilmaz το 1987 στο Seismic data processing έδειξε ότι η μετατροπή της κυματομορφής της πηγής σε μοναδιαίο παλμό με το αντίστροφο φίλτρο επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερα όταν η κυματομορφή είναι ελάχιστης φάσης και οι συντελεστές του αντίστροφου φίλτρου είναι οι μέγιστοι δυνατοί. Επιπλέον έδειξε ότι η κυματομορφή ελάχιστης φάσης θα έχει ελάχιστης φάσης αντίστροφο φίλτρο με συντελεστές που συγκλίνουν στο μηδέν με αποτέλεσμα η κυματομορφή της πηγής να μετατρέπεται αποτελεσματικότερα σε μοναδιαίο παλμό. Για αυτό το λόγο δημιουργήθηκε η έκτη υπόθεση για την αποσυνέλιξη αιχμής.

- VI. Η κυματομορφή της πηγής θεωρείται ελάχιστης φάσης. Επομένως έχει ελάχιστης φάσης αντίστροφο φίλτρο

2.2.4 Στατιστική αποσυνέλιξη

Η κυματομορφή της πηγής σχεδόν ποτέ δεν είναι γνωστή , για αυτό το λόγο εξετάζεται στο χώρο των συχνοτήτων με σκοπό να οριστεί η υπόθεση για την εφαρμογή της στατιστικής αποσυνέλιξης. Η συνέλιξη στο πεδίο του χρόνου ισοδυναμεί με πολλαπλασιασμό στο χώρο των συχνοτήτων.

$$X(\omega) = W(\omega)E(\omega) \quad (40)$$

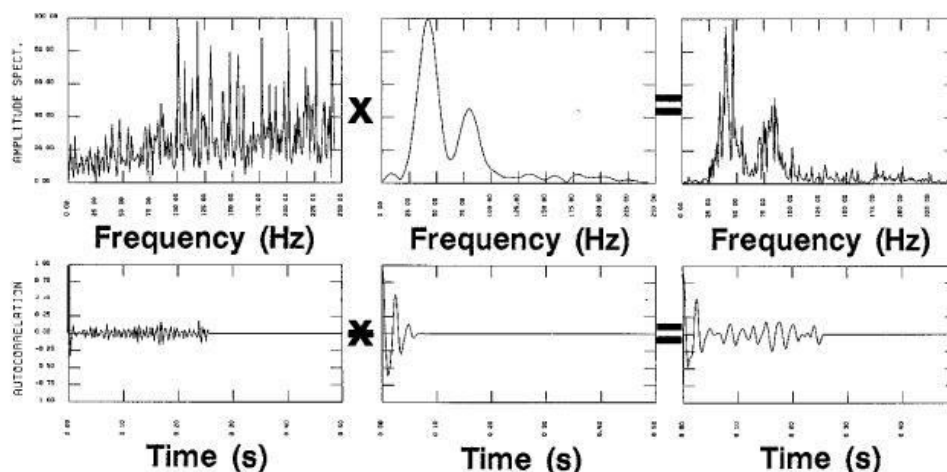
Στο χώρο των συχνοτήτων το φάσμα πλάτους της κυματομορφής της πηγής $A_w(f)$, πολλαπλασιάζεται με το φάσμα πλάτους της κρουστικής απόκρισης του υπεδάφους $A_e(f)$ και τα φάσματα φάσης τους προστίθενται.

$$A_x(f) = A_w(f)A_e(f) \quad (41)$$

και

$$\varphi_x(f) = \varphi_w(f) + \varphi_e(f) \quad (42)$$

Από το σχήμα 25, παρατηρείται ότι το $A_x(f)$, αποτελούν ομαλοποιημένη μορφή των $A_w(f)$ και ότι οι διακυμάνσεις του οφείλονται στα $A_e(f)$. Αυτό συνεπάγεται ότι η χρονοσειρά της κρουστικής απόκρισης $e(t)$, πρέπει είναι χρονοσειρά λευκού θορύβου, δηλαδή τυχαία διαδικασία. Όμως αυτό δεν ισχύει επειδή η $e(t)$ δεν έχει επίπεδο φάσμα συχνοτήτων $A_e(f)$, αλλά παρουσιάζει μια ανοδική τάση. Επομένως η $e(t)$ δεν είναι τυχαία διαδικασία.



Σχήμα 25:Φάσματα πλάτους της κρουστικής απόκρισης του υπεδάφους, της κυματομορφής της πηγής και του συνθετικού σειсмоγράφματος (πάνω). Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της κρουστικής απόκρισης του υπεδάφους, της κυματομορφής της πηγής, και του συνθετικού σειсмоγράφματος (κάτω). (Yilmaz, 1987)

Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει από την μελέτη των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης των όρων του συνθετικού σειсмоγράφματος. Η αυτοσυσχέτιση, $r_e(\tau)$, είναι το μέτρο ομοιότητας των τιμών μιας χρονοσειράς και είναι συνάρτηση της μεταβλητής, τ , που ονομάζεται χρονική καθυστέρηση (lag). Δείχνει την γραμμική σχέση των μεταβλητών μιας χρονοσειράς. Η αυτοσυσχέτιση της χρονοσειράς, $e(t)$, N δειγμάτων δίνεται από την σχέση:

$$r_e(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} e_t e_{t+\tau} \text{ για } \tau = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(N-1) \quad (43)$$

Μια χρονοσειρά για να είναι χρονοσειρά λευκού θορύβου, δηλαδή τυχαία διαδικασία πρέπει η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης να είναι μηδέν για όλες τις τιμές της χρονικής καθυστέρησης εκτός της μηδενικής. Στο σχήμα 25, φαίνονται οι τιμές της συνάρτησης της αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της κρουστικής απόκρισης του υπεδάφους, r_e , της κυματομορφής της πηγής, r_w , και του σειсмоγράφματος, r_x . Η r_x προκύπτει από την συνέλιξη της r_w με την r_e .

$$r_x = r_w * r_e \quad (44)$$

Παρατηρείται ότι η r_x είναι παρόμοια με την r_w για τιμές της καθυστέρησης όπου η r_w δεν είναι μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι η $e(t)$ πρέπει να είναι τυχαία διαδικασία. Όμως από το διάγραμμα της r_e παρατηρείται ότι δεν ισχύει, επειδή η επόμενη της μηδενικής καθυστέρησης τιμή καθυστέρησης έχει μη μηδενική τιμή, που είναι αρκετά μεγάλη για να είναι εκτός των ορίων εμπιστοσύνης. Οι παραπάνω παρατηρήσεις από το φάσμα πλάτους και την αυτοσυσχέτιση συμπεραίνεται ότι η ανακλαστικότητα, δηλαδή η κρουστική απόκριση του υπεδάφους, δεν είναι εντελώς τυχαία διαδικασία. Άμα ήταν τυχαία διαδικασία θα ίσχυε ότι:

$$r_e(\tau) = 0, \text{ για } \tau \neq 0 \quad (45)$$

και

$$r_e(0) = r_0 = \text{σταθερό, για } \tau = 0 \quad (46)$$

Αυτό σημαίνει ότι:

$$r_x = r_0 r_w \quad (47)$$

Η εξίσωση 47 επιτρέπει τη χρήση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης του σειсмоγράφου, η οποία είναι γνωστή, αντί της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης της κυματομορφής της πηγής, η οποία κανονικά είναι άγνωστη. Υπό αυτή την προϋπόθεση η πέμπτη υπόθεση είναι περιττή. Για αυτό το λόγο δημιουργήθηκε η έβδομη υπόθεση για την λύση του αντίστροφου προβλήματος:.

- VII. Η χρονοσειρά των συντελεστών ανάκλασης είναι τυχαία διαδικασία. Αυτό συνεπάγεται ότι το σεισμόγραμμα έχει τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής της πηγής. Δηλαδή, οι συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης και τα φάσματα πλάτους τους είναι παρόμοιες.

Η υπόθεση αποτελεί την βάση της στατιστικής αποσυνέλιξης, η οποία επιτυγχάνεται με τα φίλτρα Wiener.

2.2.5 Φίλτρα Wiener

Τα φίλτρα αποτελούν συστήματα που δέχονται ένα σήμα εισόδου και το μετατρέπουν σε σήμα εξόδου. Ένα σύστημα διακριτού χρόνου δέχεται ένα σήμα εισόδου διακριτού χρόνου, $x(t)$, και παράγει ένα σήμα εξόδου διακριτού χρόνου, $y(t)$. Η διαδικασία του φιλτραρίσματος περιγράφεται από την συνέλιξη του φίλτρου, $f(t)$, με το διακριτό σήμα εισόδου, $x(t)$.

$$y_t = f_t * x_t = \sum_{\tau} f_{\tau} x_{t-\tau} \quad (48)$$

Τα φίλτρα Wiener είναι βέλτιστα επειδή σχεδιάζονται ώστε το άθροισμα των τετραγωνικών διαφορών, L , μεταξύ του επιθυμητού σήματος εξόδου, d_t , και του πραγματικού σήματος εξόδου, y_t , να ελαχιστοποιηθεί. Το άθροισμα των τετραγωνικών διαφορών είναι.

$$L = \sum_t (d_t - \sum_{\tau} f_{\tau} x_{t-\tau})^2 \quad (49)$$

Στόχος είναι ο προσδιορισμός των συντελεστών του φίλτρου (f_0, f_1, \dots, f_{n-1}), ώστε το L να ελαχιστοποιηθεί. Το L ελαχιστοποιείται όταν η πρώτη παράγωγος ως προς την μεταβλητή f_i μηδενίζεται.

$$\frac{\partial L}{\partial f_i} = -2 \sum_t d_t x_{t-i} + 2 \sum_t \left(\sum_{\tau} f_{\tau} x_{t-\tau} \right) x_{t-i} = 0 \text{ για } i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (50)$$

ή

$$\sum_{\tau} f_{\tau} \sum_t x_{t-\tau} x_{t-i} = \sum_t d_t x_{t-i} \quad (51)$$

Ισχύει ότι

$$\sum_t x_{t-\tau} x_{t-i} = r_{i-\tau} \quad (52)$$

και

$$\sum_t d_t x_{t-i} = g_i \quad (53)$$

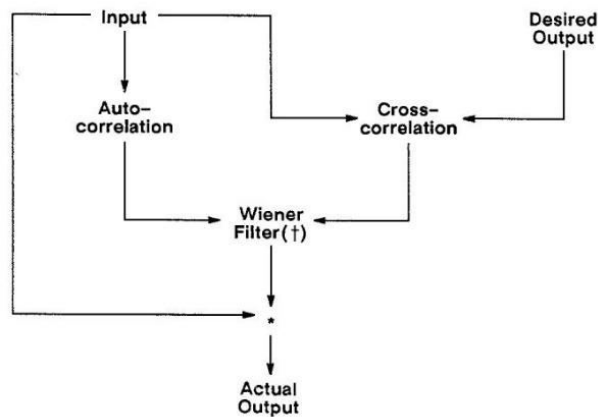
Από τις εξισώσεις 51 έως 53 προκύπτει

$$\sum_{\tau} f_{\tau} r_{i-\tau} = g_i \text{ για } i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (54)$$

Το σύστημα στην 54 εκφράζεται με την χρήση του πίνακα της αυτοσυσχέτισης

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \cdots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \cdots & r_{n-2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ r_{n-1} & r_{n-2} & r_{n-3} & \cdots & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ f_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ g_{n-1} \end{bmatrix}$$

,όπου κάθε στοιχείο του πίνακα $n \times n$ αποτελείται από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος εισόδου r_i , και κάθε στοιχείο του διανύσματος στο δεξί σκέλος της παραπάνω εξίσωσης είναι η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης του σήματος εισόδου με το επιθυμητό σήμα εξόδου, g_i . Η εύρεση των συντελεστών του φίλτρου Wiener αποτελεί την λύση των παραπάνω κανονικών εξισώσεων προς f_i . Στο σχήμα 26, παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής για την εύρεση των συντελεστών και την εφαρμογή του φίλτρου Wiener. Η διαδικασία περιλαμβάνει την δημιουργία του πίνακα αυτοσυσχέτισης, και του διανύσματος ετεροσυσχέτισης, την λύση των κανονικών εξισώσεων για την εύρεση των συντελεστών του φίλτρου και την συνέλιξη του σήματος εισόδου με τους συντελεστές του φίλτρου.



Σχήμα 26: Διάγραμμα ροής για την εύρεση των συντελεστών και την εφαρμογή των φίλτρων Wiener (Yilmaz, 1987)

Τα φίλτρα Wiener μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποσυνέλιξη αιχμής ,επειδή μετατρέπουν την κυματομορφή της πηγής σε οποιοδήποτε επιθυμητό σχήμα, και στην αποσυνέλιξη πρόβλεψης, επειδή μπορούν να προβλέψουν το περιοδικό περιεχόμενο της καταγραφής.

2.2.6 Αποσυνέλιξη αιχμής

Σκοπός της αποσυνέλιξης αιχμής με τα φίλτρα Wiener είναι η μετατροπή της κυματομορφής της πηγής σε μετατοπισμένο κρουστικό σήμα. Η βέλτιστη μετατόπιση του κρουστικού σήματος εξαρτάται από το είδος της κυματομορφής της πηγής. Για κυματομορφή ελάχιστης φάσης το βέλτιστο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται με την μετατροπή της σε μηδενικής χρονικής καθυστέρησης κρουστικό σήμα. Σε αυτή την περίπτωση οι κανονικές εξισώσεις είναι

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \cdots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \cdots & r_{n-2} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \cdots & r_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{n-1} & r_{n-2} & r_{n-3} & \cdots & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}.$$

,όπου οι συντελεστές του φίλτρου είναι οι διακριτές τιμές $(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n-1})$. Το βέλτιστο αντίστροφο φίλτρο θα είχε τον ίδιο πίνακα κανονικών εξισώσεων για την εύρεση των συντελεστών του φίλτρου. Για αυτό το λόγο η αποσυνέλιξη αιχμής με τα φίλτρα Wiener είναι ταυτόσημη με το βέλτιστο αντίστροφο φίλτρο. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι ο πίνακας αυτοσυσχέτισης του σήματος εισόδου μπορεί να υπολογιστεί στατιστικά, δηλαδή η κυματομορφή της πηγής μπορεί να αντικατασταθεί από το σεισμόγραμμα σύμφωνα με την έβδομη υπόθεση. Επομένως, για κυματομορφή ελάχιστης φάσης ισχύει ότι το φίλτρο θα είναι το αντίστροφο της κυματομορφής της πηγής και ελάχιστης φάσης.

Ο Yilmaz το 1987 στο Seismic data processing έδειξε ότι αν η κυματομορφή της πηγής δεν είναι ελάχιστης φάσης η αποσυνέλιξη αιχμής δεν την μετατρέπει σε μηδενικής χρονικής καθυστέρησης κρουστικό σήμα και ότι το φίλτρο είναι το αντίστροφο της αντίστοιχης ελάχιστης φάσης κυματομορφής της πηγής. Για κυματομορφή μέγιστης φάσης το βέλτιστο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται με κρουστικό σήμα ίσης μετατόπισης με την διάρκεια της κυματομορφής. Διαφορετικά, για άγνωστης φάσης κυματομορφή μπορούν να δοκιμαστούν κρουστικά σήματα διαφορετικής χρονικής καθυστέρησης και ως επιθυμητό σήμα εξόδου, αφού προσδιοριστεί το άθροισμα των τετραγωνικών διαφορών του πραγματικού με του επιθυμητού σήματος εξόδου, να επιλεγθεί το μετατοπισμένο κρουστικό σήμα με το μικρότερο σφάλμα.

Επειδή το φίλτρο είναι το αντίστροφο της αντίστοιχης ελάχιστης φάσης κυματομορφής της πηγής, το φάσμα πλάτους του φίλτρου θα είναι αντίστροφου φάσματος πλάτους της

αντίστοιχης ελάχιστης φάσης κυματομορφής της πηγής, όπως και στο αντίστροφο φίλτρο (εξίσωση 39).

$$A_f(\omega) = \frac{1}{A_w(\omega)}$$

Άμα το $A_w(\omega)$ έχει μηδενικές τιμές το $A_f(\omega)$ θα είναι άπειρα στις αντίστοιχες συχνότητες. Άρα η αποσυνέλιξη αιχμής θα ενισχύσει το σεισμόγραμμα σε αυτές τις συχνότητες με αποτέλεσμα το φάσμα πλάτους του σήματος εξόδου να μην είναι επίπεδο όπως του μοναδιαίου παλμού. Επομένως η κυματομορφή της πηγής δεν θα μετατρέπεται σε μοναδιαίο παλμό. Για να αποφευχθεί η διαίρεση με το μηδέν στην παραπάνω εξίσωση προστίθεται μία μικρή ποσότητα ε , $0 < \varepsilon < 1$ στα $A_w(\omega)$.

$$A_f(\omega) = \frac{1}{A_w(\omega) + \varepsilon} \quad (55)$$

Η διαδικασία λέγεται προλεύκανση και επιτυγχάνεται με την πρόσθεση φάσματος λευκού θορύβου στο $A_w(\omega)$, όπως περιγράφηκε. Διαφορετικά προστίθεται η σταθερή τιμή εr_0 στην κύρια διαγώνιο του πίνακα αυτοσυσχέτισης στις τιμές μηδενικής χρονικής καθυστέρησης, r_0 .

2.2.7 Αποσυνέλιξη πρόβλεψης

Ο σκοπός της αποσυνέλιξης πρόβλεψης είναι η πρόβλεψη του περιοδικού περιεχομένου του σήματος εισόδου $x(t)$, σε μελλοντικό χρόνο $x(t+\alpha)$, όπου το α είναι ο χρόνος πρόβλεψης. Η πρόβλεψη πραγματοποιείται με την συνέλιξη του σήματος εισόδου, $x(t)$, με τους συντελεστές του φίλτρου, $f(t)$.

$$\sum x(t)f(\tau - t) = y(\tau) = x'(t + \alpha) \quad (56)$$

,όπου το σήμα εξόδου $y(\tau)$, είναι η χρονοσειρά πρόβλεψης, $x'(t+\alpha)$. Η χρονοσειρά των διαφορών μεταξύ των πραγματικών τιμών του σήματος εισόδου $x(t+\alpha)$, και των εκτιμώμενων $x'(t+\alpha)$, δηλαδή η χρονοσειρά των σφαλμάτων της πρόβλεψης, δίνεται από την εξίσωση 57 και αντιστοιχεί στο απρόβλεπτο περιεχόμενο του σήματος εισόδου.

$$\varepsilon(t + \alpha) = x(t + \alpha) - x'(t + \alpha) \quad (57)$$

Το επιθυμητό σήμα εξόδου είναι, $d(t)=x(t+\alpha)$. Αποδεικνύεται ότι η τιμή της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης του σήματος εισόδου με το σήμα εξόδου g_τ , είναι ίση με την τιμή της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης του σήματος εισόδου $r_{\tau+\alpha}$. Άρα στο σύστημα των κανονικών εξισώσεων ο μόνος άγνωστος είναι το φίλτρο f_i . Η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης του σήματος εισόδου με το επιθυμητό σήμα εξόδου δίνεται από την σχέση.

$$g_\tau = \sum_t d_t x_{t-\tau} = \sum_t x_{t+\alpha} x_{t-\tau} = \sum_t x_t x_{t-(\alpha+\tau)} \quad (58)$$

Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος εισόδου δίνεται από την εξίσωση.

$$r_\tau = \sum_t x_t x_{t-\tau} \quad (59)$$

Για χρονική καθυστέρηση $\alpha + \tau$ η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος εισόδου δίνεται από την εξίσωση

$$r_{\alpha+\tau} = \sum_t x_t x_{t-(\alpha+\tau)} \quad (60)$$

Από τις εξισώσεις 58 και 60 προκύπτει:

$$g_\tau = r_{\alpha+\tau} \quad (61)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 60 και 58 στο σύστημα των κανονικών εξισώσεων, προκύπτει το παρακάτω σύστημα για την εύρεση των συντελεστών του φίλτρου πρόβλεψης (f_0, f_1, \dots, f_{n-1}).

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \cdots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \cdots & r_{n-2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ r_{n-1} & r_{n-2} & r_{n-3} & \cdots & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ f_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_\alpha \\ r_{\alpha+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_{\alpha+n-1} \end{bmatrix}$$

Αυτή η διαδικασία εφαρμόζεται στα σεισμικά ίχνη για την απομάκρυνση του μη επιθυμητού περιοδικού περιεχομένου τους, όπως οι πολλαπλές ανακλάσεις. Στα θαλάσσια ίχνη οι ισχυρότερες πολλαπλές ανακλάσεις προέρχονται από το στρώμα νερού (πολλαπλές του πυθμένα ή θαλάσσιες αντηχήσεις) και εμφανίζονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα στις καταγραφές. Αυτό είναι το περιοδικό περιεχόμενο της καταγραφής που είναι προβλέψιμο (Perez & Henley, 2000). Ενώ οι κύριες ανακλάσεις θεωρούνται ότι συμβαίνουν τυχαία, οπότε αποτελούν το μη προβλέψιμο περιεχόμενο της καταγραφής. Αφού η χρονοσειρά των πολλαπλών πρέπει να εξαχθεί από την καταγραφή, η χρονοσειρά των σφαλμάτων των προβλέψεων αποδίδει την χρονοσειρά των κύριων ανακλάσεων.

Για να είναι επιτυχημένη η πρόβλεψη της χρονοσειράς των πολλαπλών ανακλάσεων πρέπει να οριστεί η διάρκεια του φίλτρου πρόβλεψης αρκετά μεγάλη ώστε να περιέχει την κυματομορφή της κύριας ανάκλασης. Ο χρόνος της πρόβλεψης πρέπει να ισούται με την χρονική καθυστέρηση μεταξύ της κύριας ανάκλασης και της πρώτης πολλαπλής της.

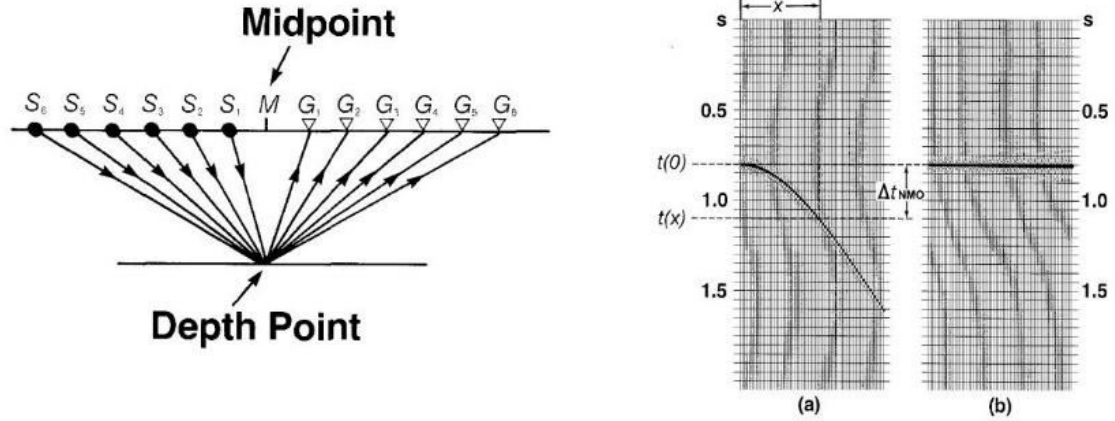
2.3 Δυναμική Διόρθωση-Ανάλυση Ταχυτήτων- Υπέρθεση

2.3.1 Εισαγωγή

Σκοπός την δυναμικής διόρθωσης σε συνδυασμό με την υπέρθεση είναι η συγκέντρωση της ενέργειας των κύριων ανακλάσεων των δεδομένων κοινού ενδιαμέσου σημείου (CMP gathers) στο επίπεδο $h=0$ (Σχήμα 17). Σεισμική υπέρθεση είναι η άθροιση των ιχνών των CMP gathers στην διεύθυνση του άξονα του offset. Πριν την υπέρθεση εφαρμόζεται η δυναμική διόρθωση ή η διόρθωση για την κανονική χρονική απόκλιση των κύριων ανακλάσεων. Η δυναμική διόρθωση ανάγει τους διπλούς χρόνους διαδρομής των ανακλώμενων ακτινών σε διπλούς κατακόρυφους χρόνους ώστε να ευθυγραμμιστούν οι κύριες ανακλάσεις πριν την άθροιση τους. Η διαδικασία εκτός της ανάδειξης των ανακλάσεων αυξάνει και τον λόγο σήματος προς θόρυβο. Αυτό συμβαίνει επειδή ο τυχαίος θόρυβος στις καταγραφές βρίσκεται εκτός φάσης και οι πολλαπλές ανακλάσεις εμφανίζουν διαφορετική κανονική χρονική απόκλιση από τις κύριες για τις ίδιες αποστάσεις ή και ίδιους διπλούς κατακόρυφους χρόνους.

Για σταθερής ταχύτητας οριζόντιο στρώμα η καμπύλη των TWT των ανακλώμενων κυμάτων συναρτήση του h είναι υπερβολή. Οι ανακλώμενες ακτίνες για δεδομένα κοινού ενδιαμέσου σημείου έχουν το ίδιο σημείο ανάκλασης. Η χρονική διαφορά μεταξύ του TWT σε συγκεκριμένο h με τον διπλό κατακόρυφο χρόνο, $t(0)$, ονομάζεται κανονική χρονική απόκλιση (normal moveout, NMO). Η ταχύτητα που απαιτείται για την διόρθωση NMO είναι η V_{NMO} . Για οριζόντιο ανακλαστήρα και ένα στρώμα η V_{NMO} ισούται με την ταχύτητα διάδοσης του κύματος σε αυτό το στρώμα. Για κεκλιμένο ανακλαστήρα η καμπύλη των TWT των ανακλώμενων κυμάτων συναρτήση του h είναι υπερβολή. Όμως οι ανακλώμενες ακτίνες δεν έχουν το ίδιο σημείο ανάκλασης. Το σημείο ανάκλασης κάθε σεισμικής ακτίνας μετατοπίζεται ανοδικά της κλίσης του ανακλαστήρα με την αύξηση του h . Η ταχύτητα για την διόρθωση της κανονικής χρονικής απόκλισης ισούται με τον λόγο της ταχύτητας του μέσου προς το συνημίτονο της γωνίας κλίσης του ανακλαστήρα. Για αυτό το λόγο η δυναμική διόρθωση κεκλιμένου ανακλαστήρα ονομάζεται dip dependency moveout (DDMO) correction. Για σταθερής ταχύτητας οριζόντια στρώματα η καμπύλη των TWT των ανακλώμενων κυμάτων από τις διαχωριστικές επιφάνειες συναρτήση του h προσεγγίζεται από υπερβολή. Σε αυτή την περίπτωση η V_{NMO} ισούται με την μέση τετραγωνική ταχύτητα, V_{RMS} , κάθε διαχωριστικής επιφάνειας. Για σταθερής ταχύτητας κεκλιμένα στρώματα η καμπύλη των TWT των ανακλώμενων κυμάτων από τις διαχωριστικές επιφάνειες συναρτήση του h προσεγγίζεται από υπερβολή εφόσον οι κλίσεις των στρωμάτων είναι μικρές. Σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα που απαιτείται για την δυναμική διόρθωση είναι η ταχύτητα, η οποία προσεγγίζει αποτελεσματικότερα την καμπύλη των TWT των ανακλώμενων κυμάτων συναρτήση του h . Οι τιμές της ταχύτητας για την δυναμική διόρθωση προκύπτουν από την ανάλυση ταχυτήτων των δεδομένων κοινού ενδιαμέσου σημείου.

2.3.2 Δυναμική διόρθωση οριζόντιου ανακλαστήρα



Σχήμα 27: Ανακλώμενες σεισμικές ακτίνες (αριστερά) των δεδομένων κοινού ενδιαμέσου σημείου (CMP gather δεξιά) για οριζόντιο ανακλαστήρα σταθερής ταχύτητας. Midpoint είναι το ενδιαμέσο κοινό σημείο των θέσεων των πηγών S και των θέσεων των δεκτών G και Depth point είναι το σημείο ανάκλασης των ακτίνων στον ανακλαστήρα. Το CMP gather πριν (a) και μετά (b) την δυναμική διόρθωση. (Yilmaz, 1987)

Στο σχήμα 27 απεικονίζονται οι διαδρομές των ανακλώμενων σεισμικών κυμάτων διάταξης με κοινό ενδιαμέσο σημείο M στην επιφάνεια σε σταθερής ταχύτητας οριζόντιο στρώμα. Το σημείο ανάκλασης όλων των κυμάτων είναι το D. Σε αυτή την περίπτωση η προβολή του σημείου D στην επιφάνεια ταυτίζεται με το σημείο M. Για αυτό το λόγο η διάταξη κοινού ενδιαμέσου σημείου συχνά αναφέρεται και διάταξη κοινού σημείου βάθους (Commondepthpoint (CDP) gather). Ο διπλός χρόνος διαδρομής, TWT, κάθε ανακλώμενης ακτίνας συναρτήσει του $x=2h$, δίνεται από την 62, η οποία περιγράφει πλήρως την καμπύλη των TWT για δεδομένα κοινού ενδιαμέσου σημείου.

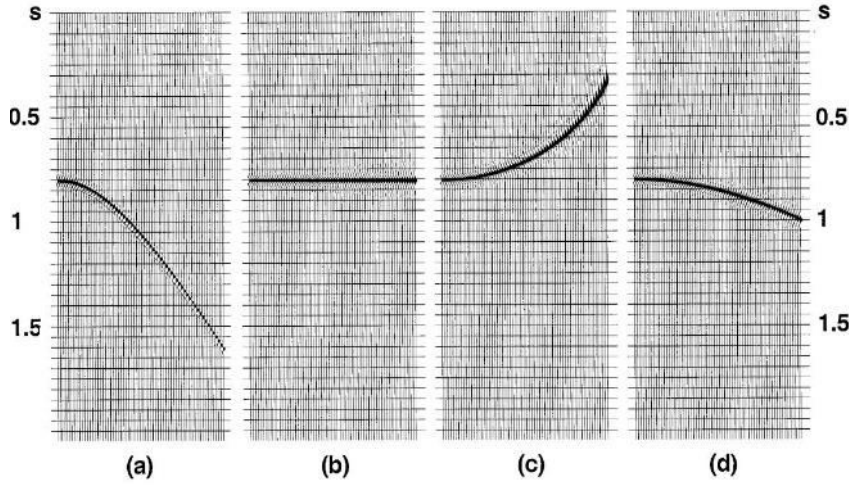
$$t(x)^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{V^2} \quad (62)$$

, όπου V είναι η ταχύτητα διάδοσης στο υπερκείμενο στρώμα. Σκοπός της δυναμικής διόρθωσης είναι η αναγωγή των TWT των ανακλώμενων ακτίνων με πορείες SDG, $t(x)$, σε διπλό κατακόρυφο χρόνο της ανακλώμενης ακτίνας με πορεία 2MD, $t(0)$. Ο $t(0)$ αντιστοιχεί στην ακτίνα μηδενικής απόστασης πηγής δέκτη στο κοινό ενδιαμέσο σημείο, η οποία προσπίπτει κάθετα στην διαχωριστική επιφάνεια στο σημείο D. Η δυναμική διόρθωση ορίζεται για κάθε ακτίνα ως η διαφορά του $t(x)$ με τον $t(0)$ και δίνεται από την εξίσωση:

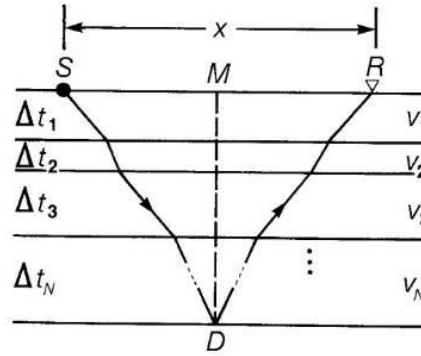
$$\Delta t_{NMO} = t(x) - t(0) = t(0) \left\{ \left[1 + \left(\frac{x}{V_{NMO} t(0)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\} \quad (63)$$

, όπου η V_{NMO} ισούται με την ταχύτητα διάδοσης στο υπερκείμενο στρώμα, V. Όταν η V_{NMO} είναι υποεκτιμημένη η Δt_{NMO} είναι υψηλότερη από την απαιτούμενη για την ευθυγράμμιση της καμπύλης των TWT δηλαδή η διόρθωση είναι υπερεκτιμημένη (overcorrected). Όταν η V_{NMO} είναι υπερεκτιμημένη η Δt_{NMO} είναι μικρότερη από την απαιτούμενη για την

ευθυγράμμιση της καμπύλης των TWT δηλαδή η διόρθωση είναι υποεκτιμημένη (undercorrected).



Σχήμα 28: (a) CMP gather με την υπερβολικού τύπου καμπύλη των TWT ανακλώμενων κυμάτων από οριζόντια διαχωριστική επιφάνεια, (b) CMP gather μετά την δυναμική διόρθωση με την ταχύτητα του μέσου (V), (c) CMP gather μετά την δυναμική διόρθωση με υποεκτιμημένη ταχύτητα V_{NMO} ($V > V_{NMO}$), (d) CMP gather μετά την δυναμική διόρθωση με υπερεκτιμημένη ταχύτητα V_{NMO} ($V < V_{NMO}$). (Yilmaz, 1987)



Σχήμα 29: Διαδρομή ανακλώμενης σεισμικής ακτίνας με σημείο ανάκλασης D από την νιοστή διαχωριστική επιφάνεια οριζόντιων στρωμάτων σταθερής ταχύτητας, V_i . M είναι το ενδιάμεσο κοινό σημείο μεταξύ της πηγής S και του δέκτη R με απόσταση x . (Yilmaz, 1987)

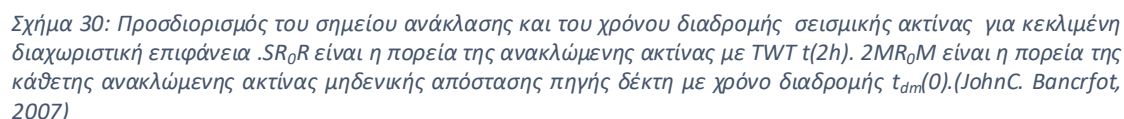
Ο TWT, $t(x)$, ανακλώμενης ακτίνας που παράγεται από την πηγή S, καταγράφεται από τον δέκτη R, έχει κοινό ενδιάμεσο σημείο M, και ανακλάται στο σημείο D από την νιοστή διαχωριστική επιφάνεια οριζόντιων στρωμάτων σταθερής ταχύτητας (σχήμα 29) προσεγγίζεται από την εξίσωση:

$$t(x)^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{V_{RMS}^2} \quad (64)$$

Η V_{RMS} είναι η μέση τετραγωνική ταχύτητα των υπερκείμενων οριζόντιων στρωμάτων.

$$V_{RMS}^2 = \frac{1}{t(0)} \sum_i^N v_i^2 \Delta t_i(0) \quad (65)$$

2.3.3 Δυναμική διόρθωση κεκλιμένης διαχωριστικής επιφάνειας



38

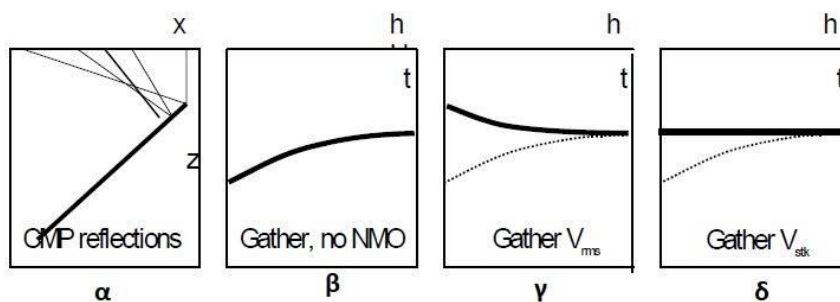
, $t_{dm}(0)$,που αντιστοιχεί στην ανακλώμενη ακτίνα μηδενικής απόστασης πηγής δέκτη, στο σημείο R_0 . Ο διπλός χρόνος διαδρομής της ανακλώμενης ακτίνας , $t(2h)$, στην κεκλιμένη διαχωριστική επιφάνειας δίνεται από την

$$t(2h)^2 = t(0)_{dm}^2 + \frac{4h \cos^2 \beta}{V^2} = t(0)_{dm}^2 + \frac{4h}{V_{stk}^2} \quad (66)$$

, όπου V είναι η ταχύτητα διάδοσης στο υπερκείμενο στρώμα, h το μισό της οριζόντιας απόστασης πηγής-δέκτη, β η κλίση του ανακλαστήρα και V_{stk} είναι η ταχύτητα για την διόρθωση DDMO, η οποία αντικαθιστά στην εξίσωση 63 την V_{NMO} .

$$V_{stk} = \frac{V_{NMO}}{\cos \beta} \quad (67)$$

Ο διπλός χρόνος διαδρομής των ανακλώμενων κυμάτων σε κεκλιμένα στρώματα σταθερής ταχύτητας και από ανακλαστήρες μικρής κλίσης προσεγγίζεται από την σχέση 64 αντικαθιστώντας την V_{rms} με V_{stk} ($V_{stk} = V_{rms}/\cos\beta$). Από την σχέση 67 συμπεραίνεται ότι η δυναμική διόρθωση κεκλιμένου ανακλαστήρα απαιτεί μεγαλύτερη ταχύτητα από την V_{rms} . Στο σχήμα 31, παρουσιάζεται η καμπύλη (β) των TWT ανακλώμενων κυμάτων από κεκλιμένη διαχωριστική επιφάνεια πριν (α) και μετά την δυναμική διόρθωση με $V_{RMS}(\gamma)$ και με $V_{stk}(\delta)$. Παρατηρείται ότι η καμπύλη με την V_{RMS} δεν είναι σωστά διορθωμένη, ενώ με την V_{stk} έχει ευθυγραμμιστεί. Επομένως, η DDMO ανάγει τους διπλούς χρόνους διαδρομής των ανακλώμενων κυμάτων σε κεκλιμένες διαχωριστικές επιφάνειες για διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου σε διπλό χρόνο διαδρομής, ο οποίος αντιστοιχεί στην ακτίνα μηδενικής απόστασης πηγής δέκτη που ανακλάται κάθετα στην διαχωριστική επιφάνεια, με αποτέλεσμα την ευθυγράμμισή τους πριν την άθροιση στο επίπεδο $h=0$. Το μειονέκτημα της διαδικασίας είναι ότι αθροίζονται ανακλώμενα κύματα με διαφορετικό σημείο ανάκλασης.

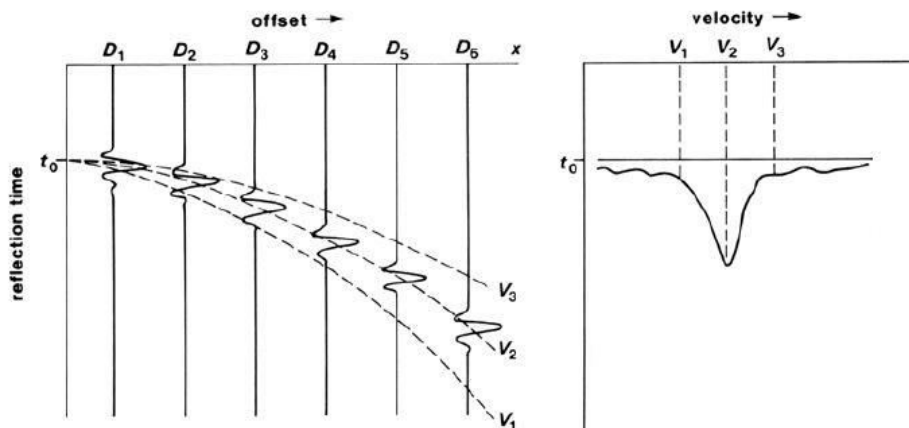


Σχήμα 31: Δυναμική διόρθωση κεκλιμένου ανακλαστήρα. (John C. Bancroft, 2007)

2.3.4 Ανάλυση ταχυτήτων

Η ανάλυση ταχυτήτων είναι η διαδικασία εκτίμησης της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων για επιλεγμένα κοινά ενδιάμεσα σημεία. Η εκτίμηση σεισμικής ταχύτητας

πραγματοποιείται από το φάσμα ταχύτητας. Το φάσμα ταχυτήτων είναι διάγραμμα της συνάφειας (semblance) του σήματος κατά μήκος των υπερβολικού τύπου καμπυλών των γεγονότων ανάκλασης. Στο φάσμα ταχυτήτων ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στη μέση τετραγωνική ταχύτητα V_{RMS} , και ο κατακόρυφος στο διπλό κατακόρυφο χρόνο διαδρομής, $t(0)$.



Σχήμα 32: Φάσμα ταχύτητας (δεξιά) του CMP gather (αριστερά). Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στις μέσες τετραγωνικές ταχύτητες (V_1 , V_2 , V_3) και ο κατακόρυφος στο διπλό χρόνο διαδρομής του γεγονότος ανάκλασης. Η μέγιστη τιμή συνάφειας του σήματος για το διπλό χρόνο διαδρομής t_0 δίνεται από την μέση τετραγωνική ταχύτητα V_2 . (https://bairdpetro.com/pdf_files/p58-62.pdf)

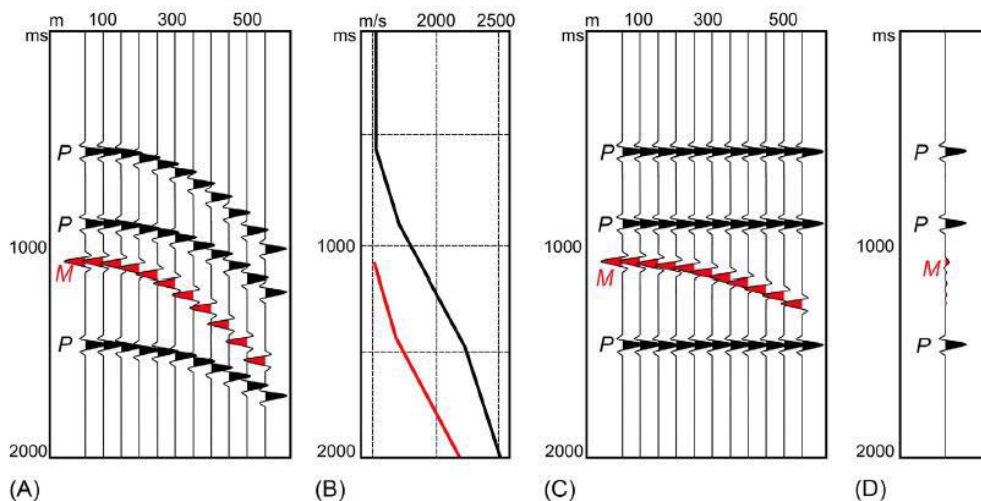
Από το φάσμα ταχυτήτων επιλέγονται τα ζευγάρια της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας και του διπλού κατακόρυφου χρόνου $(V_{RMS}, t(0))$, που αντιστοιχούν σε σημεία τοπικά μέγιστης συνάφειας. Τα ζευγάρια αποτελούν την συνάρτηση ταχύτητας, που χρησιμοποιείται στην δυναμική διόρθωση, στην χωροθέτηση και για την εύρεση της τμηματικής ταχύτητας κάθε στρώματος, V_{int} . Η τμηματική ταχύτητα προσδιορίζεται από την σχέση του Dix:

$$V_{int}^2 = \frac{(V_{rms,1}^2 t(0)_1) - (V_{rms,2}^2 t(0)_2)}{t(0)_1 - t(0)_2} \quad (68)$$

, όπου $t(0)_1, t(0)_2$ είναι οι διπλοί κατακόρυφοι χρόνοι για τις διαχωριστικές επιφάνειες του στρώματος και $V_{rms,1}, V_{rms,2}$ είναι οι αντίστοιχες μέσες τετραγωνικές ταχύτητες.

2.3.5 Υπέρθεση

Μετά την δυναμική διόρθωση ακολουθεί η υπέρθεση. Η υπέρθεση είναι η άθροιση των ιχνών διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου στον άξονα του h με σκοπό να ενισχύσει τις κύριες ανακλάσεις στη τομή υπέρθεσης (επίπεδο $h=0$). Η βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο είναι ίση με την τετραγωνική ρίζα της υπεδαφικής κάλυψης, δηλαδή τον αριθμό των ιχνών σε κάθε διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου.

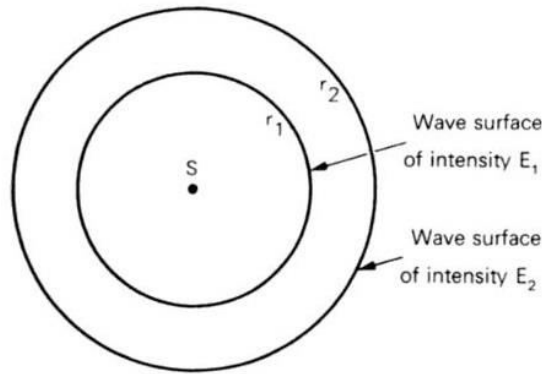


Σχήμα 33: (α) CMP gather με τρεις κύριες ανακλάσεις P και μία πολλαπλή M, (b) συνάρτηση ταχύτητας για την δυναμική διόρθωση των κύριων ανακλάσεων (μαύρη γραμμή) και για την δυναμική διόρθωση των πολλαπλών ανακλάσεων (κόκκινη γραμμή) τα , (c) μετά την δυναμική διόρθωση, (d) μετά την υπέρθεση. (Derman Dondurur, 2018)

Η υπέρθεση είναι η πρώτη μέθοδος εξασθένησης των πολλαπλών ανακλάσεων. Παράλληλα με την άθροιση των κύριων ανακλάσεων ελαττώνονται τα πλάτη των πολλαπλών ανακλάσεων, επειδή η δυναμική διόρθωση πραγματοποιείται με την συνάρτηση ταχύτητας των κύριων ανακλάσεων που είναι μεγαλύτερη από την συνάρτηση ταχύτητας των πολλαπλών ανακλάσεων με αποτέλεσμα η καμπύλη των πολλαπλών να μην ευθυγραμμίζεται πριν την υπέρθεση. Στο σχήμα 33 στα ίχνη καταγράφηκαν τρεις κύριες ανακλάσεις (P) και μία πρώτης τάξης πολλαπλή του πυθμένα (M). Οι πολλαπλές ανακλάσεις διαδίδονται στο στρώμα νερού με ταχύτητα V_{nmo} 1500m/s. Στις κύριες ανακλάσεις αντιστοιχούν μεγαλύτερες V_{nmo} , επειδή διαδίδονται σε μεγαλύτερης των 1500m/s ταχύτητας (βαθύτερα) στρώματα, εκτός της πρώτης ανάκλασης από το πυθμένα της θάλασσας. Αφού στην δυναμική διόρθωση χρησιμοποιούνται ταχύτητες διάδοσης των κύριων ανακλάσεων που είναι μεγαλύτερες από την αντίστοιχης πολλαπλής, η δυναμική διόρθωση της πολλαπλής θα είναι υποεκτιμημένη με αποτέλεσμα τα ίχνη να μην είναι επαρκώς διορθωμένα. Κατά την υπέρθεση οι κύριες ανακλάσεις θα είναι σε φάση και θα ενισχυθούν, ενώ οι πολλαπλές θα είναι εκτός φάσης και θα εξασθενήσουν.

2.4 Εξασθένηση σεισμικού κύματος

Η καταγραφή αντιπροσωπεύει το κυματικό πεδίο που παράγεται από σημειακή πηγή. Η εξασθένηση του κυματικού πεδίου συμβαίνει εξαιτίας της γεωμετρικής διασποράς και της απόσβεσης της ενέργειας του από το μέσο διάδοσης. Το αποτέλεσμα είναι ο σταδιακός μηδενισμός του πλάτους του αναπτυσσόμενου κύματος και η αλλαγή του φασματικού περιεχομένου του αρχικού σήματος της πηγής.



Σχήμα 34: Μέτωπα του κύματος σημειακής πηγής σε ομοιογενές και ελαστικό μέσο σε αποστάσεις r_1 και r_2 . (Michellavergne, 1989)

Έστω ότι σημειακή πηγή παράγει σφαιρικό κυματικό πεδίο σε ομοιογενές και ελαστικό μέσο (σχήμα 34). Η μέγιστη μετατόπιση των σωματιδίων του μέσου (πλάτος του κύματος) μειώνεται κατά την εξάπλωση του μετώπου του κύματος. Αυτό το φαινόμενο καλείται γεωμετρική διασπορά. Σε ομοιογενές μέσο η ίδια ποσότητα ενέργειας κατανέμεται στο αναπτυσσόμενο σφαιρικό μέτωπο του κύματος. Άρα η γεωμετρική διασπορά δεν προκαλεί απώλεια ενέργειας. Ο λόγος της ενέργειας ανά μοναδιαίο όγκο σε αποστάσεις r_1 και r_2 από τη πηγή είναι:

$$\frac{E_2}{E_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \quad (69)$$

Ο λόγος του πλάτους του κύματος σε αποστάσεις r_1 και r_2 από τη πηγή είναι:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{r_1}{r_2} \quad (70)$$

Επομένως, η ενέργεια κυματικού πεδίου ανά μοναδιαίο όγκο είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης, r^2 , και η εξασθένηση του πλάτους του κύματος είναι ανάλογη της απόστασης, r . Σε στρωματωμένο υπέδαφος όπου η ταχύτητα αυξάνεται με το βάθος, παρατηρείται απόκλιση του μετώπου κύματος από την σφαιρική μορφή και γρηγορότερη εξασθένησή του (Newman, 1973). Η εξασθένηση περιγράφεται από την σχέση (Michel Lavergne, 1989):

$$\frac{1}{V_{rms}^2 t} \quad (71)$$

, όπου t είναι ο διπλός χρόνος διαδρομής και V_{rms} η μέση τετραγωνική ταχύτητα των ανακλώμενων κυμάτων. Αυτή η σχέση υφίσταται για σημειακή πηγή κοντά στην επιφάνεια και χρησιμοποιείται για την διόρθωση της γεωμετρικής διασποράς στη μέθοδο σεισμικής ανάκλασης.

Αν το μέσο διάδοσης δεν είναι ελαστικό, όπως συμβαίνει με το υπέδαφος, μέρος της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα. Η ενέργεια απορροφάται από τα υλικά σημεία του μέσου εξαιτίας της εσωτερικής τριβής με αποτέλεσμα την διακοπή της μετάδοσης της σεισμικής διαταραχής. Αυτή η διαδικασία καλείται απόσβεση. Η απόσβεση εξαρτάται από την συχνότητα του κύματος και ισχύει ότι όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα τόσο

μεγαλύτερη είναι η απόσβεση. Έστω ότι σεισμικό κύμα διαδίδεται με ταχύτητα V σε ομοιογενές, ισότροπο και μη ελαστικό μέσο. Η κίνηση των υλικών σημείων του μέσου που προκαλείται από αρμονική συνιστώσα του κύματος με γωνιακή συχνότητα ω , περιγράφεται από τον σχέση:

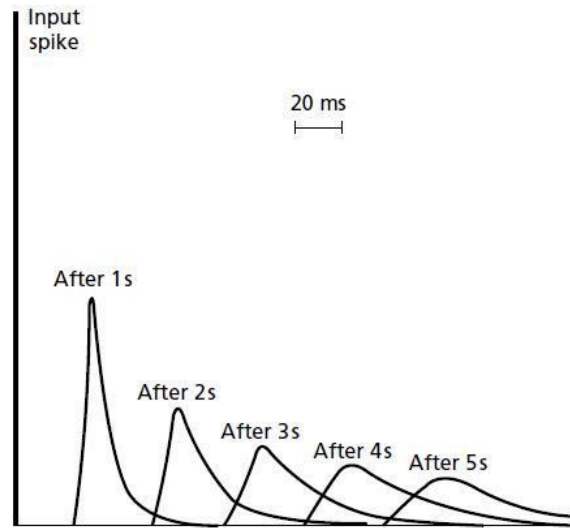
$$A_1 = A_0 e^{i\omega(t - \frac{z}{V})} e^{-\alpha z} \quad (72)$$

, όπου z είναι η απόσταση από την πηγή και α είναι ο συντελεστής απόσβεσης. Εργαστηριακές μετρήσεις έχουν δείξει ότι για συχνότητες από 10 Hz έως 250 Hz ο συντελεστής απόσβεσης θεωρείται ανάλογος της συχνότητας και προσεγγίζεται από την σχέση.

$$\alpha \cong \frac{\pi f}{QV} \quad (73)$$

, όπου f είναι η συχνότητα, V η σεισμική ταχύτητα και Q ο ποιοτικός συντελεστής. Ο ποιοτικός συντελεστής κυμαίνεται από 30 μέχρι 600 ($Q=30$ για μη ελαστικούς σχηματισμούς π.χ. μάργες, άργιλος, $Q=600$ για ελαστικούς σχηματισμούς π.χ. γρανίτης, βασάλτης). Ο συντελεστής απόσβεσης α , εκφράζει την απώλεια ενέργειας κατά την διάδοση του κύματος σε απόσταση ενός μήκους κύματος λ , και εκφράζεται σε decibels/λ. Οι τιμές του κυμαίνονται από 0,05 dB/λ για συμπαγείς σχηματισμούς μέχρι 0,75 dB/λ για μη συμπαγείς σχηματισμούς. Στο εύρος των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στην σεισμική έρευνα ο συντελεστής απορρόφησης θεωρείται ανεξάρτητος της συχνότητας. Αν το ποσό της απορρόφησης ανά μήκος κύματος είναι σταθερό, οι υψηλότερες εξασθενούν γρηγορότερα από ότι οι χαμηλότερες συχνότητες συναρτήσει του χρόνου ή της απόστασης. (Philip Kearey & Michael Brooks, & Ian Hill, 1988)

Άρα στις υψηλές συχνότητες τα κύματα εξασθενούν γρηγορότερα από τις χαμηλές συχνότητες. Επομένως, αλλάζει και το φασματικό περιεχόμενο της κυματομορφής της πηγής. Επιπλέον, όσο πιο συμπαγές είναι ένα πέτρωμα, τόσο περισσότερο πλησιάζει τις ιδανικές ελαστικές ιδιότητες με αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή απόσβεσης. Καθώς εξασθενούν οι υψηλής συχνότητας συνιστώσες του κυματιδίου, η διάρκεια της κυματομορφής της πηγής αυξάνεται. Στο σχήμα 35 παρουσιάζεται κυματίδιο μοναδιαίου παλμού και η σταδιακή εξασθένηση του κατά την διάδοση του στο υπέδαφος εξαιτίας της απόσβεσης.

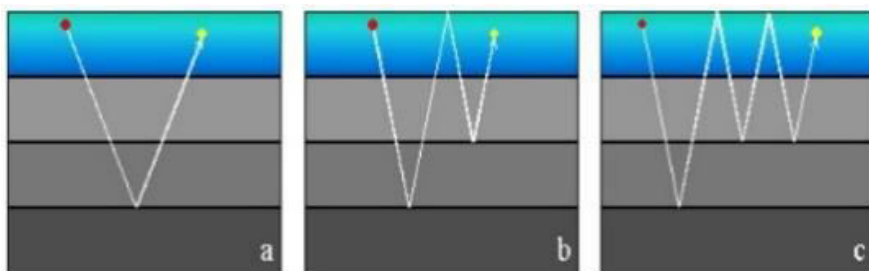


Σχήμα 35: Εξασθένιση μοναδιαίου παλμού εξαιτίας της απόσβεσης. (Philip Kearey & Michael Brooks, & Ian Hill, 1988)

2.5 Μέθοδοι εξασθένισης πολλαπλών ανακλάσεων

2.5.1 Εισαγωγή

Η ενέργεια των πολλαπλών ανακλάσεων αποτελεί τον θόρυβο της καταγραφής, η οποία παρεμβάλλεται στο σήμα δημιουργώντας προβλήματα στα στάδια επεξεργασίας, ιδιαίτερα στην χωροθέτηση, και στην ερμηνεία της σεισμικής τομής. Η κύρια ανάκλαση περιγράφεται από σεισμική ακτίνα η οποία έχει υποστεί μία ανάκλαση κατά την διάδοση της από την πηγή στον δέκτη. Ενώ η πολλαπλή ανάκλαση δημιουργείται όταν η σεισμική ακτίνα υποστεί δύο ή παραπάνω ανακλάσεις. Για να συμβεί αυτό πρέπει ο συντελεστής ανάκλασης των διαχωριστικών επιφανειών που πραγματοποιούνται οι πολλαπλές ανακλάσεις να είναι υψηλός. Οι πολλαπλές ανακλάσεις εμφανίζονται με μικρότερα πλάτη από την κύρια, επειδή η διαδρομή της σεισμικής τους ακτίνας είναι μεγαλύτερη.

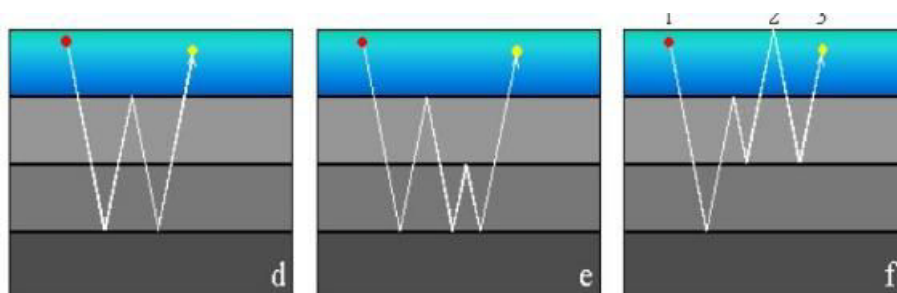


Σχήμα 36: Κύρια ανάκλαση (α), πολλαπλή ανάκλαση ελεύθερης επιφάνειας πρώτης τάξης (b) και πολλαπλή ανάκλαση ελεύθερης επιφάνειας δεύτερης τάξης (c). (Arthur B. Weglein & William H. Dragoset, 2004)

Με βάση το σημείο ανάκλασης της καταδυόμενης ακτίνας οι πολλαπλές διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες (Dragoset ,1998). Η πρώτη είναι οι πολλαπλές ανακλάσεις ελεύθερης

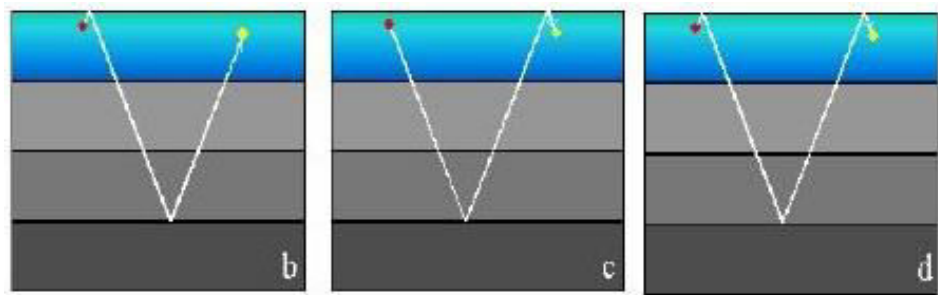
επιφάνειας (surface related multiples). Αυτές οι ανακλάσεις συμβαίνουν όταν η αναδύομενη ακτίνα ανακλάται τουλάχιστον μία φορά στην διεπιφάνεια νερού-αέρα. Τα σημεία ανάκλασης σε αυτή την διεπιφάνεια ορίζουν την τάξη της και αντιστρέφουν την πολικότητα του ανακλώμενου κύματος. Στο σχήμα 36, απεικονίζεται κύρια ανάκλαση (α), πολλαπλή ανάκλαση ελεύθερης επιφάνειας πρώτης τάξης (b) και πολλαπλή ανάκλαση ελεύθερης επιφάνειας δεύτερης τάξης (c). Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι πολλαπλές ανακλάσεις του πυθμένα (water bottom multiples) ή θαλάσσιες αντηχήσεις (water reverberations). Δημιουργούνται στο στρώμα του νερού επειδή οι συντελεστές ανάκλασης του πυθμένα και της ελεύθερης επιφάνειας (διεπιφάνεια νερού-αέρα) είναι μεγάλοι, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται με μεγάλα πλάτη σε σχέση με τις κύριες σε θαλάσσιες καταγραφές μεγάλου βάθους. Ο χρόνος διαδρομής της πρώτης τάξης πολλαπλής θαλάσσιου πυθμένα είναι διπλάσιος της κύριας ανάκλασης με αποτέλεσμα ο ανακλαστήρας να παρατηρείται σε διπλάσιο χρόνο του πραγματικού (σχήμα 39). Επίσης υψηλότερης τάξης πολλαπλές ανακλάσεις του πυθμένα προσθέτουν περισσότερους φαινόμενους ανακλαστήρες ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Επομένως οι πολλαπλές ανακλάσεις του πυθμένα είναι περιοδικές.

Η δεύτερη κατηγορία είναι οι εσωτερικές ανακλάσεις (internal multiples), οι οποίες έχουν όλες τους πολλαπλά ανακλώμενους κλάδους της σεισμικής ακτίνας τους σε εσωτερικά στρώματα. Συμβαίνουν όταν η αναδύομενη ακτίνα ανακλάται τουλάχιστον μία φορά σε εσωτερικές διαχωριστικές επιφάνειες. Στο σχήμα 37, απεικονίζεται πρώτη τάξης εσωτερική ανάκλαση (d), δεύτερης τάξης εσωτερική ανάκλαση και συνδυασμός πολλαπλής ελεύθερης επιφάνειας με εσωτερική ανάκλαση (f).



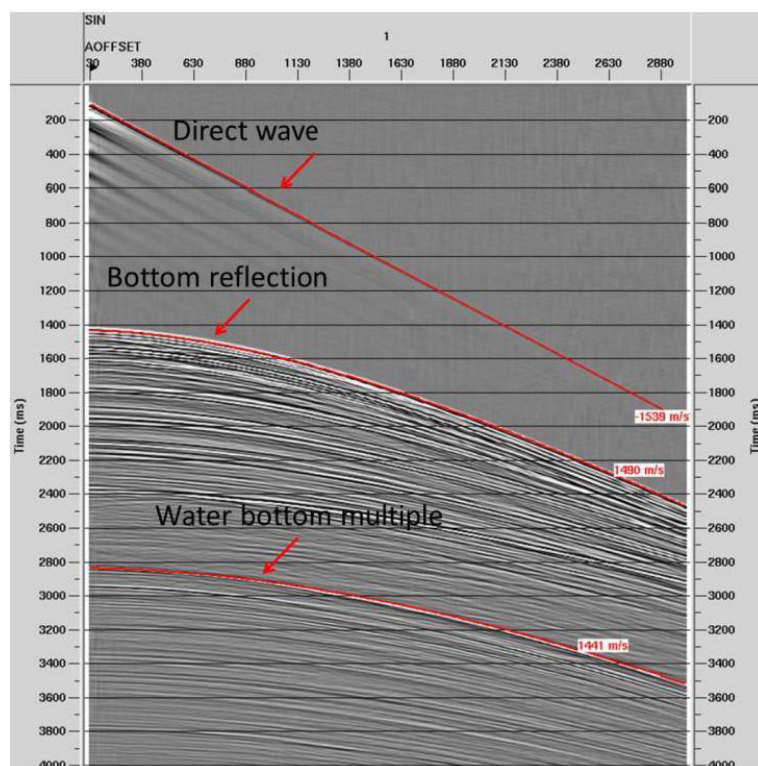
Σχήμα 37: Πρώτη τάξης εσωτερική ανάκλαση (d), δεύτερη τάξης εσωτερική ανάκλαση και συνδυασμός πολλαπλής ελεύθερης επιφάνειας με εσωτερική ανάκλαση (f). (Arthur B. Weglein & William H. Dragoset, 2004)

Με βάση τον χρόνο άφιξης τους σε σχέση με τις κύριες ανακλάσεις οι πολλαπλές κατηγοριοποιούνται σε μικρής (shortpath) και μεγάλης περιόδου (longpath). Οι πολλαπλές μεγάλης περιόδου φτάνουν σε πολλαπλάσιο χρόνο σε σχέση με την αντίστοιχη κύρια με αποτέλεσμα να προσθέτουν φαινόμενες ανακλάσεις στις καταγραφές. Ο χρόνος άφιξης των πολλαπλών ανακλάσεων μικρής περιόδου είναι σχεδόν ίδιος με τον χρόνο άφιξης των αντίστοιχων κύριων ανακλάσεων με αποτέλεσμα η κυματομορφή τους να προστίθεται στην κυματομορφή των κύριων ανακλάσεων και να αυξάνεται η διάρκεια της. Για παράδειγμα οι ghost (σχήμα 38) είναι πολλαπλές ανακλάσεις μικρής περιόδου. Είναι ισχυρές ανακλάσεις επειδή συμβαίνουν στην διεπιφάνεια νερού-αέρα με αποτέλεσμα να αλλάζουν σημαντικά την κυματομορφή της κύριας ανάκλασης.



Σχήμα 38: Πολλαπλές ανακλάσεις μικρής περιόδου πλησίον της σεισμικής πηγής (Sourceghost), του δέκτη (receiverghost) και ουσυνδυασμούς τους. (Arthur B. Weglein & William H. Dragoset, 2004)

Στο σχήμα 39, απεικονίζονται δεδομένα διάταξης κοινής πηγής. Στα 1400 ms παρατηρείται η κύρια ανάκλαση του πυθμένα. Στα 2800 ms παρατηρείται η πρώτης τάξης πολλαπλή του πυθμένα. Στα 1400-2800 ms βρίσκονται οι κύριες ανακλάσεις των υποκείμενων στρωμάτων και εσωτερικές πολλαπλές ανακλάσεις.



Σχήμα 39: Δεδομένα διάταξης κοινής πηγής με την κύρια ανάκλαση του πυθμένα, την πρώτης τάξης πολλαπλής ανάκλασης του πυθμένα και το απευθείας κύμα

Οι μέθοδοι εξασθένισης των πολλαπλών ανακλάσεων βασίζονται στα χαρακτηριστικά τους που τις διαχωρίζουν από τις κύριες ανακλάσεις, όπως η διαφορά τους στην κανονική χρονική απόκλιση. Ενώ άλλες προσπαθούν να τις μοντελοποιήσουν ή να τις προβλέψουν και να τις εξάγουν από τις καταγραφές. Οι βασικότερες διαφορές των πολλαπλών ανακλάσεων από τις κύριες ανακλάσεις είναι: Οι πολλαπλές είναι προβλέψιμες ενώ οι κύριες ανακλάσεις δεν είναι. Οι πολλαπλές εμφανίζουν μεγαλύτερη κανονική χρονική απόκλιση από τις κύριες για τον ίδιο διπλό κατακόρυφο χρόνο διαδρομής άρα απαιτούν μικρότερες V_{NMO} . Το πλάτος της πολλαπλής διαφέρει από αυτό της κύριας που

καταγράφεται στον ίδιο διπλό κατακόρυφο χρόνο διαδρομής. Η πολικότητα της πρώτης τάξης πολλαπλής ανάκλασης του πυθμένα είναι αντίθετη από την πολικότητα της αντίστοιχης κύριας ανάκλασης του πυθμένα.

Οι μέθοδοι εξασθένησης των πολλαπλών στην βιβλιογραφία χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: μέθοδοι αποσυνέλιξης, μέθοδοι μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου, μέθοδοι πρόβλεψης του κυματικού πεδίου και απομάκρυνσης. Οι μέθοδοι αποσυνέλιξης, όπου ανήκει η αποσυνέλιξη πρόβλεψης, χρησιμοποιούν την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης των ιχνών για να προβλέψουν το περιοδικό τους περιεχόμενο, το οποίο αντιστοιχεί σε πολλαπλές ανακλάσεις. Για αυτό το λόγο είναι χρήσιμες στην εξασθένηση των περιοδικών πολλαπλών από ρηχούς ανακλαστήρες. Είναι λιγότερο αποτελεσματικές στην εξασθένηση πολλαπλών σε δεδομένα βαθιάς θάλασσας, όπου η περίοδος των πολλαπλών είναι μεγάλη σε σχέση με το μήκος της καταγραφής (Xiao & Bancroft & Brown & Cao, 2003). Αυτό συμβαίνει επειδή μπορεί να μην υπάρχουν αρκετές πολλαπλές στην καταγραφή για να είναι εμφανής η περιοδικότητά τους. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι οι πολλαπλές μεγάλης περιόδου απαιτούν μεγάλης διάρκειας φίλτρο πρόβλεψης. Επειδή οι κύριες μπορεί να καταγράφονται σε παρόμοιο χρόνο με τις περιοδικές σε μεγάλης διάρκειας καταγραφές, η αποσυνέλιξη πρόβλεψης σε αυτήν την περίπτωση θα τις εξασθενεί. Επίσης, η περιοδικότητα των πολλαπλών είναι έγκυρη στον άξονα του χρόνου, οπότε η αποσυνέλιξη πρόβλεψης θα είναι λιγότερο αποτελεσματική στην πρόβλεψη των πολλαπλών στα δεδομένα διάταξης κοινής πηγής σε σχέση με αυτά στο επίπεδο $h=0$.

Οι μέθοδοι μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου χρησιμοποιούν την κανονική χρονική απόκλιση των πολλαπλών για να τις διαχωρίσουν από τις κύριες. Ο διαχωρισμός επιτυγχάνεται με κάποιον μετασχηματισμό. Για παράδειγμα από το πεδίο του χρόνου και της απόστασης στο χώρο των χρονικών και χωρικών συχνοτήτων με τον μετασχηματισμό $f-k$, όπου εφαρμόζεται το κατάλληλο φίλτρο για την αποκοπή τους. Οι μέθοδοι μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου είναι πιο αποτελεσματικές σε δεδομένα που οι πολλαπλές είναι εμφανώς διαχωρισμένες από τις κύριες.

Οι μέθοδοι πρόβλεψης του κυματικού πεδίου και απομάκρυνσης χρησιμοποιούν τις καταγραφές ή κάποιο υπεδαφικό μοντέλο για να προβλέψουν τις πολλαπλές και μετά να τις αφαιρέσουν από τα ίχνη. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει η μέθοδος SRME (Surface related multiple elimination). Η SRME παρουσιάστηκε από τον Verschuur το 1992, για την πρόβλεψη και εξαγωγή των πολλαπλών ελεύθερης επιφάνειας από τις καταγραφές. Βασίζεται στο γεγονός ότι κάθε τμήμα της πολλαπλής ελεύθερης επιφάνειας περιέχει μια κύρια ανάκλαση. Δεν χρειάζεται κάποιον μετασχηματισμό και δεν απαιτεί καμία πληροφορία για την σεισμική ταχύτητα. Απαιτούνται η γεωμετρία απόκτησης των δεδομένων και ο συντελεστής ανάκλασης της ελεύθερης επιφάνειας. Αυτή η μέθοδος είναι αποτελεσματική σε πολλαπλές μεγάλης περιόδου αλλά αποτυγχάνει στις πολλαπλές μικρής περιόδου. Για να είναι αποτελεσματική χρειάζεται πυκνό δίκτυο δεκτών και σεισμικών πηγών.

2.5.2 Φίλτρο $f-k$

Τα σεισμικά δεδομένα είναι συνάρτηση του χρόνου και της θέσης, το οποίο επιτρέπει την εφαρμογή του δισδιάστατου μετασχηματισμού Fourier. Ο δισδιάστατος μετασχηματισμός Fourier δηλώνει ότι μια συνάρτηση $x(x,t)$ με όρισμα την χρονική μεταβλητή t και την χωρική

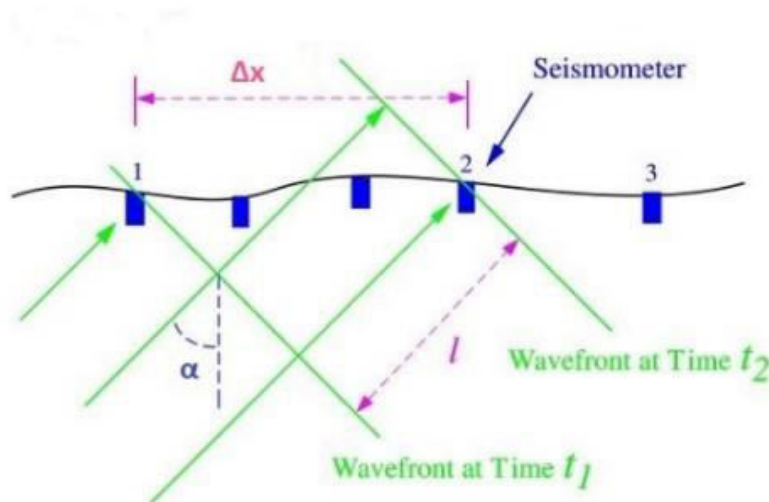
μεταβλητή x μετασχηματίζεται σε συνάρτηση της γωνιακής συχνότητας ω , και της γωνιακής χωρικής συχνότητας $[rad/m]$, K , μέσω του ακόλουθου διπλού ολοκληρώματος:

$$X(K, \omega) = \iint_{-\infty}^{+\infty} x(x, t) e^{(iKx - i\omega t)} dx dt \quad (74)$$

Ο κυματαριθμός ή η χωρική συχνότητα κ , σχετίζεται με την γωνιακή χωρική συχνότητα με την σχέση

$$\kappa = \frac{K}{2\pi} \quad [cpm] \quad (75)$$

Ο δισδιάστατος μετασχηματισμός Fourier μετατρέπει μια συνάρτηση που ορίζεται στο πεδίο του χρόνου και της απόστασης $(t-x)$, στο χώρο των συχνοτήτων $(f-\kappa)$. Το φάσμα πλάτους της συνάρτησης $x(x, t)$ ονομάζεται $f-\kappa$ φάσμα. Ο δισδιάστατος μετασχηματισμός Fourier πραγματοποιείται με δυο διαδοχικούς μονοδιάστατους διακριτούς μετασχηματισμούς. Ο πρώτος εφαρμόζεται στον άξονα του χρόνου στα ίχνη και τα μετατρέπει σε δεδομένα στον χώρο των χρονικών συχνοτήτων. Ο δεύτερος εφαρμόζεται στον άξονα της απόστασης η οποία καθορίζει την θέση του δέκτη στον οποίο αντιστοιχεί το ίχνος και μετατρέπει τα δεδομένα από το χώρο των αποστάσεων στο χώρο των κυματαριθμών $(f-\kappa)$.



Σχήμα 40: Μέτωπο κύματος που διαδίδεται σε απόσταση l με γωνία α και ταχύτητα V και καταγράφεται από τους δέκτες x_2 και x_1 , οριζόντιας απόστασης Δx , σε χρόνους t_2 και t_1 , αντίστοιχα. (JanFyen&TormodKvaerna&SveinMykkeltveit, 2002)

Τα κύματα διαχωρίζονται στο $f-\kappa$ φάσμα ανάλογα με το αντίστροφο της $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ το οποίο ορίζεται σαν η φαινόμενη ταχύτητα που το μέτωπο του κύματος διαδίδεται κατά μήκος της γραμμής των δεκτών. Στο σχήμα 40, παρουσιάζεται επίπεδο κύμα του οποίου η διεύθυνση της σεισμικής ακτίνας σχηματίζει γωνία α προς την κατακόρυφο και διαδίδεται με ταχύτητα V . Η φαινόμενη ταχύτητα του μετώπου του κύματος δίνεται από την σχέση:

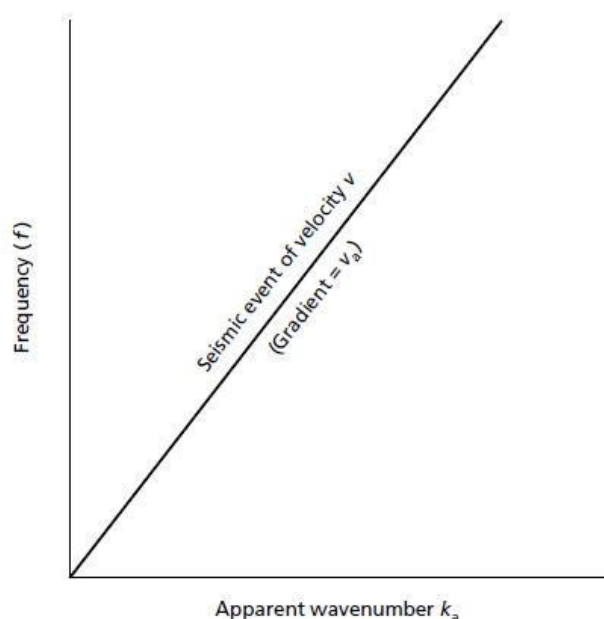
$$V_a = \frac{\Delta x}{t_2 - t_1} = \frac{V}{\sin \alpha} \quad (76)$$

,όπου t_2 και t_1 είναι οι χρόνοι καταγραφής του κύματος από τους δέκτες των οποίων η οριζόντια απόσταση είναι Δx (σχήμα 40). Κατά το μήκος της γραμμής των δεκτών κάθε

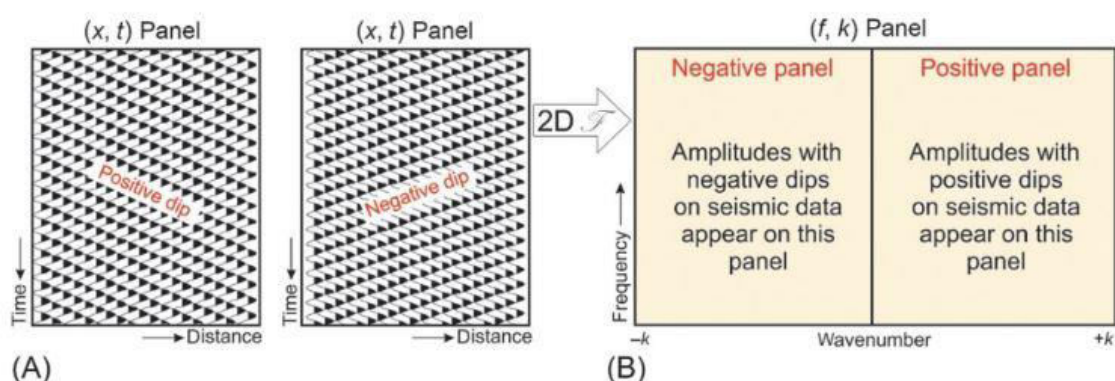
συνιστώσα του κύματος θα έχει φαινόμενο κυματαριθμό κ_α , που σχετίζεται με την συχνότητα του με την σχέση

$$f = V_\alpha \kappa_\alpha \quad (77)$$

Οπότε στο διάγραμμα f - κ_α (ή f - κ) αυτό το κύμα περιγράφεται με ευθεία γραμμή κλίσης ίσης με την φαινόμενη ταχύτητα του κύματος, V_α (σχήμα 41). Άρα κάθε επίπεδο κύμα περιγράφεται στον χώρο f - κ από χαρακτηριστική ευθεία με συγκεκριμένη κλίση, η οποία ορίζεται από την φαινόμενη ταχύτητά του. Επίσης, τα γεγονότα με θετική φαινόμενη ταχύτητα θα έχουν θετικούς κυματαριθμούς και τα γεγονότα με αρνητική φαινόμενη ταχύτητα θα έχουν αρνητικούς κυματαριθμούς (σχήμα 42). Αυτό δίνει την δυνατότητα του φιλτραρίσματος των ανεπιθύμητων γεγονότων, όπως οι πολλαπλές ανακλάσεις.



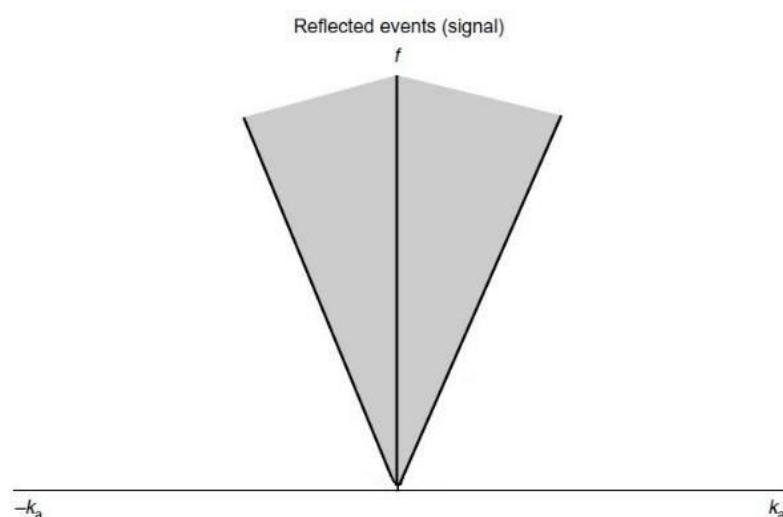
Σχήμα 41: Διάγραμμα f - κ επίπεδου κύματος που καταγράφεται από τους δέκτες. (Philip Kearey & Michael Brooks, & Ian Hill, 1988)



Σχήμα 42: Αρμονικό κύμα με θετική φαινόμενη ταχύτητα (A, αριστερά) και αρνητική φαινόμενη ταχύτητα (A, δεξιά). Θετική φαινόμενη ταχύτητα στο φάσμα f - κ αντιστοιχεί σε θετικούς κυματαριθμούς (B, $+\kappa$) ενώ αρνητική, σε αρνητικούς κυματαριθμούς (B, $-\kappa$). (Derman Dondurur, 2018)

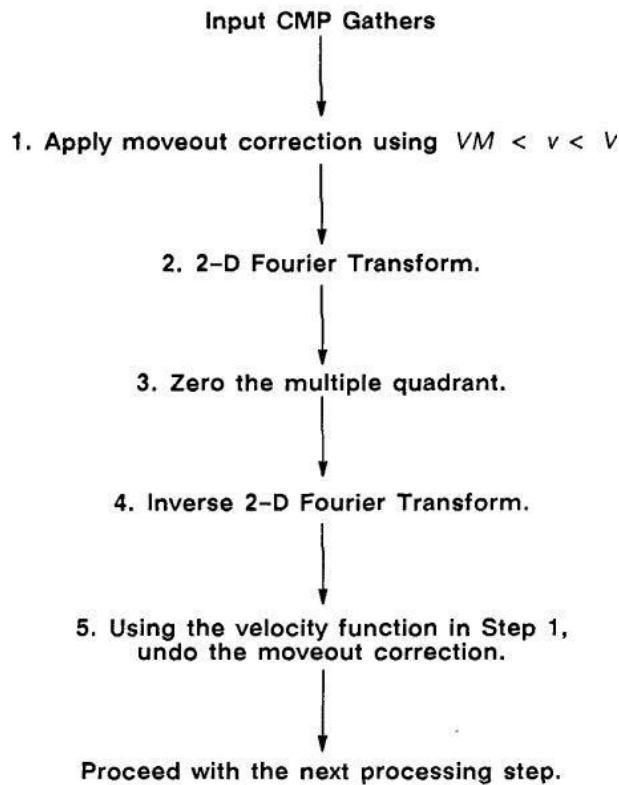
Οι ανακλάσεις μπορεί να θεωρηθούν ως άθροισμα επίπεδων κυμάτων με διαφορετική φαινόμενη ταχύτητα. Επομένως θα απεικονίζονται σε παράθυρο του φάσματος f - κ (σχήμα

43). Τα φίλτρα f - k μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξασθένηση της ενέργειας των πολλαπλών ανακλάσεων με την προϋπόθεση ότι οι συνιστώσες πολλαπλές ανακλάσεις διαχωρίζονται στο φάσμα f - k από τις κύριες. Αυτό επιτυγχάνεται με την πραγματοποίηση δυναμικής διόρθωσης με ταχύτητα που είναι μικρότερη αυτής που αντιστοιχεί για τις κύριες ανακλάσεις και μεγαλύτερη, για τις πολλαπλές. Έτσι οι κύριες δεν θα είναι σωστά διορθωμένες, δηλαδή θα εμφανίζουν αρνητική φαινόμενη ταχύτητα και οι πολλαπλές δεν θα είναι επαρκώς διορθωμένες, δηλαδή θα εμφανίζουν θετική φαινόμενη ταχύτητα. Με αποτέλεσμα οι συνιστώσες των κύριων να έχουν αρνητικούς κυματαριθμούς και οι συνιστώσες των πολλαπλών θετικούς. Αφού τα γεγονότα θα είναι επαρκώς διαχωρισμένα στο φάσμα f - k , φίλτρο αποκοπής των θετικών κυματαριθμών θα μηδενίζει μόνο τις συνιστώσες των πολλαπλών ανακλάσεων.



Σχήμα 43: Ανακλώμενα κύματα στο φάσμα f - k

Στο σχήμα 44, φαίνεται το διάγραμμα ροής απαλοιφής των πολλαπλών ανακλάσεων στο φάσμα f - k για ίχνη διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου. Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει την δυναμική διόρθωση με συνάρτηση ταχύτητας V , ενδιαμέση της συνάρτησης ταχύτητας των κύριων V_p , και των πολλαπλών ανακλάσεων V_m , ώστε οι κύριες να αποκτήσουν αρνητική φαινόμενη ταχύτητα και οι πολλαπλές θετική φαινόμενη ταχύτητα. Το δεύτερο βήμα περιλαμβάνει τον δισδιάστατο μετασχηματισμό Fourier για την δημιουργία του φάσματος f - k , όπου οι κύριες ανακλάσεις αντιστοιχούν σε αρνητικούς κυματαριθμούς και οι πολλαπλές, σε θετικούς. Το τρίτο βήμα περιλαμβάνει την αποκοπή του τεταρτημόριου του φάσματος, που βρίσκονται οι πολλαπλές (θετικοί κυματαριθμοί), με το κατάλληλο φίλτρο μηδενισμού των πλατών τους. Στο τέταρτο βήμα εφαρμόζεται ο αντίστροφος δισδιάστατος μετασχηματισμός Fourier, ο οποίος θα μετασχηματίσει τα δεδομένα πίσω στο πεδίο του χρόνου και της απόστασης. Το πέμπτο βήμα περιλαμβάνει την αντίστροφη δυναμική διόρθωση με την συνάρτηση ταχύτητας V .



Σχήμα 45: Διάγραμμα ροής απαλοιφής της ενέργειας πολλαπλών ανακλάσεων στο φάσμα f - k . (Yilmaz, 1987)

2.5.3 SRME

Η SRME προβλέπει και αφαιρεί τις πολλαπλές ανακλάσεις ελεύθερης επιφάνειας. Οι πολλαπλές ελεύθερης επιφάνειας είναι ισχυρές πολλαπλές ανακλάσεις που έχουν τουλάχιστον ένα σημείο ανάκλασης της ακτίνας τους στην ελεύθερη επιφάνεια και αποτελούν σημαντικό πρόβλημα στις καταγραφές βαθιάς θάλασσας. Η SRME είναι η πιο αποτελεσματική μεθοδολογία εξασθένησής τους και μπορεί να χειριστεί όλων των τάξεων πολλαπλές ελεύθερης επιφάνειας. Η μέθοδος για να λειτουργήσει δεν χρειάζεται πληροφορίες για το υπέδαφος αλλά πυκνό δίκτυο δεκτών και σεισμικών πηγών και τον συντελεστή ανάκλασης της διεπιφάνειας νερού-αέρα. Η πρόβλεψη του χρόνου διαδρομής των πολλαπλών ελεύθερης επιφάνειας γίνεται από την συνέλιξη των ιχνών. Κάθε γεγονός πολλαπλής ελεύθερης επιφάνειας αποτελείται από υπογεγονότα κύριων ανακλάσεων. Η συνέλιξη των ιχνών με υπογεγονότα προβλέπει την πολλαπλή ελεύθερη επιφάνειας. Στην συνέχεια ακολουθεί η αφαίρεση του προκύπτοντος ίχνους της πρόβλεψης από το ίχνος της καταγραφής.

Η πρακτική εφαρμογή της μεθόδου εκφράζεται στο χώρο των συχνοτήτων από την σχέση:

$$S_0(z_0) = S(z_0) + A(\omega)[S(z_0)]^2 + A(\omega)^2[S(z_0)]^3 + \dots \quad (78)$$

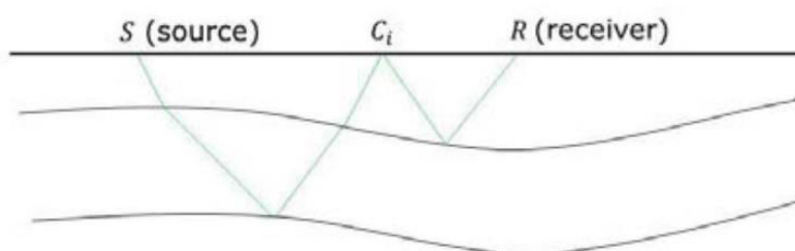
, όπου $S(z_0)$ είναι πίνακας που περιέχει τα ίχνη διάταξης κοινής πηγής με τις πολλαπλές ελεύθερης επιφάνειας, $S_0(z_0)$ είναι πίνακας που περιέχει τα ίχνη διάταξης κοινής πηγής χωρίς τις πολλαπλές ελεύθερης επιφάνειας και $A(\omega)$ είναι φίλτρο αποσυνέλιξης. Ο

δεύτερος, ο τρίτος και οι επόμενοι όροι του δεξιού μέρους της εξίσωσης είναι πίνακες ιχνών της πρόβλεψης των πολλαπλών ανακλάσεων ελεύθερης επιφάνειας όλων των τάξεων για διάταξη κοινής πηγής τα οποία εξάγονται από τον πίνακα $S(z_0)$. Το φίλτρο δίνεται από την εξίσωση:

$$A(\omega) = \frac{r_0}{S(\omega)} \quad (79)$$

,όπου $r_0(-1)$ είναι ο συντελεστής ανάκλασης της ελεύθερης επιφάνειας και $S(\omega)$ η κυματομορφή της πηγής, η οποία σε πραγματικά δεδομένα δεν είναι γνωστή.

Στο σχήμα 46, παρουσιάζεται η βασική ιδέα της μεθόδου για την πρόβλεψη των πολλαπλών ανακλάσεων ελεύθερης επιφάνειας. Πολλαπλή πρώτης τάξης ελεύθερης επιφάνειας από την πηγή S καταγράφεται από τον δέκτη R . Η πρώτη τάξης πολλαπλή ανάκλαση ελεύθερης επιφάνειας έχει μία καταδυόμενη ανακλώμενη ακτίνα στην επιφάνεια στο σημείο C_i . Παρατηρείται ότι η πολλαπλά ανακλώμενη ακτίνα αποτελείται από δύο ανακλάσεις. Η πρώτη είναι η καταγραφή σε δέκτη στη θέση C_i της κύριας ανάκλασης για την πηγή στην θέση S και η δεύτερη αποτελεί την καταγραφή σε δέκτη στη θέση R της κύριας ανάκλασης για την πηγή στη θέση C_i . Αν η θέση C_i του σημείου ανάκλασης της καταδυόμενης ανακλώμενης ακτίνας είναι γνωστή ο χρόνος διαδρομής της πολλαπλής προβλέπεται από την συνέλιξη των ιχνών τα οποία υπάρχουν στις καταγραφές των δύο ανεξάρτητων γεγονότων. Η θέση της καταδυόμενης ανακλώμενης ακτίνας δεν είναι ποτέ γνωστή.

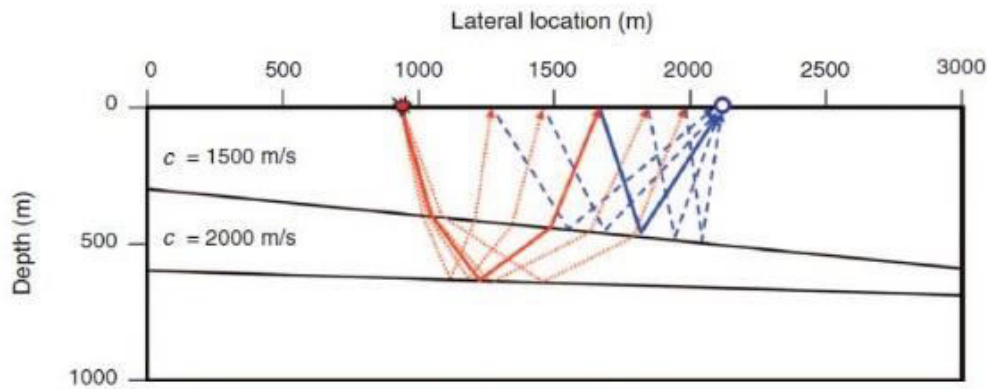


Σχήμα 46: Ο χρόνος διαδρομής της πολλαπλής ανάκλασης πρώτης τάξης, με σημείο ανάκλασης στην ελεύθερη επιφάνεια C_i , προβλέπεται από την συνέλιξη του ίχνους SC_i με το ίχνος C_iR . (Juefu Wang & Shaowu Wang, 2013)

Η SRME υπολογίζει τον χρόνο διαδρομής της πρώτης τάξης πολλαπλής ανάκλασης ελεύθερης επιφάνειας για όλα τα πιθανά σημεία της καταδυόμενης ανακλώμενης ακτίνας στην επιφάνεια για την καταγραφή με πηγή-δέκτη, $S-R$, με την συνέλιξη των κατάλληλων ιχνών, όπως φαίνεται στο σχήμα 46 σύμφωνα με την εξίσωση 80. Η παραπάνω διαδικασία επιτρέπει την πρόβλεψη του χρόνου διαδρομής της πρώτης τάξης πολλαπλής ελεύθερης επιφάνειας για το ζευγάρι $S-R$, η οποία σύμφωνα με την αρχή του Fermat θα είναι η σεισμική ακτίνα με τον μικρότερο χρόνο διαδρομής. Παρατηρείται ότι για την πρόβλεψη χρειάζονται τα ίχνη διάταξης κοινής πηγής με θέση πηγής S και τα ίχνη διάταξης κοινού δέκτη με θέση δέκτη R . Δηλαδή, η συνέλιξη των ιχνών διάταξης κοινής πηγής S με αυτά διάταξης κοινού δέκτη R θα υπολογίσει τα ίχνη για όλους τους πιθανούς χρόνους διαδρομής της πολλαπλής ελεύθερης επιφάνειας πρώτης τάξης. Το άθροισμα τους αυτόματα θα αποδώσει το ίχνος πρόβλεψης του χρόνου διαδρομής της πραγματικής πρώτης τάξης πολλαπλής ανάκλασης. Πιο συγκεκριμένα, το ίχνος πρόβλεψης θα περιέχει το χρόνο διαδρομής όλων των πρώτης τάξης πολλαπλών ανακλάσεων ελεύθερης επιφάνειας ανεξαρτήτως της διαδρομής της ακτίνας τους στο υπέδαφος. Η διαδικασία περιγράφεται από την σχέση:

$$m = r_0 \sum_{i=1}^n d(SC_i) * d(C_i R) \quad (80)$$

, όπου m είναι το ίχνος πρόβλεψης της πρώτης τάξης ελεύθερης πολλαπλής ελεύθερης επιφάνειας για το ζευγάρι S-R, $d(SC_i)$ είναι τα ίχνη διάταξης κοινής πηγής, $d(C_i R)$ είναι τα ίχνη διάταξης κοινού δέκτη και r_0 είναι ο συντελεστής ανάκλασης της ελεύθερης επιφάνειας (ισούται με -1 για θαλάσσια δεδομένα). Για την πρόβλεψη των πρώτης τάξης πολλαπλών ανακλάσεων ελεύθερης επιφάνειας άλλου ίχνους χρησιμοποιούνται τα ίχνη από τις αντίστοιχες διατάξεις κοινής πηγής και κοινού δέκτη. Η παραπάνω διαδικασία επιτρέπει την πρόβλεψη των πρώτης τάξης πολλαπλών ανακλάσεων από τις κύριες ανακλάσεις και την πρόβλεψη των υψηλότερων τάξεων πολλαπλών ελεύθερης επιφάνειας από τις πολλαπλές χαμηλότερης τάξης (Dondurur, 2018). Μετά την πρόβλεψη των πολλαπλών ανακλάσεων ελεύθερης επιφάνειας ακολουθεί η αφαίρεσή τους από τις καταγραφές.

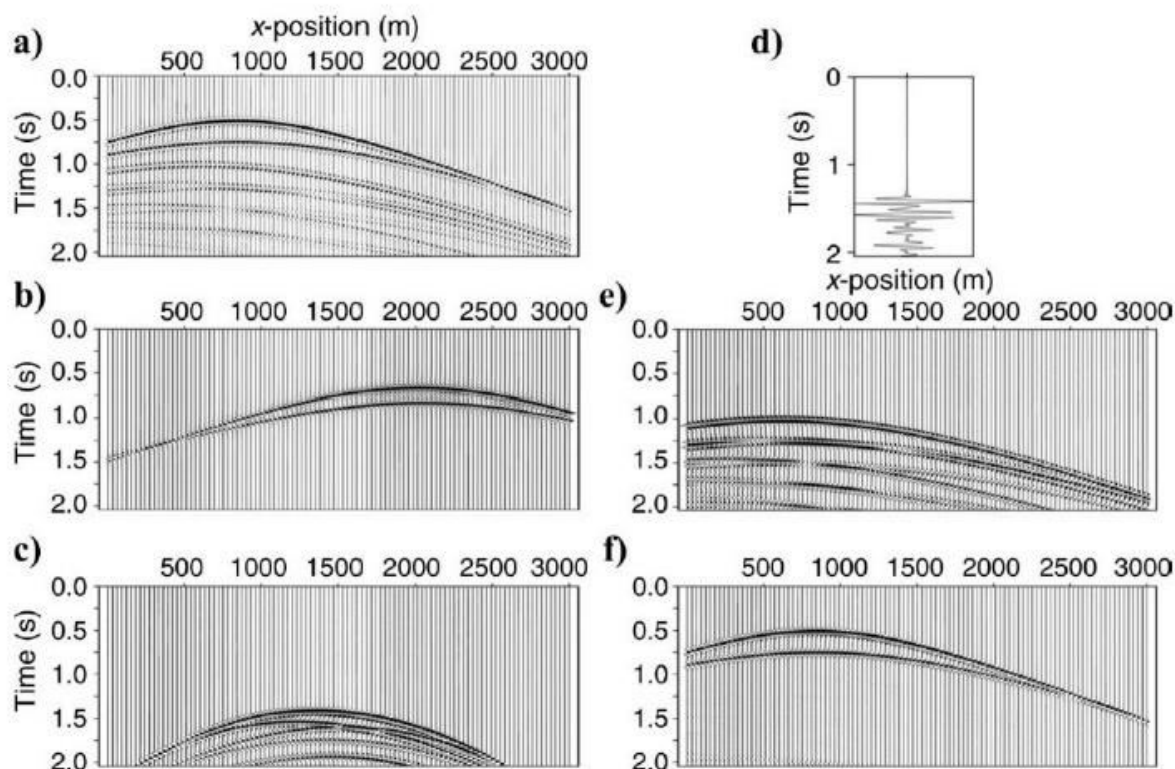


Σχήμα 47: Οι πολλαπλές ελεύθερης επιφάνειας πρώτης τάξης προβλέπονται με την συνέλιξη των ίχνων διάταξης κοινής πηγής R (κόκκινες ακτίνες) με τα ίχνη διάταξης κοινού δέκτη (μπλε ακτίνες). Η άθροιση των ίχνων πρόβλεψης αποδίδει το ίχνος με τον πραγματικό χρόνο διαδρομής της σεισμικής ακτίνας και απαλείφει τους χρόνους των άλλων ακτίνων. (Bill Dragoset & Eric Verschuur & Ian Moore & Richard Bisley, 2010)

Στο σχήμα 48, φαίνονται τα ίχνη διάταξης κοινής πηγής (a) για την πηγή στα 900m του μοντέλου του σχήματος 47. Τα ίχνη διάταξης κοινού δέκτη (b) για την θέση δέκτη στα 2100m αποτελούν ιδανική περίπτωση για την αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας, δηλαδή περιέχουν την κρουστική απόκριση των κύριων ανακλάσεων του μοντέλου. Η συνέλιξη αυτών των ίχνων σύμφωνα με την εξίσωση 80 (c) αποδίδει τα ίχνη με πρώτης τάξης πολλαπλές ανακλάσεις από όλα τα πιθανά σημεία ανάκλασης της καταδυόμενης ακτίνας για το ίχνος με ζευγάρι πηγής δέκτη (900-2100m). Το άθροισμα των ίχνων πρόβλεψης (d) περιέχει τους πραγματικούς χρόνους διαδρομής των πρώτης τάξης πολλαπλών ανακλάσεων για το ζεύγος πηγής δέκτη (900-2100m). Όταν η διαδικασία επαναλαμβάνεται με ίχνη διαφορετικής διάταξης κοινού δέκτη εκτιμώνται τα αντίστοιχα ίχνη πρόβλεψης των πολλαπλών ανακλάσεων ελεύθερης επιφάνειας για κάθε δέκτη της διάταξης κοινής πηγής (e). Η αφαίρεσή τους από τα ίχνη διάταξης κοινής πηγής (a) αποδίδει τα ίχνη διάταξης κοινής πηγής χωρίς τις πολλαπλές ελεύθερης επιφάνειας (f).

Σε πραγματικά δεδομένα οι πολλαπλές ανακλάσεις ελεύθερης επιφάνειας δεν προβλέπονται επιτυχώς. Δηλαδή δεν αντιστοιχίζονται με τις πολλαπλές των καταγραφών με αποτέλεσμα να μην αφαιρούνται επιτυχώς από τις καταγραφές. Αυτό συμβαίνει επειδή

στις καταγραφές και τα προβλεπόμενα ίχνη η κυματομορφή της πηγής είναι διαφορετική. Αν ήταν γνωστή η κυματομορφή της πηγής στα ίχνη θα γινόταν ντετερμινιστική αποσυνέλιξη πριν την συνέλιξη των ιχνών για τις προβλέψεις των ιχνών των πολλαπλών και την αφαίρεσή τους.



Σχήμα 48: Παράδειγμα της SRME για συνθετικά δεδομέναδιάταξης κοινής πηγής.(Bill Dragoset&Eric Verschuur&Ian Moore&Richard Bisley, 2010)

Η αντιστοίχιση και η αφαίρεση των προβλεπόμενων πολλαπλών από τα ίχνη των καταγραφών μπορεί να πραγματοποιηθεί με την προσαρμοστική αφαίρεση (adaptive subtraction) των πολλαπλών. Τα ίχνη των πολλαπλών φιλτράρονται πριν αφαιρεθούν από τα αντίστοιχα των καταγραφών ώστε η αφαίρεσή τους να είναι η βέλτιστη. Η πιο απλή μέθοδος της προσαρμοστικής αφαίρεσης γίνεται με την επιλογή του φίλτρου το οποίο αποδίδει την πρόβλεψη των πολλαπλών με την ελάχιστη ενέργεια στα δεδομένα (Verschuur,1992). Δηλαδή η εκτίμηση του φίλτρου f δίνεται από την ελαχιστοποίηση της εξίσωσης:

$$E(f) = \sum_t \|d - Mf\|^2 \quad (81)$$

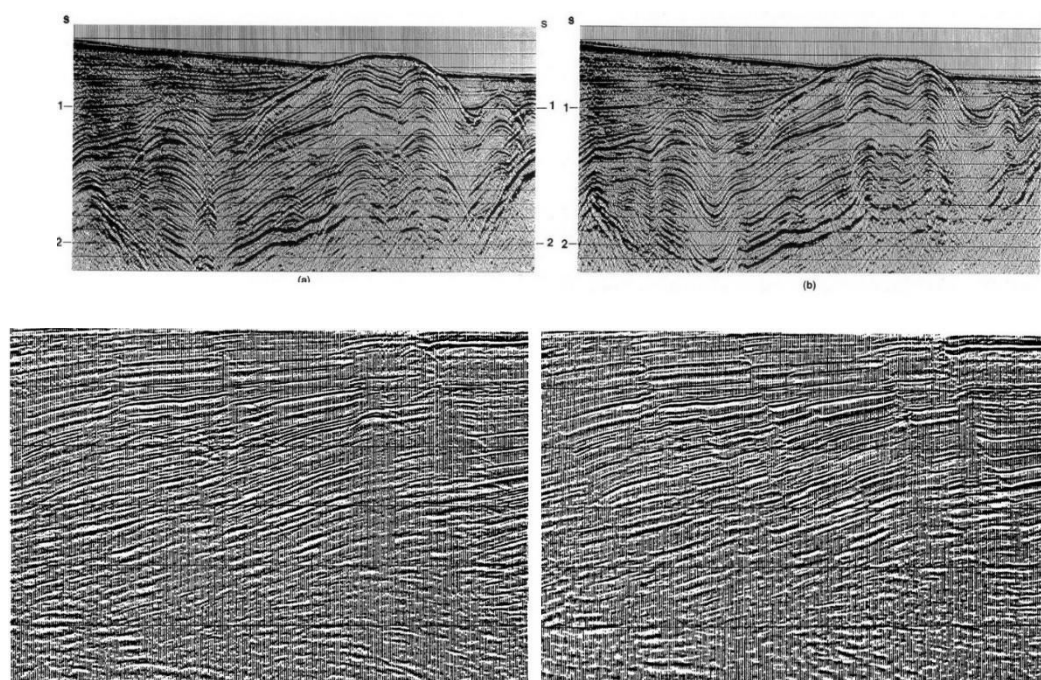
,όπου M είναι πίνακας που περιέχει τα ίχνη των προβλέψεων και d είναι τα ίχνη των καταγραφών. Το φίλτρο σχεδιάζεται σε χρονικό παράθυρο t , ώστε όταν εφαρμοστεί στις προβλέψεις των πολλαπλών η συνολική ενέργεια μετά την εξαγωγή των φιλτραρισμένων πολλαπλών να ελαχιστοποιηθεί. Το χρονικό παράθυρο μετατοπίζεται στο χρόνο και υπολογίζεται καινούργιο φίλτρο (Dragoset & Verschuur & Moore & Bisley, 2010). Οι δύο βασικές προϋποθέσεις της διαδικασίας είναι οι εξής: στο χρονικό παράθυρο οι κύριες ανακλάσεις δεν πρέπει να συμπίπτουν με τις πολλαπλές και υπάρχει ένα φίλτρο που

ελαχιστοποιεί την εξίσωση 81. Οπότε η εφαρμογή του φίλτρου εξαρτάται από τη διάρκεια του χρονικού παραθύρου και του φίλτρου. Δεδομένου ότι η ενέργεια των κύριων ανακλάσεων είναι υψηλότερη από την ενέργεια των πολλαπλών, η διαδικασία θα βάλει σε προτεραιότητα την αφαίρεση κύριας ανάκλασης στην περίπτωση που συμπίπτει με πολλαπλή. (Keating, 2015)

2.6 Χωροθέτηση

2.6.1 Εισαγωγή

Η χωροθέτηση είναι διαδικασία σεισμικής απεικόνισης, δηλαδή μετατρέπει μια σεισμική τομή σε αντιπροσωπευτική γεωλογική τομή. Σκοπός της είναι η επανατοποθέτηση της ενέργειας των ανακλάσεων από την φαινόμενη τους θέση στην πραγματική τους θέση ανάκλασης. Οι κεκλιμένοι ανακλαστήρες σε μια σεισμική τομή παρουσιάζουν μικρότερη κλίση και μεγαλύτερο μήκος σε σχέση με τους ανακλαστήρες στην γεωλογική τομή. Η χωροθέτηση αυξάνει την κλίση των ανακλαστήρων, ελαττώνει το μήκος τους και τους μετακινεί προς την άνοδο της κλίσης τους. Επιπλέον, επανατοποθετεί την ενέργεια των περιθλώμενων κυμάτων στο σημείο που πραγματοποιείται η περίθλαση. Η χωροθέτηση βελτιώνει την διακριτική ικανότητα της σεισμικής τομής με αποτέλεσμα να διακρίνονται οι γεωλογικές δομές, όπως τα ρήγματα και οι πτυχώσεις. Στο σχήμα 49, φαίνεται παράδειγμα σεισμικών τομών υπέρθεσης και οχωροθετημένες τομές τους.

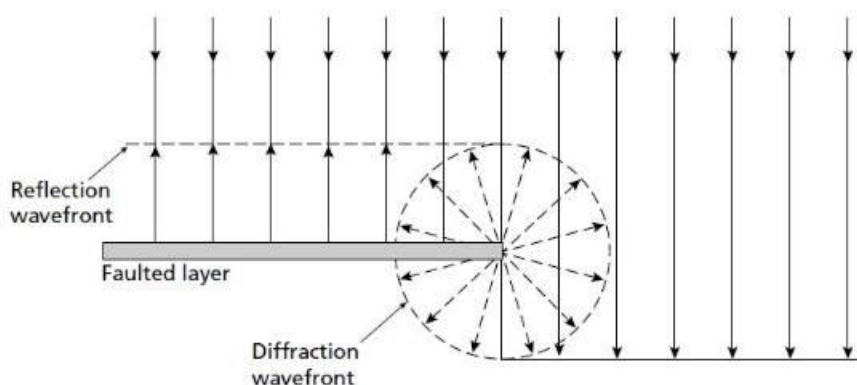


Σχήμα 49: Τομές υπέρθεσης (αριστερά), Τομές χωροθέτησης (δεξιά). (G. H. F. Gardner, 1985 & Yilmaz, 1987)

Για να είναι πιο αντιπροσωπευτική η χωροθετημένη σεισμική τομή και για να έχει υψηλότερη ανάλυση πρέπει να απεικονίζεται συναρτήσει του βάθους (χωροθέτηση βάθους). Η χωροθέτηση βάθους είναι χρονοβόρα διαδικασία και απαιτεί ακριβές μοντέλο

ταχυτήτων, το οποίο είναι δύσκολο να δημιουργηθεί, οπότε η χωροθετημένη σεισμική τομή απεικονίζεται συναρτησείου χρόνου (χρονική χωροθέτηση). Ο στόχος της χωροθέτησης βάθους είναι η τοποθέτηση της ενέργειας των ανακλάσεων στην πραγματική γεωλογικής τους θέση με πλάτος που αντιστοιχεί στον συντελεστή ανάκλασης. Ο στόχος της χρονικής χωροθέτησης είναι η επίτευξη της βέλτιστης συγκέντρωσης της ενέργειας των ανακλάσεων στην αντίστοιχη θέση. Η συγκέντρωση της ενέργειας κάθε θέσης εξαρτάται από την ταχύτητα της. Επίσης η χρονική χωροθέτηση λειτουργεί με απλούστερο μοντέλο ταχυτήτων και η χωροθετημένη σεισμική τομή της είναι συγκρίσιμη με την σεισμική τομή, άρα μπορεί να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της χωροθέτησης.

Στην μετέπειτα επεξεργασία πραγματοποιήθηκε η χωροθέτηση Kirchhoff. Η χωροθέτηση Kirchhoff υποθέτει ότι η επιφάνεια ενός ανακλαστήρα αποτελείται από σημεία περίθλασης. Η περίθλαση πραγματοποιείται όταν ένα σεισμικό κύμα προσπέσει σε σημειακό εμπόδιο ή σε ασυνέχεια μικρότερη από το μήκος του κύματος του, λ. Η ασυνέχεια λειτουργεί σαν δευτερογενής σημειακή πηγή και παράγει σφαιρικό μέτωπο κύματος (σχήμα 50). Η μέθοδος προσδιορίζει τους χρόνους διαδρομής των περιθλώμενων ακτίνων και αθροίζει τα πλάτη (ή ενέργεια) τους στο σημείο της περίθλασης τους, αφού πριν εφαρμοστούν διορθώσεις για τα πλάτη τους και την φάση τους. Η χωροθέτηση πραγματοποιείται στον όγκο των δεδομένων πριν (prestack) ή μετά την υπέρθεση (poststack). Για την χωροθέτηση μετά την υπέρθεση η ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων βρίσκεται στο επίπεδο $h=0$, ενώ για την χωροθέτηση πριν την υπέρθεση η ενέργεια βρίσκεται σε όλο τον όγκο των δεδομένων.

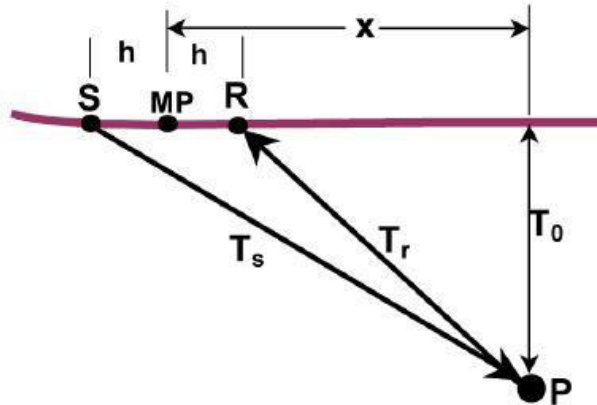


Σχήμα 50: Περίθλαση επίπεδου σεισμικού κύματος σε ασυνέχεια. (J. Preine & B. Schwarz & A. Bauer & C. Hübscher, 2020)

Η δυναμική διόρθωση των ιχνών διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου σε συνδυασμό με την υπέρθεση θα τοποθετήσει την ενέργεια των ανακλώμενων ακτίνων στο πραγματικό τους σημείο στο επίπεδο $h=0$ μόνο για οριζόντιους ανακλαστήρες. Σε κεκλιμένους ανακλαστήρες η κανονική χρονική απόκλιση των ανακλώμενων ακτίνων των ιχνών διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου προσδιορίζεται από την εξίσωση της δυναμικής διόρθωσης, αλλά οι ανακλώμενες ακτίνες προέρχονται από διαφορετικά σημεία ανάκλασης (προς την άνοδο της κλίσης). Για να υπερτεθεί η ενέργεια των ανακλώμενων ακτίνων στο πραγματικό τους σημείο ανάκλασης τους στο επίπεδο $h=0$ η χωροθέτηση πραγματοποιείται πριν την υπέρθεση. Επιπλέον, η ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων στον όγκο των δεδομένων δεν

υπερτίθεται βέλτιστα στο επίπεδο $h=0$ με την δυναμική διόρθωση των ιχνώνδιάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου, επειδή ο χρόνος διαδρομής τους δεν προσδιορίζεται από την εξίσωση της δυναμικής διόρθωσής. Για να συγκεντρωθεί η ενέργεια των περιθλάσεων στο $h=0$ χωροθετείται πριν υπερτεθεί.

2.6.2 Χρόνος διαδρομής περιθλώμενης ακτίνας



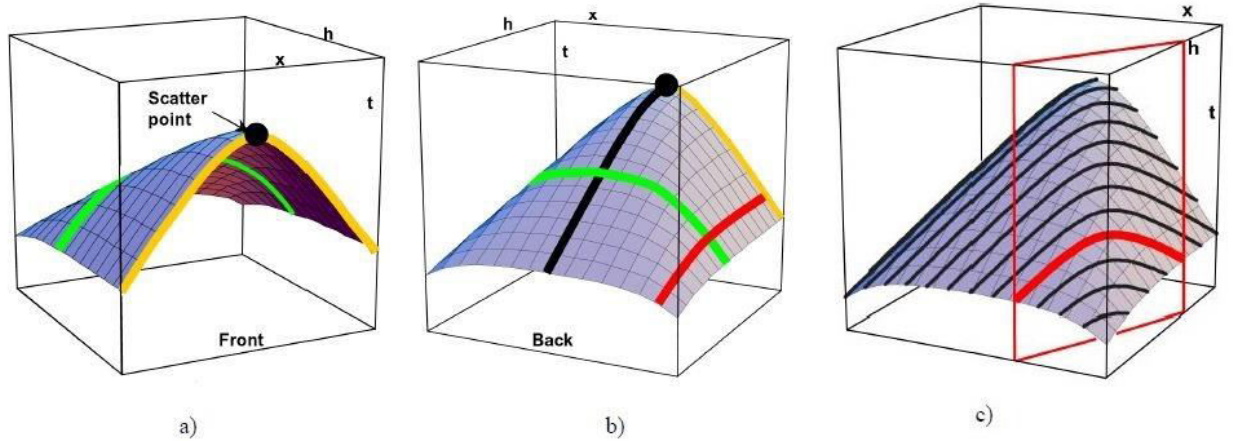
Σχήμα 51: Διαδρομή περιθλώμενης ακτίνας. (John C. Bancroft, 2001)

Η DSR (double-square-root equation) εξίσωση (εξίσωση 82) προσδιορίζει τους χρόνους διαδρομής των περιθλώμενων σεισμικών ακτίνων. Ο χρόνος διαδρομής, T , ακτίνας που παράγεται από την πηγή S περιθλάται στο σημείο P και καταγράφεται από τον δέκτη R ισούται με το άθροισμα του χρόνου διαδρομής της ακτίνας από την πηγή στο σημείο περίθλασης, T_s , και του χρόνου διαδρομής της ακτίνας από το σημείο περίθλασης στον δέκτη, T_r , και εξαρτάται από την μέση τετραγωνική ταχύτητα, V_{rms} , στο σημείο περίθλασης. Ο χρόνος διαδρομής T της περιθλώμενης ακτίνας συνάρτηση της απόστασης στην επιφάνεια του σημείου περίθλασης από το ενδιαμέσο σημείο MP (σχήμα 51) δίνεται από την εξίσωση:

$$T = T_s + T_r = \sqrt{\frac{T_0^2}{4} + \frac{(x+h)^2}{V_{rms}^2}} + \sqrt{\frac{T_0^2}{4} + \frac{(x-h)^2}{V_{rms}^2}} \quad (82)$$

, όπου T_0 είναι ο διπλός κατακόρυφος χρόνος διαδρομής της περιθλώμενης ακτίνας, h είναι η απόσταση της πηγής και του δέκτη από το ενδιαμέσο κοινό σημείο, x είναι η οριζόντια απόσταση του σημείου περίθλασης από το ενδιαμέσο σημείο και V_{rms} είναι η μέση τετραγωνική ταχύτητα στο σημείο περίθλασης P .

2.6.3 Περίθλαση στον όγκο των δεδομένων



Σχήμα 52: Χρόνοι διαδρομής περιθλώμενων ακτίνων στον όγκο των δεδομένων. (John C. Bancroft, 2001)

Η ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων στον όγκο των δεδομένων (x, h, t) φαίνεται στο σχήμα 52. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ως πυραμίδα (CheopsPyramid). Η πορτοκαλί καμπύλη (σχήμα 52) στο επίπεδο $h=0$ του όγκου $(x, 0, t)$ ονομάζεται περιθλαστική καμπύλη (diffraction hyperbola). Οι χρόνοι διαδρομής των περιθλώμενων ακτίνων μηδενικής απόστασης πηγής δέκτη δίνονται από την εξίσωση 82 για $h=0$.

$$T(x) = \sqrt{T_0^2 + \frac{4x^2}{V_{rms}^2}} \quad (83)$$

Η χωροθέτηση Kirchhoff μετά την υπέρθεση χρησιμοποιεί την παραπάνω εξίσωση για να αθροίσει τα πλάτη των περιθλώμενων ακτίνων στο σημείο της περίθλασης που βρίσκεται στην κορυφή της περιθλαστικής υπερβολής.

Η μαύρη καμπύλη (σχήμα 52) αντιστοιχεί στους χρόνους διαδρομής των περιθλώμενων ακτίνων διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου που η θέση του στην επιφάνεια ταυτίζεται με το σημείο περίθλασης. Οι χρόνοι διαδρομής των περιθλώμενων ακτίνων στο CMPgather δίνονται από την εξίσωση 82 για $x=0$.

$$T(h) = \sqrt{T_0^2 + \frac{4h^2}{V_{rms}^2}} \quad (84)$$

Η εξίσωση 84 χρησιμοποιείται στην δυναμική διόρθωση και περιγράφει πλήρως τους χρόνους διαδρομής των περιθλώμενων ακτίνων διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου που η θέση του στην επιφάνεια ταυτίζεται με το σημείο περίθλασης.

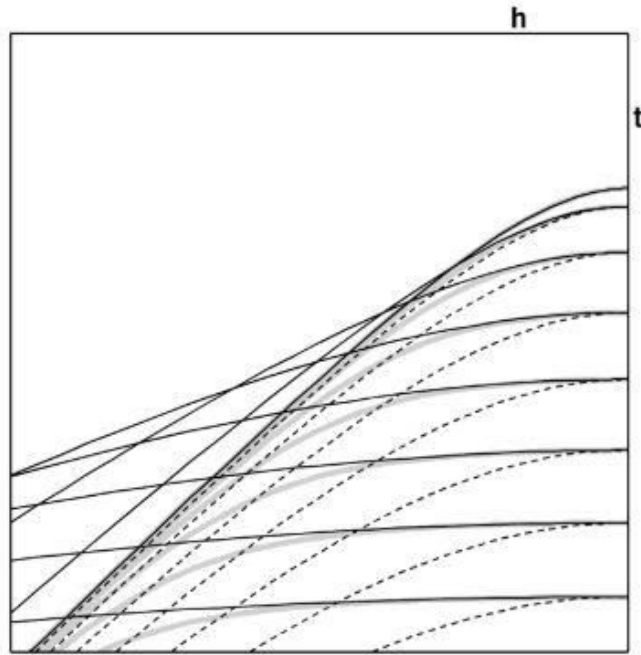
Η κόκκινη καμπύλη (σχήμα 52b) αντιπροσωπεύει τους χρόνους διαδρομής των περιθλώμενων ακτίνων διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου που η θέση του στην επιφάνεια δεν ταυτίζεται με το σημείο περίθλασης. Αυτές οι καμπύλες δεν είναι υπερβολικού τύπου. Η δυναμική διόρθωση με την ταχύτητα V_{rms} σε συνδυασμό με την

υπέρθεση δεν θα τοποθετήσει την ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων στην θέση τους στο επίπεδο $h=0$, δηλαδή στην περιθλαστική καμπύλη. HDDMO διόρθωση χρησιμοποιεί την κλίση α της περιθλαστικής καμπύλης στο επίπεδο $h=0$ για να προσδιορίζει τους χρόνους διαδρομής των περιθλώμενων ακτίνων διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου που η θέση του στην επιφάνεια δεν ταυτίζεται με το σημείο περίθλασης

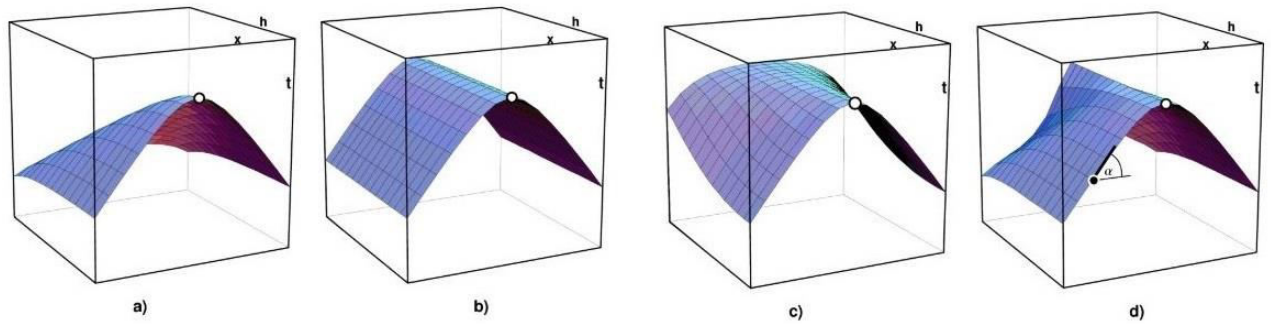
$$V_{stk} = \frac{V_{rms}}{\sqrt{1 - \tan^2 \alpha}} \quad (85)$$

Η εξίσωση 84 με V_{stk} περιγράφει τους χρόνους διαδρομής των περιθλώμενων ακτίνων διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου μόνο για τα μικρά h . Άρα ούτε η δυναμική διόρθωση με V_{stk} σε συνδυασμό με την υπέρθεση θα τοποθετήσει την ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων στην θέση τους στο επίπεδο $h=0$. Στο σχήμα 53 οι γκρι καμπύλες περιγράφουν χρόνους διαδρομής των περιθλώμενων ακτίνων για όλα τα κοινά ενδιάμεσα σημεία στον όγκο των δεδομένων, οι διακεκομμένες καμπύλες αντιστοιχούν στους χρόνους διαδρομής με V_{rms} και οι μαύρες καμπύλες αντιστοιχούν στους χρόνους διαδρομής με V_{stk} . Επίσης στο σχήμα 54 φαίνεται η ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων πριν την δυναμική διόρθωση (a), μετά την δυναμική διόρθωση με V_{rms} (c), μετά την δυναμική διόρθωση με V_{stk} (d) και το επιθυμητό αποτέλεσμα της δυναμικής διόρθωσης (b). Συμπεραίνεται ότι η δυναμική διόρθωση σε συνδυασμό με την υπέρθεση δεν θα τοποθετήσει την ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων στη περιθλαστική καμπύλη του επιπέδου $h=0$, όπου δρα η χωροθέτηση μετά την υπέρθεση, επειδή οι χρόνοι διαδρομής τους δεν περιγράφονται από την εξίσωση της δυναμικής διόρθωσης. Η χωροθέτηση πριν την υπέρθεση χρησιμοποιεί την εξίσωση 82, η οποία περιγράφει πλήρως τους χρόνους διαδρομής των περιθλώμενων ακτίνων στον όγκο των δεδομένων.

Η πράσινη καμπύλη (σχήμα 52) αντιστοιχεί στους χρόνους διαδρομής των περιθλώμενων ακτίνων στην σεισμική τομή σταθερού h . Αυτές η καμπύλες δεν είναι υπερβολικού τύπου και για τον προσδιορισμό των χρόνων διαδρομής των περιθλώμενων ακτίνων απαιτείται η εξίσωση 82. Στο σχήμα 52 (γ) απεικονίζονται οι χρόνοι διαδρομής των περιθλώμενων ακτίνων διάταξης κοινής πηγής. Οι καμπύλες τους είναι υπερβολικού τύπου, ίδιας καμπυλότητας, και για τον προσδιορισμό των χρόνων διαδρομής των περιθλώμενων ακτίνων απαιτείται όλη η εξίσωση 82.

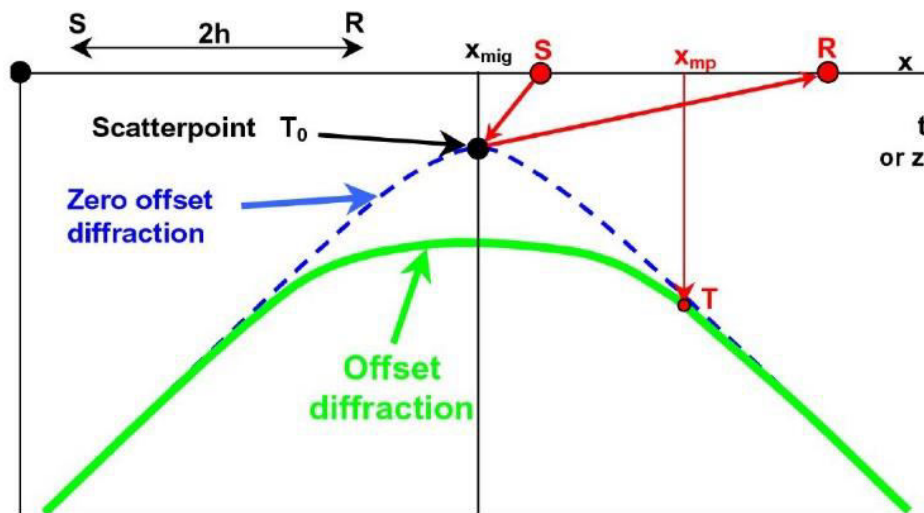


Σχήμα 53: Χρόνοι διαδρομής περιθλώμενων ακτίνων διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου (γκρι καμπύλες), χρόνοι διαδρομής δυναμικής διόρθωσης με V_{rms} (διακεκομμένες καμπύλες), χρόνοι διαδρομής δυναμικής διόρθωσης με V_{stk} (μαύρες καμπύλες). (John C. Bancroft, 2001)



Σχήμα 54: (a) Ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων πριν την δυναμική διόρθωση, (b) επιθυμητό αποτέλεσμα δυναμικής διόρθωσης, (c) δυναμική διόρθωση με V_{rms} , (d) δυναμική διόρθωση με V_{stk} , όπου α είναι η κλίση της περιθλαστικής υπερβολής. (John C. Bancroft, 2001)

2.6.4 Περίθλαση σε σεισμική τομή σταθερού h



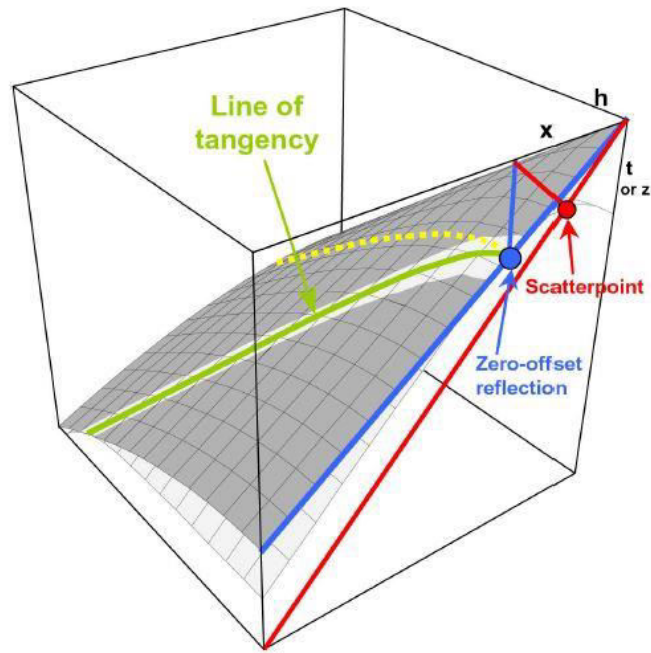
Σχήμα 55: Σεισμική τομή σταθερού h στον όγκο των δεδομένων. (John C. Bancroft, 2001)

Στο σχήμα 55 φαίνεται σεισμική τομή σταθερού h στον όγκο των δεδομένων, όπου όλα τα ίχνη έχουν την ίδια απόσταση πηγής δέκτη, η οποία είναι 2h. Στο σχήμα φαίνεται σημείο περίθλασης σε κατακόρυφο χρόνο, T_0 , και ο χρόνος διαδρομής περιθλώμενης ακτίνας, T. Επίσης φαίνεται η ενέργεια της περιθλαστικής καμπύλης (zero offset diffraction) στο επίπεδο $h=0$ και η ενέργεια όλων των περιθλώμενων ακτίνων της σεισμικής τομής σταθερού h. Παρατηρείται ότι σε μεγάλες αποστάσεις του ενδιαμέσου κοινού σημείου x_{mp} η περίθλαση σταθερού h εφάπτεται της περιθλαστικής υπερβολής. Σε μικρές αποστάσεις η περίθλαση σταθερού h δεν εφάπτεται στην περιθλαστική καμπύλη και η κορυφή της βρίσκεται κάτω από το σημείο περίθλασης. Η δυναμική διόρθωση θα τοποθετήσει την κορυφή της περίθλασης σταθερού h στο σημείο περίθλασης αλλά όλα τα άλλα σημεία δεν θα ευθυγραμμιστούν με αυτά της περιθλαστικής καμπύλης, όπως φαίνεται στο σχήμα 54 c και d. Οι χρόνοι διαδρομής των περιθλώμενων ακτίνων της περίθλασης σταθερού h ορίζονται από εξίσωση 82 κρατώντας τον όρο, h , σταθερό.

$$T = T_S + T_R = \sqrt{\frac{T_0^2}{4} + \frac{(x + h_c)^2}{V_{rms}^2}} + \sqrt{\frac{T_0^2}{4} + \frac{(x - h_c)^2}{V_{rms}^2}} \quad (86)$$

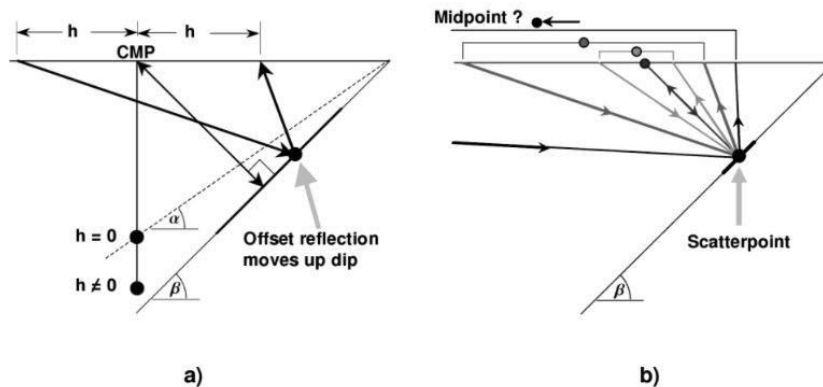
2.6.5 Μοντελοποίηση ανακλαστήρα

Στην χωροθέτηση Kirchhoff κάθε ανακλαστήρας περιγράφεται από σημεία περίθλασης κατά το μήκος της επιφάνειάς του. Η ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων για κάθε σημείο περίθλασης στην επιφάνεια του ανακλαστήρα, που πρέπει να τοποθετηθεί στο σημείο της περίθλασης του, προσδιορίζεται από την εξίσωση 82. Στο σχήμα 56, φαίνεται κεκλιμένος ανακλαστήρας (κόκκινη γραμμή) και η απόκριση του στο επίπεδο $h=0$ (μπλε γραμμή). Επίσης φαίνεται ένα σημείο περίθλασης στον ανακλαστήρα (scatterpoint) και η απόκριση του στο επίπεδο $h=0$ (zero offset reflection).



Σχήμα 56: Μοντελοποίηση κεκλιμένου ανακλαστήρα. (John C. Bancroft, 2001)

Η ενέργεια των ανακλώμενων ακτίνων του σημείου περίθλασης, δεν βρίσκεται στα δεδομένα διάταξης του αντίστοιχου κοινού ενδιάμεσου σημείου στο επίπεδο $h=0$ (διακεκομμένη γραμμή), επειδή τα δεδομένα της διάταξης αυτού του κοινού ενδιάμεσου σημείου περιέχουν ίχνη ανακλώμενων ακτίνων από σημεία ανάκλασης προς την άνοδο της κλίσης του ανακλαστήρα (σχήμα 57 α). Η ενέργεια των ανακλώμενων ακτίνων στο σημείο περίθλασης αντιστοιχεί σε ακτίνες που το h αυξάνεται προς την κάθοδο της κλίσης του ανακλαστήρα. Αυτές οι ακτίνες ανήκουν στα δεδομένα διάταξης κοινών ενδιάμεσων σημείων και η θέση τους μετατοπίζεται προς την κάθοδο της κλίσης του ανακλαστήρα (σχήμα 57 β). Στο σχήμα 56 η ενέργεια των ανακλώμενων ακτίνων βρίσκεται στην εφαπτόμενη γραμμή της πυραμίδας (της ενέργειας του σημείου περίθλασης) με την απόκριση του κεκλιμένου ανακλαστήρα στον όγκο των δεδομένων. Στην χωροθέτηση Kirchhoff αθροίζεται όλη η ενέργεια, η οποία ορίζεται από την εξίσωση 82, στο σημείο περίθλασης. Με την υπόθεση ότι το σήμα, δηλαδή η ανακλώμενη ενέργεια υπερτερεί του θορύβου.



Σχήμα 57: Ανακλώμενη ακτίνα σε διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου, η οποία ανακλάται σε σημείο προς την άνοδο της κλίσης του ανακλαστήρα (α). Ανακλώμενες ακτίνες στο ίδιο σημείο ανάκλασης σε κεκλιμένο ανακλαστήρα (β). Οι κουκίδες είναι τα ενδιάμεσα κοινά σημεία κάθε ακτίνας. (John C. Bancroft, 2001)

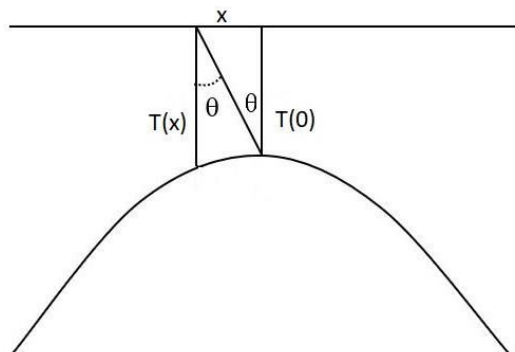
2.6.6 Χωροθέτηση Kirchhoff

Η χωροθέτηση Kirchhoff υποθέτει ότι η επιφάνεια ενός ανακλαστήρα αποτελείται από σημεία περίθλασης. Αν τα δεδομένα έχουν αποκτηθεί με μεγάλο χρόνο καταγραφής, η ενέργεια ενός σημείου περίθλασης θα βρίσκεται σε όλα τα ίχνη. Η μέθοδος ορίζει ένα σημείο χωροθέτησης με κατακόρυφο χρόνο διαδρομής T_0 και μέση τετραγωνική ταχύτητα V_{rms} και αθροίζει την ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων από το σημείο χωροθέτησης, η οποία προσδιορίζεται από την DSR εξίσωση, στο σημείο χωροθέτησης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα σημεία χωροθέτησης.

Η χωροθέτηση μετά την υπέρθεση λειτουργεί στο επίπεδο $h=0$ και η ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων που αθροίζεται στο σημείο χωροθέτησης αντιστοιχεί σε χρόνους που προσδιορίζονται από την εξίσωση 87. Αν το σημείο χωροθέτησης αντιστοιχεί σε κεκλιμένου ανακλαστήρα η χωροθέτηση μετά την υπέρθεση θα αθροίσει στο σημείο χωροθέτησης ενέργεια από ανακλώμενες ακτίνες σε διαφορετικά σημεία ανάκλασης.

$$T(x) = \sqrt{T_0^2 + \frac{4x^2}{V_{rms}^2}} \quad (87)$$

,όπου $T(0)$ είναι ο κατακόρυφος χρόνος του σημείου χωροθέτησης, $T(x)$ είναι ο κατακόρυφος χρόνος του σημείου που θα χωροθετηθεί και x είναι η οριζόντια απόσταση στην επιφάνεια του σημείου χωροθέτησης με το σημείο που θα χωροθετηθεί (σχήμα 58). Η απόκριση των πλατών των περιθλώμενων ακτίνων στους δέκτες εξαρτάται από την γωνία μεταξύ διαδρομής της περιθλώμενης ακτίνας με την κατακόρυφο στο σημείο περίθλασης, θ . Οπότε πριν την άθροιση τους πολλαπλασιάζονται με το συνημίτονο της παραπάνω γωνίας (obliquity factor). Επιπλέον, πολλαπλασιάζονται με τον όρο $\sqrt{\frac{1}{v_{rms}r}}$ (spherical divergence factor), εξαιτίας της γεωμετρικής διασποράς των περιθλώμενων ακτίνων από το σημείο περίθλασης. Το r είναι η απόσταση του σημείου περίθλασης από την θέση καταγραφής της περιθλώμενης ακτίνας στην επιφάνεια. Επίσης πριν την άθροιση εφαρμόζεται φίλτρο για την μετατόπιση της φάσης των περιθλώμενων ακτίνων κατά 45° και για την προσαρμογή των πλατών των φασμάτων τους συνάρτηση της τετραγωνικής ρίζας των συχνοτήτων τους (wavelet shaping factor).



Σχήμα 58 Περιθλαστική καμπύλη στο $h=0$. $T(0)$ είναι ο κατακόρυφος χρόνος του σημείου χωροθέτησης, $T(x)$ είναι ο κατακόρυφος χρόνος του σημείου που θα χωροθετηθεί και x είναι η μεταξύ τους απόσταση.

Η ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων για την χωροθέτηση πριν την υπέρθεση (prestack migration) βρίσκεται σε όλο τον όγκο των δεδομένων. Για να προσδιορίσει την ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων που θα αθροιστεί στο σημείο χωροθέτησης χρησιμοποιεί όλη τη DSR εξίσωση. Όμως η ενέργεια των ανακλώμενων ακτίνων του σημείου χωροθέτησης βρίσκεται στην εφαπτομένη γραμμή της επιφάνειας, που ορίζεται από την DSR εξίσωση στο σημείο χωροθέτησης, με την απόκριση του ανακλαστήρα στον όγκο των δεδομένων. Αφού η εφαπτομένη γραμμή δεν είναι γνωστή, αθροίζεται όλη η ενέργεια της DSR εξίσωσης στο σημείο χωροθέτησης. Το άθροισμα της ενέργειας της εφαπτόμενης γραμμής θα είναι αρκετά μεγαλύτερο από κάθε πλάτος θορύβου που βρίσκεται στα άλλα σημεία της αθροιστικής επιφάνειας.

2.6.7 Χωροθέτηση σε σεισμική τομή σταθερού h

Η χωροθέτηση Kirchhoff πριν την υπέρθεση σε τομή σταθερού offset ορίζει ένα σημείο χωροθέτησης (x_{mig}, T_0) με V_{rms} και αθροίζει την ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων, που προέρχεται από το σημείο χωροθέτησης, στο σημείο χωροθέτησης (σχήμα 55). Η ενέργεια που θα χωροθετηθεί προσδιορίζεται από την DSR εξίσωση κρατώντας σταθερό τον όρο του h_c

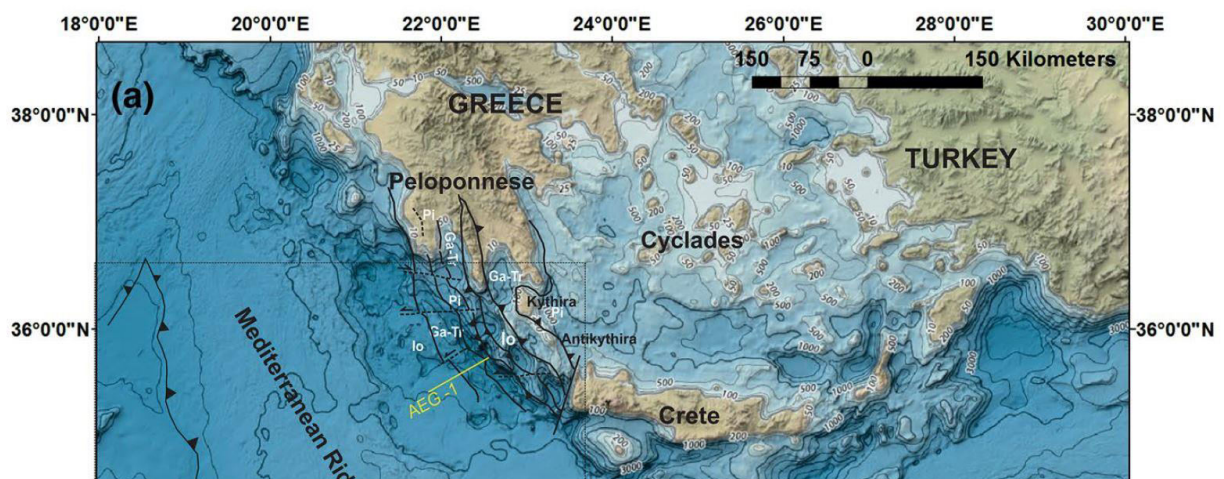
$$T = T_S + T_R = \sqrt{\frac{T_0^2}{4} + \frac{(x_{mig} - x_{mp} + h_c)^2}{V_{rms}^2}} + \sqrt{\frac{T_0^2}{4} + \frac{(x_{mig} - x_{mp} - h_c)^2}{V_{rms}^2}} \quad (88)$$

,όπου το x_{mig} είναι η επιφανειακή θέση του σημείου χωροθέτησης και T_0 είναι ο κατακόρυφος χρόνος διαδρομής του, x_{mp} είναι η επιφανειακή θέση του σημείου που θα χωροθετηθεί και V_{rms} είναι η μέση τετραγωνική ταχύτητα στο σημείο χωροθέτησης. Η μέση τετραγωνική ταχύτητα στο σημείο χωροθέτησης ορίζει την κλίση της περιθλαστικής καμπύλης σταθερού h. Μια τομή σταθερού h αποτελείται από λίγα ίχνη με αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται το αποτέλεσμα της χωροθέτησης. Τομές σταθερού h μπορούν να συνδυαστούν για να δημιουργήσουν δεδομένα διάταξης κυμαινόμενου h αλλά σταθερού εύρους τιμών h. Αυτά τα δεδομένα θεωρείται ότι αποτελούν τομές σταθερού h και μπορούν να χωροθετηθούν για να δημιουργήσουν μία παρόμοια τομή με την γεωλογική τομή. Το άθροισμα ή η υπέρθεση των χωροθετημένων τομών σταθερού h θα δημιουργήσει μια γεωλογική τομή με βελτιωμένο λόγο σήματος προς θόρυβο.

Κεφάλαιο 3^ο: Επεξεργασία δεδομένων της γραμμής AEG-1

3.1 Εισαγωγή

Η σεισμική γραμμή διασχίζει το δυτικό μέρος της Μεσογειακής ράχης και καταλήγει στην τάφρο του νότιου Ματαπάν. Αποτελεί τμήμα γραμμής που ξεκινάει από το θαλάσσιο χώρο νότια της Πελοποννήσου και δυτικά της Κρήτης και φθάνει μέχρι το νησί της Νάξου με μήκος 358 km. Η γραμμή έχει διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ και τα δεδομένα επεξεργασίας αντιστοιχούν στα πρώτα 80km της γραμμής περίπου. Η συλλογή των δεδομένων έγινε με οκτώ αεροβόλα χωρητικότητας 1425 in³ το καθένα, σε βάθος 20 m. Η ισαπόσταση των θέσεων των πηγών ήταν 50 m. Επεξεργάστηκαν ίχνη από 1617 θέσεις των πηγών. Το σεισμικό καλώδιο βρισκόταν σε βάθος 20m, είχε μήκος 2375 m και περιείχε 96 ομάδες υδροφώνων με ισαπόσταση 25 m. Το Η ελάχιστη απόσταση πηγής-πρώτου υδροφώνου ήταν 260 m και η μέγιστη στα 2635 m. Τα CMPs είναι 6560 με ισαπόσταση 12,5 m και η υπεδαφική κάλυψη (fold) είναι 24. Η διάρκεια της καταγραφής είναι 17 s και το διάστημα δειγματοληψίας 4 ms. Κατά την συλλογή των δεδομένων εφαρμόστηκε φίλτρο αποκοπής συχνοτήτων υψηλότερων από 77 Hz.

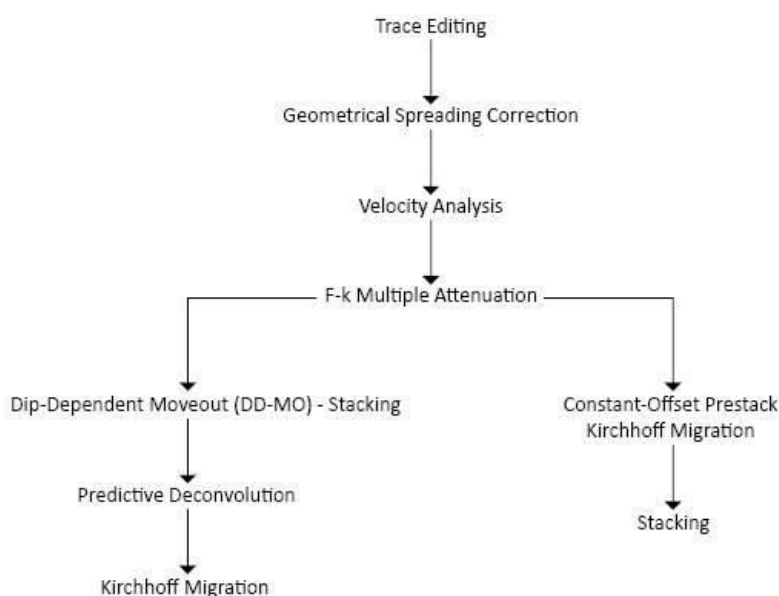


Σχήμα 59 Τοποθεσία της γραμμής μελέτης, όπου φαίνεται η θέση των Εξωτερικών Ελληνίδων (ζώνη της Πίνδου (Pi)), ζώνη Γαβρόβου-Τριπόλεως (Ga-Tr) και η Ιόνια ζώνη (Io)) σύμφωνα με τον Aubouin (1976). Οι διακεκομμένες γραμμές απεικονίζουν ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης (Nikolaos Andronikidis, Eleni Kokinou, Antonios Vafidis, Evangelos Kamberis, Emmanouil Manoutsoglou, 2017)

Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα ProMAX 2D και εκτελέστηκε με δύο διαγράμματα ροής. Το πρώτο αποσκοπεί στην χωροθέτηση Kirchhoff μετά την υπέρθεση και το δεύτερο στην χωροθέτηση Kirchhoff πριν την υπέρθεση. Η χωροθέτηση πριν την υπέρθεση είναι αρκετά χρονοβόρα διαδικασία αλλά προτιμάται επειδή συγκεντρώνει την ενέργεια των ανακλώμενων ακτίνων από κεκλιμένους ανακλαστήρες και των περιθλώμενων ακτίνων στην πραγματική τους θέση στο επίπεδο $h=0$. Η χωροθέτηση πριν την υπέρθεση πραγματοποιήθηκε στις τομές σταθερού h . Στις χωροθετημένες τομές η παρεμβολή των πολλαπλών ανακλάσεων στις κύριες ανακλάσεις ήταν αρκετά έντονη. Ιδιαίτερα προβλήματα δημιουργούσαν οι πολλαπλές ανακλάσεις του πυθμένα, που εμφανιζόντουσαν με έντονα πλάτη. Για να ενισχυθεί ο λόγος σήματος προς θόρυβο εφαρμόστηκαν τεχνικές για την εξασθένιση των πολλαπλών ανακλάσεων μεγάλης

περιόδου, κυρίως αυτών που σχετίζονται με το στρώμα νερού και των περιοδικών ανακλάσεων (πυθμένα).

Στο πρώτο στάδιο της επεξεργασίας έγινε η αποκοπή των απευθείας κυμάτων και η διαγραφή των καναλιών με υψηλά επίπεδα θορύβου στα δεδομένα διάταξης κοινής πηγής. Μετά ακολούθησε διόρθωση για την γεωμετρική διασπορά για να ενισχυθούν τα πλάτη των ανακλάσεων. Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκε η ανάλυση ταχυτήτων σε επιλεγμένα CMPs για τον προσδιορισμό της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας και του μοντέλου ταχύτητας. Στο επόμενο στάδιο εφαρμόστηκε φίλτρο f-k για την εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων μεγάλης περιόδου.



Σχήμα 60 Διάγραμμα ροής

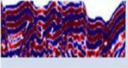
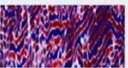
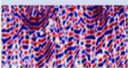
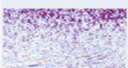

Στη συνέχεια στο πρώτο κλάδο του διαγράμματος ροής εφαρμόστηκε η μέθοδος υπέρθεσης σταθερής ταχύτητας και εφαρμογής φίλτρων κλίσης. Η τεχνική βελτιώνει την συγκέντρωση της ενέργειας των περιθλώμενων ακτίνων και των ανακλώμενων ακτίνων από κεκλιμένους ανακλαστήρες στο επίπεδο $h=0$ (Dip-dependent moveout correction (DD-MO) - Stacking). Επίσης εφαρμόστηκε δυναμική διόρθωση στα ίχνη διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου και η υπέρθεση τους για να συγκριθούν οι δύο τομές υπέρθεσης. Στο επόμενο στάδιο εφαρμόστηκε αποσυνέλιξη πρόβλεψης για την εξασθένηση της απομένουσας ενέργειας των πολλαπλών ανακλάσεων στην τομή υπέρθεσης. Στο τελευταίο στάδιο του πρώτου κλάδου του διαγράμματος ροής χωροθετήθηκε κατά Kirchhoff η τομή υπέρθεσης με το αρχείο των μέσων τετραγωνικών ταχυτήτων από την ανάλυση. Στο δεύτερο κλάδο του διαγράμματος ροής μετά την εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων με το φίλτρο f-k εφαρμόστηκε χωροθέτηση Kirchhoff στις τομές σταθερού ηπριν την υπέρθεση τους στο επίπεδο $h=0$.

3.2 Γεωλογία περιοχής μελέτης

Η γραμμή μελέτης βρίσκεται στο νότιο Ιόνιο και ξεκινάει από το δυτικό άκρο της Μεσογειακής Ράχης και καταλήγει στην Τάφρο του Ματαπάν. Η περιοχή αποτελείται από τμήμα του εξωτερικού ηπειρωτικού φλοιού του Ελληνικού Τόξου και περιλαμβάνει τμήματα της Ελληνικής Τάφρου, με τα μεγαλύτερα βάθη της Μεσογείου, όπως η τάφρος του Ματαπάν (4500m), και χαρακτηρίζεται από έντονο υποθαλάσσιο ανάγλυφο.

Στην περιοχή εμφανίζονται η ζώνη της Πίνδου (Pi), η ζώνη Γαβρόβου-Τριπόλεως (Ga-Tr) και η Ιόνια ζώνη (Io) των Εξωτερικών Ελληνίδων και το τεκτονικό κάλυμμα της Φυλλιτικής Χαλαζιτικής σειράς. Στο σχήμα 61, παρουσιάζονται οι χρονοστρωματογραφικές/λιθοστρωματογραφικές ενότητες της γραμμής μελέτης με τα χαρακτηριστικά κάθε ενότητας βάσει της ανάκλασης των σεισμικών κυμάτων στις διαχωριστικές επιφάνειες των λιθολογικών ασυνεχειών και της ταχύτητας κάθε ενότητας.

Η πρώτη ενότητα περιλαμβάνει ιζήματα του Πλειόκαινου-Τεταρτογενούς. Η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων κυμαίνεται από 1700 m/s έως 3300 m/s. Η ενότητα χαρακτηρίζεται από συνεχείς κυματοειδείς ανακλάσεις με έντονα πλάτη. Αποτελείται από λεπτούς οριζόντες με έντονες τοπογραφικές ανωμαλίες, που οφείλονται στον διαπειρισμό των υποκείμενων εβαποριτών, και από περιοχές με λασποηφαίστεια (mudvolcanoes). Η δεύτερη ενότητα περιλαμβάνει τους Μεσσήνιους εβαπορίτες. Η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων κυμαίνεται από 3400 m/s έως 4200 m/s. Η ενότητα χαρακτηρίζεται από ασυνεχείς ανακλάσεις μέτριου πλάτους με σπάνιες έντονες ανακλάσεις. Η τρίτη ενότητα περιλαμβάνει ιζήματα προΜεσσήνιας ηλικίας. Η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων κυμαίνεται από 4300 m/s έως 5100 m/s. Η ενότητα χαρακτηρίζεται από διακεκομμένες, οριζόντιες και κυματοειδείς ανακλάσεις με μέτρια πλάτη. Η τέταρτη ενότητα περιλαμβάνει την Μεσοζωική ακολουθία των εξωτερικών Ελληνίδων. Η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων κυμαίνεται από 5200 m/s έως 6000 m/s. Το ανώτερο τμήμα της ακολουθίας χαρακτηρίζεται από υποπαράλληλες και ανά τμήματα συνεχείς ανακλάσεις με υψηλά πλάτη. Το κατώτερο τμήμα εμφανίζει ασθενείς και ημισυνεχείς ανακλάσεις που οφείλονται στους Τριαδικούς εβαπορίτες. Επίσης η ενότητα περιλαμβάνει τις μεσοζωικές ακολουθίες των ανθρακικών ιζηματογενών πετρωμάτων της ζώνης Γαβρόβου-Τριπόλεως, της Ιόνιας ζώνης και της ζώνης Παξών. Η πέμπτη ενότητα περιλαμβάνει την Φυλλιτική Χαλαζιτική σειρά. Η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων κυμαίνεται από 6100 m/s έως 6400 m/s. Η ενότητα χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλά ακουστική εμπέδηση και εμφανίζει κεκλιμένες ασυνεχείς ανακλάσεις.

Seismic example	Seismic unit	Reflection character	Thickness in TWT (sec)	Velocity (km/s)	Stratigraphy (according to references in Figure caption)
	Unit 1	Wavy, continuous to semi continuous, high amplitude reflections	0.25	1.7-3.3	Sediments of Pliocene to Quaternary age
	Unit 2	Discontinuous, chaotic, generally medium amplitude reflections. Occurrence of internal high amplitude reflections	0.67	3.4-4.2	Messinian evaporites
	Unit 3	Discontinuous, lateral parallel medium to low amplitude reflections	0.62	4.3-5.1	Pre-Messinian sediments (Miocene and Flysch?)
	Unit 4	Sub-parallel, locally (continuous and high amplitude reflections at the top. Semi continuous and low amplitude below	2.1	5.2-6.0	Mesozoic sequence of External Hellenides
	Unit 5	Dipping discontinuous, acoustically transparent reflections	7.82-9	6.1-6.4	Phyllites-Quarzites series

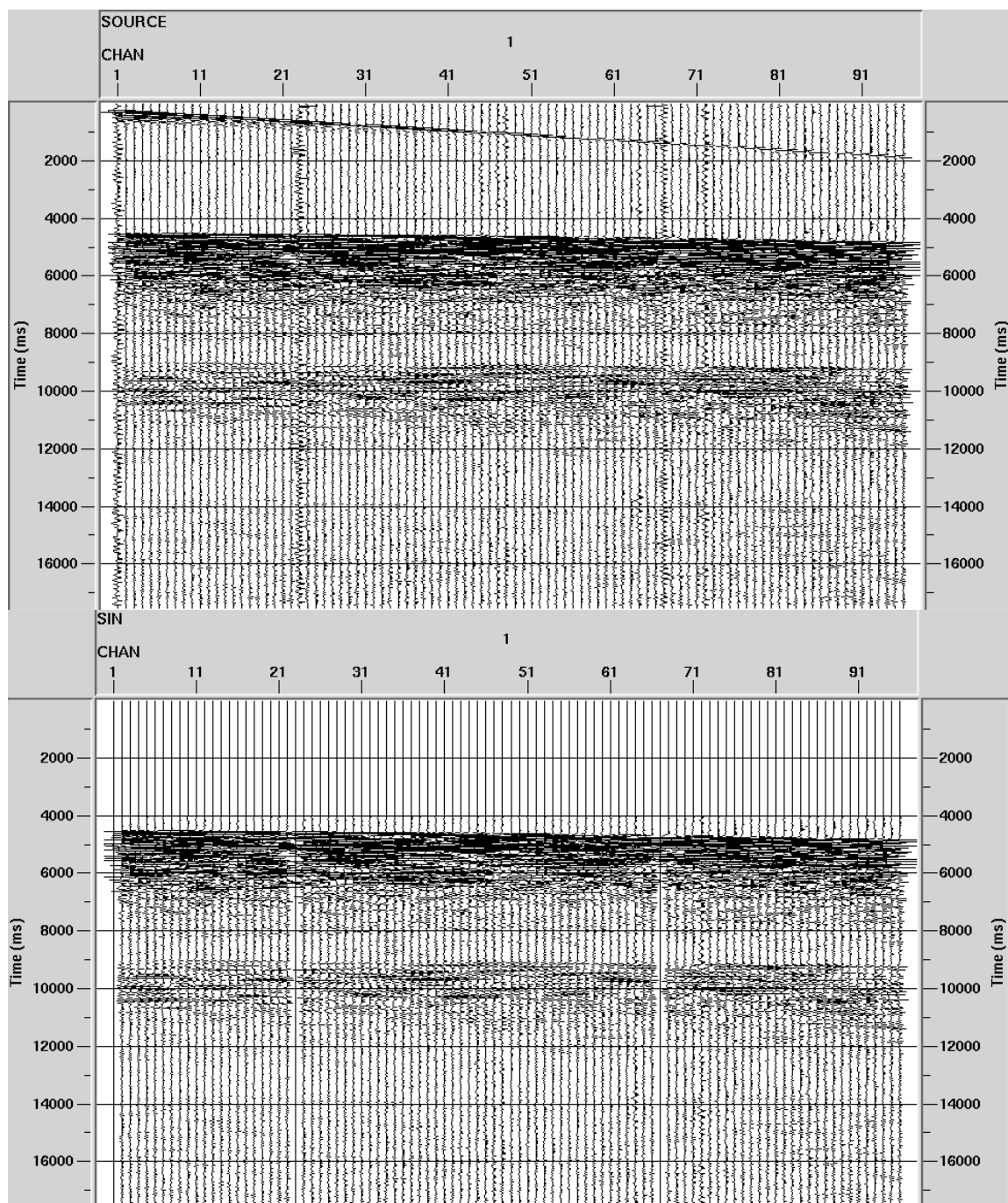
Σχήμα 61 Στρωματογραφικές ενότητες της γραμμής μελέτης και τα χαρακτηριστικά των ανακλάσεων τους. Η ερμηνεία βασίζεται στους Lallement et al., 1994, Chaumillon and Mascle, 1997, Bohnhoff et al. 2001, Le Pichon et al., 2002, Jones et al., 2002, Fruehn et al., 2002, Kokinou et al., 2005, Kokinou and Kamberis, 2009, Makris and Papoulia, 2014. (Nikolaos Andronikidis, Eleni Kokinou, Antonios Vafidis, Evangelos Kamberis, Emmanouil Manoutsoglou, 2017)

3.3 Πρώτο διάγραμμα ροής

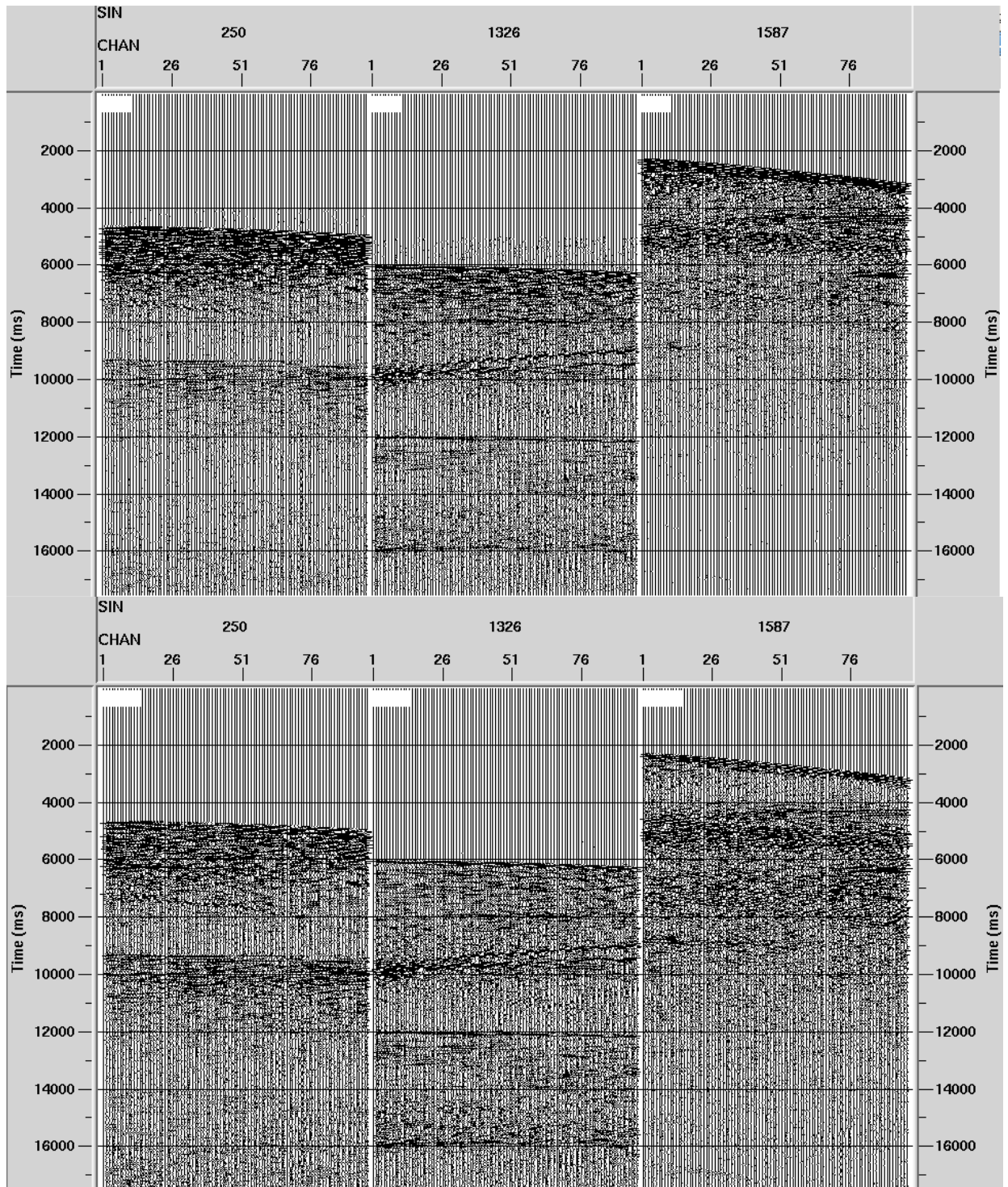
3.3.1 Αποκοπή πρώτων αφίξεων -διαγραφή των καναλιών θορύβου και διόρθωση γεωμετρικής διασποράς

Κάποια κανάλια δεν περιέχουν σήμα, εξαιτίας της δυσλειτουργίας των ηλεκτρονικών συστημάτων, ή υψηλού επίπεδου θορύβου. Αυτά τα κανάλια πρέπει να αφαιρεθούν, επειδή θα δημιουργήσουν προβλήματα στην μετέπειτα επεξεργασία. Τα κανάλια θορύβου, που αφαιρέθηκαν με την εντολή TraceKill/Reverse, ήταν τα 1,23 και 67 από τα ίχνη διάταξης κοινής πηγής. Επίσης, οι πρώτες αφίξεις στους δέκτες δεν είναι τα ανακλώμενα κύματα αλλά τα απευθείας κύματα. Έχουν μεγάλα πλάτη και αποτελούν σημαντική πηγή συναφή θορύβου. Τα ίχνη διάταξης κοινής πηγής χωρίστηκαν σε ομάδες και προσδιορίστηκε χρονικό παράθυρο αποκοπής των απευθείας κυμάτων συνάρτηση του h με την επιλογή Top mute και η αποκοπή τους έγινε με την εντολή Trace Muting. Στο σχήμα 62, παρουσιάζονται ίχνη διάταξης κοινής πηγής πριν και μετά την αφαίρεση των καναλιών θορύβου και την αποκοπή των απευθείας κυμάτων.

Στη συνέχεια έγινε διόρθωση για την γεωμετρική διασπορά. Σκοπός της διόρθωσης είναι η ενίσχυση πλάτων των ανακλώμενων κυμάτων. Η διόρθωση για την γεωμετρική διασπορά έγινε με την εντολή TrueAmplitude recovery θεωρώντας ότι τα πλάτη των κυμάτων εξασθενούν με την απόσταση. Στο σχήμα 63, παρουσιάζονται τα ίχνη διάταξης κοινής πηγής πριν και μετά την γεωμετρική διόρθωση. Παρατηρείται ότι έκτος από τις κύριες ανακλάσεις έχουν ενισχυθεί και ουσιαστικά ανακλάσεις.



Σχήμα 62 Ήχνη διάταξης κοινής πηγής πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) από την αφαίρεση των καναλιών θορύβου και την αποκοπή των απευθείας κυμάτων

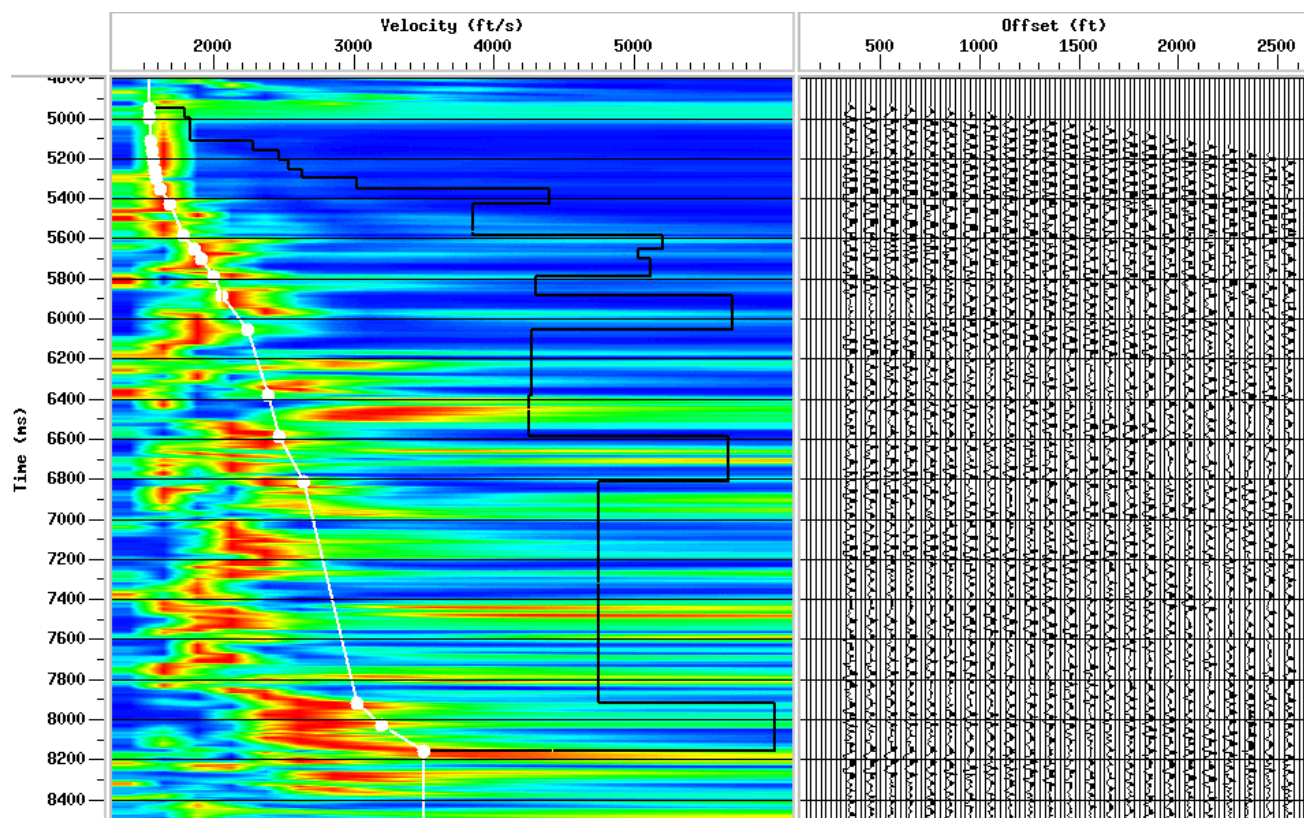


Σχήμα 63 Ίχνη διάταξης κοινής πηγήςπριν (πάνω) και μετά (κάτω) από την διόρθωση της γεωμετρικής διασποράς

3.3.2 Ανάλυση ταχυτήτων

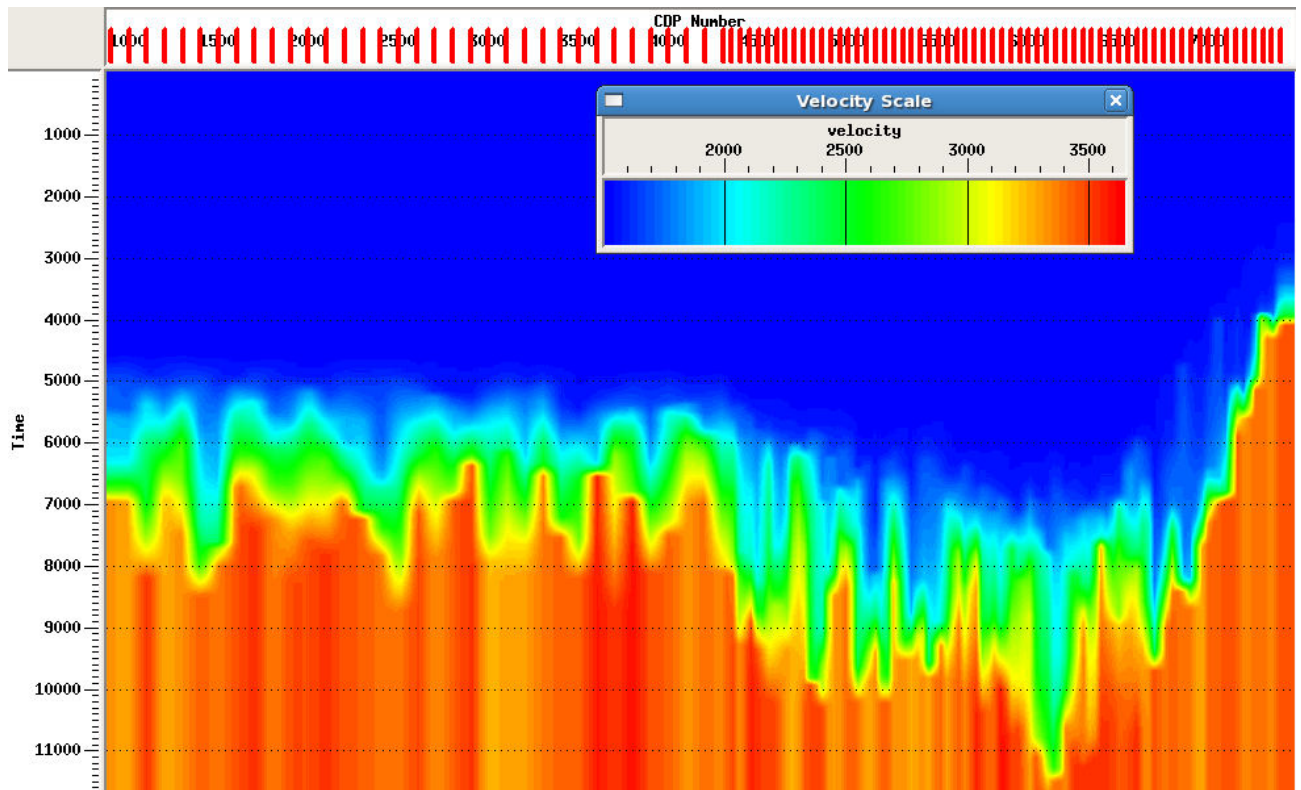
Η ανάλυση ταχυτήτων πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο συνάφειας του σήματος για να προσδιοριστούν η μέση τετραγωνική ταχύτητα και ο διπλός κατακόρυφος χρόνος που αντιστοιχούν στην μέγιστη συνάφεια του σήματος ,στο φάσμα ταχυτήτων επιλεγμένων

CMPs. Τα ζευγάρια των $V_{rms}, t(0)$ αποτελούν την συνάρτηση ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκε στην δυναμική διόρθωση, στη δημιουργία του μοντέλου ταχυτήτων και στην χωροθέτηση. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με την εντολή VelocityAnalysis. Από το CMP 900 μέχρι το 4300 έγινε ανά 100 CMPs και από το CMP 4350 μέχρι το 7450 έγινε ανά 50 CMPs. Στα CMPs που δεν έγινε η ανάλυση ταχυτήτων εφαρμόζεται η διαδικασία της παρεμβολής για να προκύψει η συνάρτηση της ταχύτητας τους.

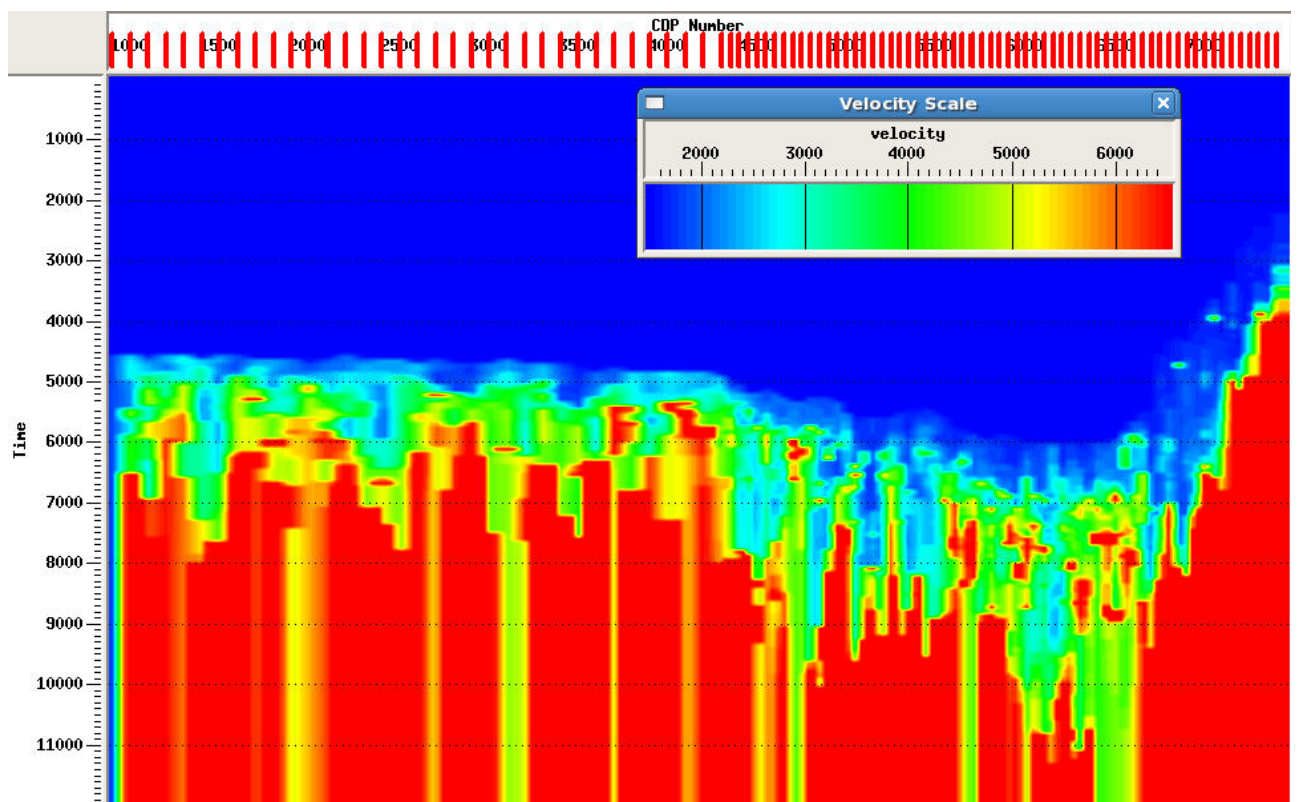


Σχήμα 64 Φάσμα συνάφειας (αριστερά) του CMP 4350 (δεξιά).

Στο σχήμα 64, παρουσιάζεται το φάσμα συνάφειας για το CMPgather (δεξιά). Στον οριζόντιο άξονα του φάσματος είναι οι τιμές της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας και στον κατακόρυφο άξονα ο διπλός κατακόρυφος χρόνος. Το μπλε της χρωματικής κλίμακας αντιστοιχεί σε χαμηλές τιμές συνάφειας και το κόκκινο σε υψηλές τιμές. Η άσπρη γραμμή αποτελεί την συνάρτηση ταχύτητας που προσδιορίστηκε για το CMP. Η ελάχιστη V_{rms} που επιλέχθηκε είναι 1500 m/s, η οποία αντιστοιχεί στην σεισμική ταχύτητα του πρώτου στρώματος, δηλαδή του νερού. Η υψηλότερη τιμή ταχύτητας που επιλέχθηκε είναι 3700 m/s. Κατά την επιλογή η μέση τετραγωνική ταχύτητα πρέπει να αυξάνεται με τον διπλό κατακόρυφο χρόνο. Ισχύει ότι οι πολλαπλές ανακλάσεις μεγάλης περιόδου εμφανίζουν μέγιστη συνάφεια σε διπλάσιους διπλούς κατακόρυφους χρόνους σε σχέση με τις αντίστοιχες κύριες ανακλάσεις. Επίσης οι πολλαπλές ανακλάσεις παρουσιάζουν μικρότερη ταχύτητα από τις κύριες. Στο σχήμα 65, με την εντολή VelocityViewer/PointEditor παρουσιάζεται το πεδίο της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας για όλα τα CMPs (896-7455). Με την εντολή VelocityManipulation προσδιορίστηκαν οι τμηματικές ταχύτητες με την εξίσωση του Dix. Στο σχήμα 66, παρουσιάζεται το μοντέλο ταχυτήτων. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί σε τιμές ταχύτητας από 1500 m/s μέχρι 6500 m/s.



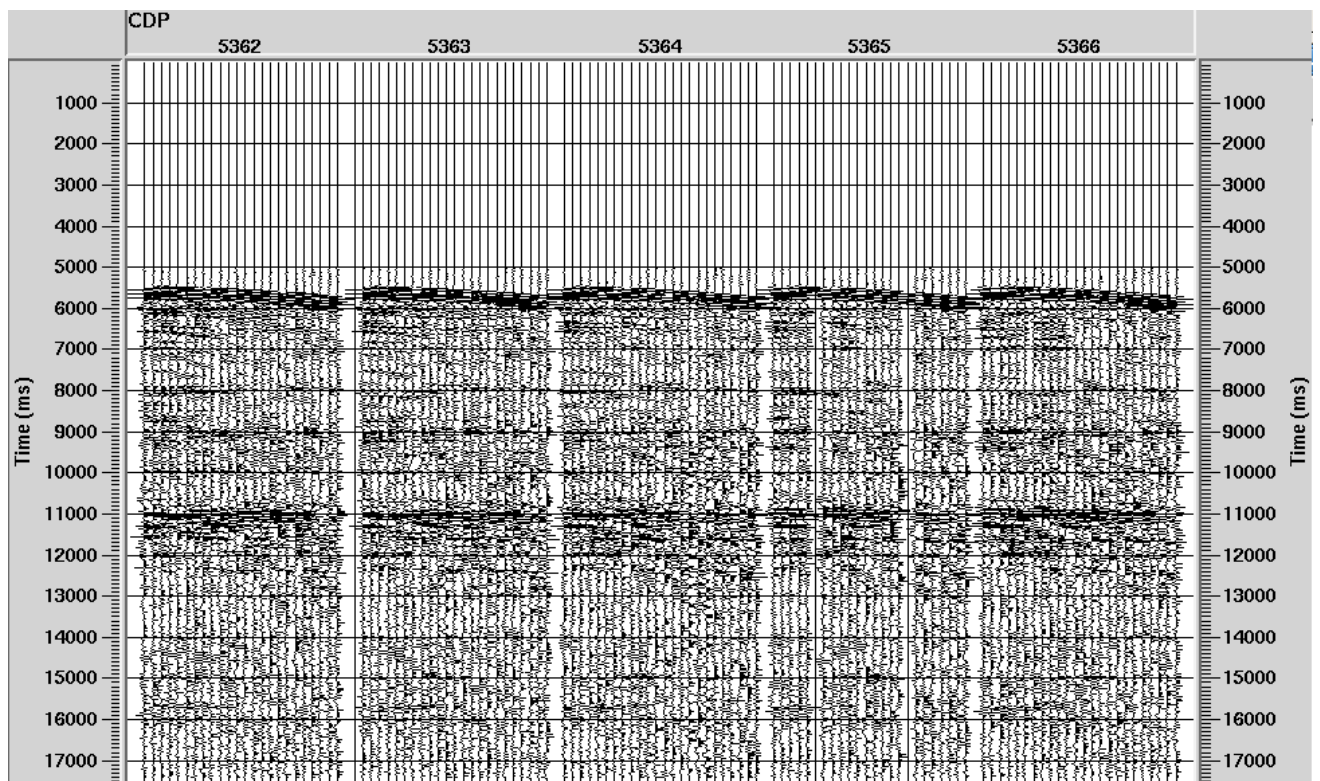
Σχήμα 65 Πεδίο της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας. Στον κατακόρυφο άξονα είναι ο διπλός κατακόρυφος χρόνος και στον οριζόντιο οι θέσεις των CMPs(898-7455).



Σχήμα 66 Μοντέλο τμηματικής ταχύτητας. Στον κατακόρυφο άξονα είναι ο διπλός κατακόρυφος χρόνος και στον οριζόντιο οι θέσεις των CMPs(898-7455).

3.3.3 Φίλτροf-kγια την εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων

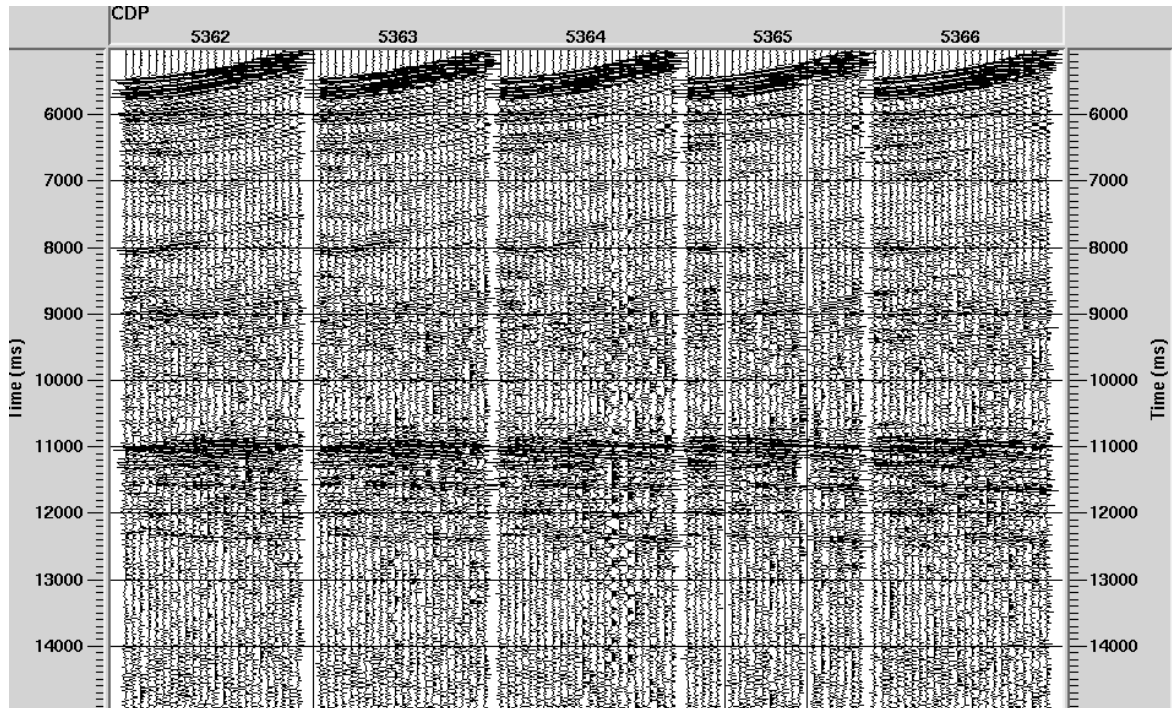
Το φίλτρο f-k εφαρμόστηκε στα ίχνη διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου για την εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων μεγάλης περιόδου. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη εξής βήματα. Στο πρώτο βήμα εφαρμόζεται δυναμική διόρθωση στα ίχνη διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου με συνάρτηση ταχύτητας που είναι μικρότερη για τα γεγονότα των κύριων ανακλάσεων και μεγαλύτερη για τα γεγονότα των πολλαπλών ανακλάσεων. Στη συνέχεια σχεδιάζεται φίλτρο αποκοπής των συνιστωσών των πολλαπλών ανακλάσεων στο φάσμα f-k των ιχνών διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου. Το φίλτρο αποκόπτει τις συνιστώσες των πολλαπλών ανακλάσεων, οι οποίες αντιστοιχούν σε θετικούς κυματαριθμούς, επειδή τα γεγονότα των πολλαπλών ανακλάσεων δεν είναι επαρκώς διορθωμένα. Τα γεγονότα των κύριων ανακλάσεων δεν είναι σωστά διορθωμένα(overcorrected), με αποτέλεσμα οι συνιστώσες τους να αντιστοιχούν σε αρνητικούς κυματαριθμούς στο φάσμα και να μην αποκόπτονται από το φίλτρο. Μετά ακολουθεί η εφαρμογή του φίλτρου. Στη συνέχεια τα ίχνη διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου από τον χώρο των συχνοτήτων (f-k) μετασχηματίζονται πίσω στο πεδίο του χώρου και του χρόνου (x-t). Τέλος, εφαρμόζεται η αντίθετη δυναμική διόρθωση με την συνάρτηση ταχύτητας του πρώτου βήματος.



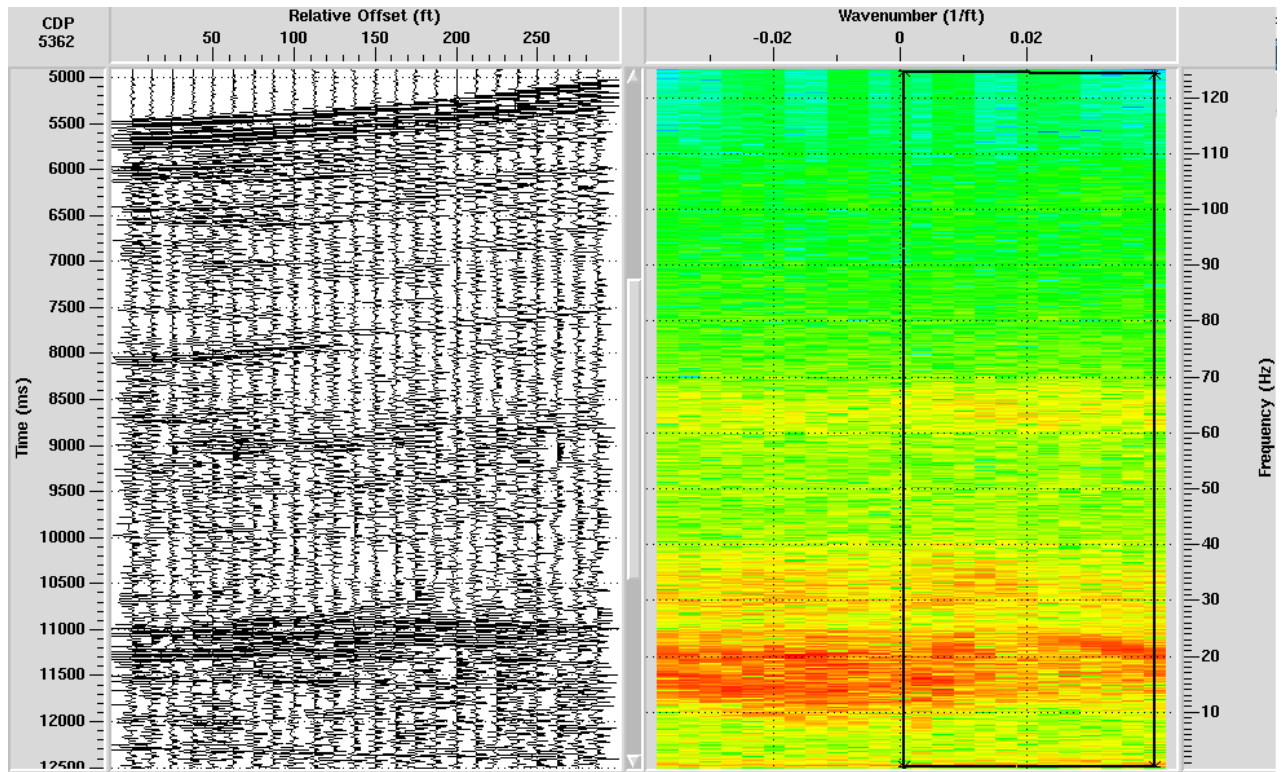
Σχήμα 67 CMPgathers 5362-5366. Οι πολλαπλές ανακλάσεις εμφανίζονται σε χρόνους μεγαλύτερους των 11s.

Τα CMPs χωρίστηκαν σε 25 ομάδες ανάλογα με τον χρόνο διαδρομής των γεγονότων των πολλαπλών ανακλάσεων και εφαρμόστηκε η παραπάνω διαδικασία σε κάθε ομάδα με τις εντολές VelocityManipulation ,NormalmoveoutCorrection, F-KAnalysis και F-KFilter. Στο σχήμα 67, παρουσιάζονται CMPs, στα οποία οι πολλαπλές ανακλάσεις εμφανίζονται σε χρόνους μεγαλύτερους των 11 s. Στο σχήμα 68, εμφανίζονται τα ίχνη διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου μετά την δυναμική τους διόρθωση με συνάρτηση ταχύτητας στο 50%

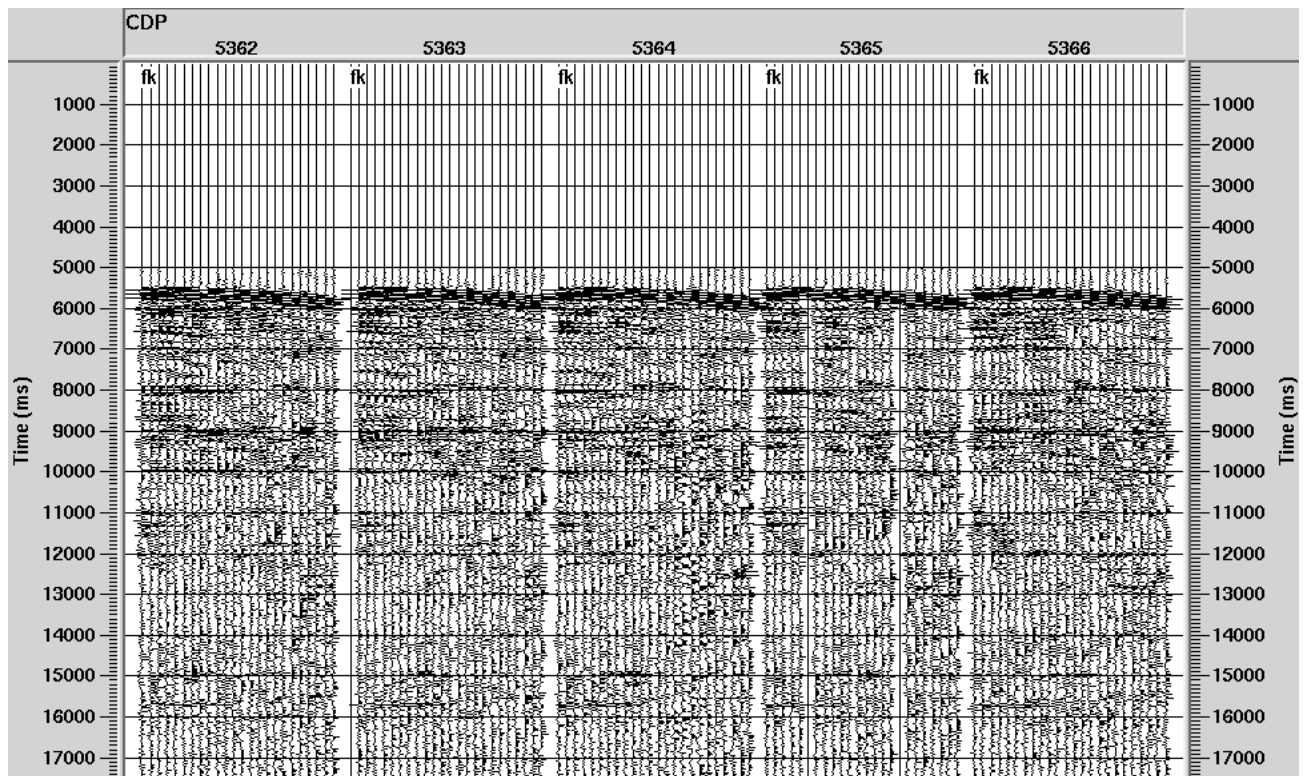
για κατακόρυφους χρόνους μικρότερους των 10,5 s και στο 150% για κατακόρυφους χρόνους μεγαλύτερους των 10,5 s. Στο σχήμα 69, παρουσιάζεται το φάσμα f-k για ίχνη διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου και το φίλτρο αποκοπής των συνιστωσών των πολλαπλών ανακλάσεων με θετικούς κυματαριθμούς. Στο σχήμα 70, εμφανίζονται τα ίχνη διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου μετά την εφαρμογή του φίλτρου και μετά την αντίθετη δυναμική διόρθωση με την άνω τροποποιημένη συνάρτηση ταχύτητας. Παρατηρείται ότι η ενέργεια των πολλαπλών ανακλάσεων έχει εξασθενήσει.



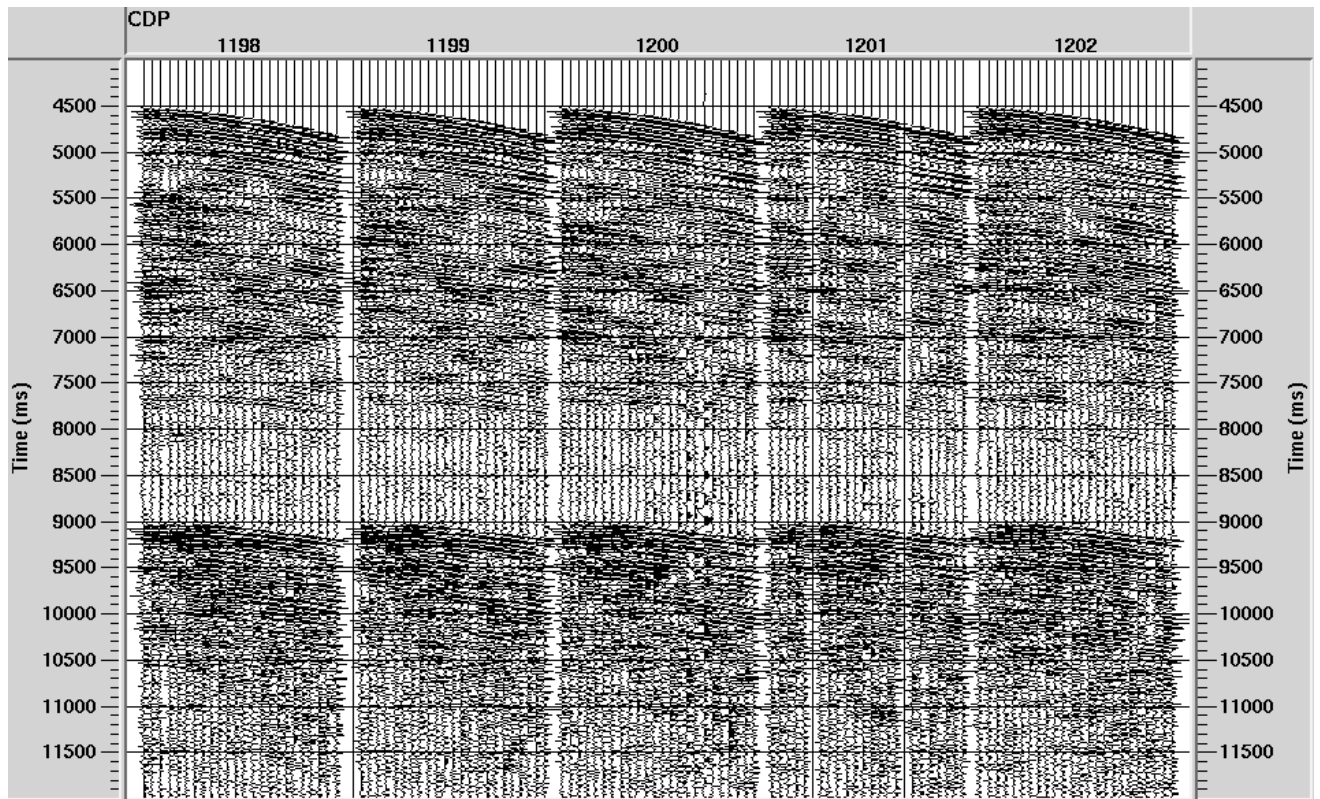
Σχήμα 68 Τα ίχνη διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου μετά την δυναμική τους διόρθωση με τροποποιημένη συνάρτηση ταχύτητας



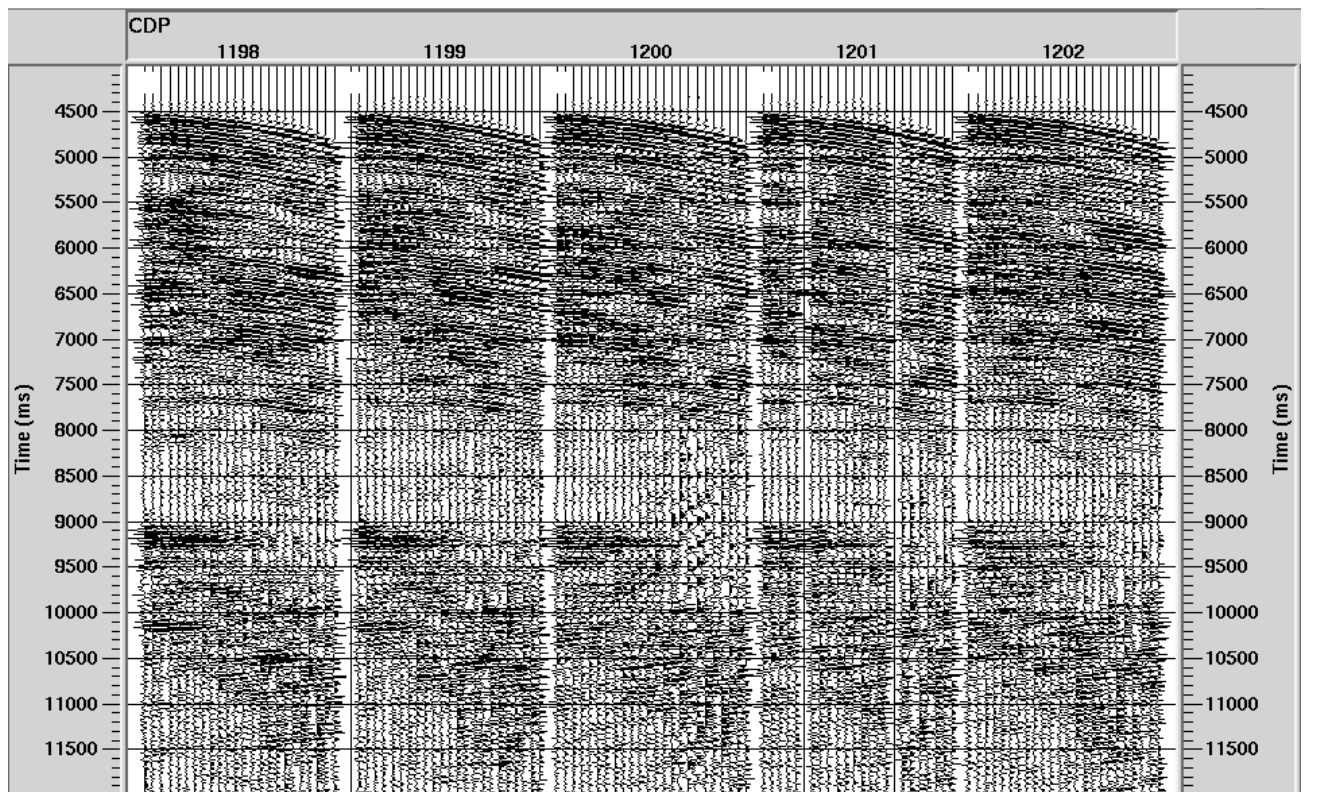
Σχήμα 69 Φάσμα f - k (δεξιά) και το φίλτρο αποκοπής των συνιστωσών των πολλαπλών ανακλάσεων του CMP5362 (αριστερά).



Σχήμα 70 Ήχη διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου για CMPs 5362-5366 μετά την εφαρμογή της διαδικασίας του φίλτρου f - k για την εξασθένιση των πολλαπλών ανακλάσεων



Σχήμα 71 CMP gathers 6082-5086 πριν την εφαρμογή της διαδικασίας του φίλτρου f -κ για την εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων



Σχήμα 72 Ίχνη διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου για CMPs 6082-5086 μετά την εφαρμογή της διαδικασίας του φίλτρου f -κ για την εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων

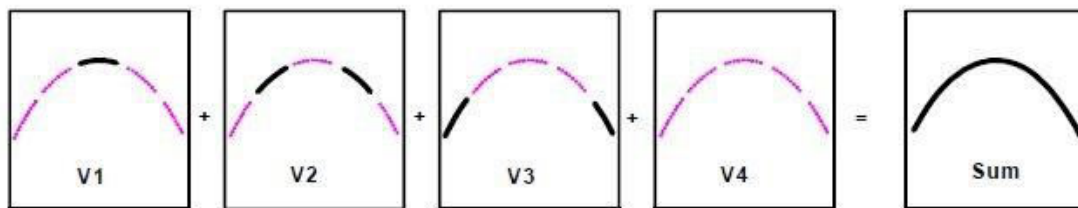
3.3.4 Δυναμική διόρθωση και υπέρθεση

Η δυναμική διόρθωση εφαρμόζεται στα ίχνη διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου με σκοπό την αναγωγή των διπλών χρόνων διαδρομής, TWT, των ανακλώμενων ακτίνων σε κατακόρυφους χρόνους, $t(0)$, ώστε να ευθυγραμμιστούν τα πλάτη τους πριν την υπέρθεση τους στο επίπεδο $h=0$. Η δυναμική διόρθωση με V_{rms} ανάγει τους TWT των ανακλώμενων ακτίνων σε $t(0)$ από οριζόντια διαχωριστική επιφάνεια. Οι TWT των ανακλώμενων ακτίνων από κεκλιμένη διαχωριστική επιφάνεια περιγράφονται από την εξίσωση της δυναμικής διόρθωσης με την ταχύτητα V_{stk} , η οποία ισούται με τον λόγο της V_{rms} προς το συνημίτονο της κλίσης του κεκλιμένου ανακλαστήρα. Η V_{stk} δίνεται από την σχέση

$$V_{stk} = \frac{V_{rms}}{\cos\beta} = \frac{V_{rms}}{\sqrt{1 - \sin^2\beta}} = \frac{V_{rms}}{\sqrt{1 - \tan^2\alpha}}$$

, όπου β είναι η κλίση του ανακλαστήρα, α είναι η φαινόμενη κλίση του ανακλαστήρα στο επίπεδο $h=0$ (σχήμα 30). Η φαινόμενη κλίση του ανακλαστήρα σχετίζεται με την κλίση του ανακλαστήρα σύμφωνα με την σχέση $\tan(\alpha)=\sin(\beta)$.

Για την δυναμική διόρθωση των ιχνών διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου χρησιμοποιήθηκαν οι V_{rms} από την ανάλυση των ταχυτήτων και ακολούθησε η υπέρθεση τους, με τις εντολές NormalMoveoutCorrection και CDP/EnsembleStack. Η τελική τομή υπέρθεσης προέκυψε από την μέθοδο υπέρθεσης σταθερής ταχύτητας και εφαρμογής φίλτρων κλίσης (Jakubowicz, 1984) με την εντολή Dip Decomposition DMO. Η μέθοδος εφαρμόζει δυναμική διόρθωση στα ίχνη διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου με ταχύτητα V_{stk} για ένα εύρος γωνιών α και αθροίζει τα ίχνη τους. Αυτές οι τομές ονομάζονται τομές υπέρθεσης σταθερής ταχύτητας. Σε κάθε τομή υπέρθεσης σταθερής ταχύτητας εφαρμόζεται φίλτρο για να αποκοπεί η ενέργεια που δεν ευθυγραμμίζεται σύμφωνα με την κλίση α . Μόνο η ενέργεια που συμφωνεί με την V_{stk} και με την κλίση α θα παραμείνει στην τομή υπέρθεσης σταθερής ταχύτητας. Στο τέλος αθροίζονται όλες οι φιλτραρισμένες τομές υπέρθεσης σταθερής ταχύτητας και προκύπτει μια τομή υπέρθεσης, στην οποία η ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων και των ανακλώμενων ακτίνων έχει συγκεντρωθεί στο επίπεδο $h=0$ αποτελεσματικότερα από ότι η τομή υπέρθεσης με τις V_{rms} .

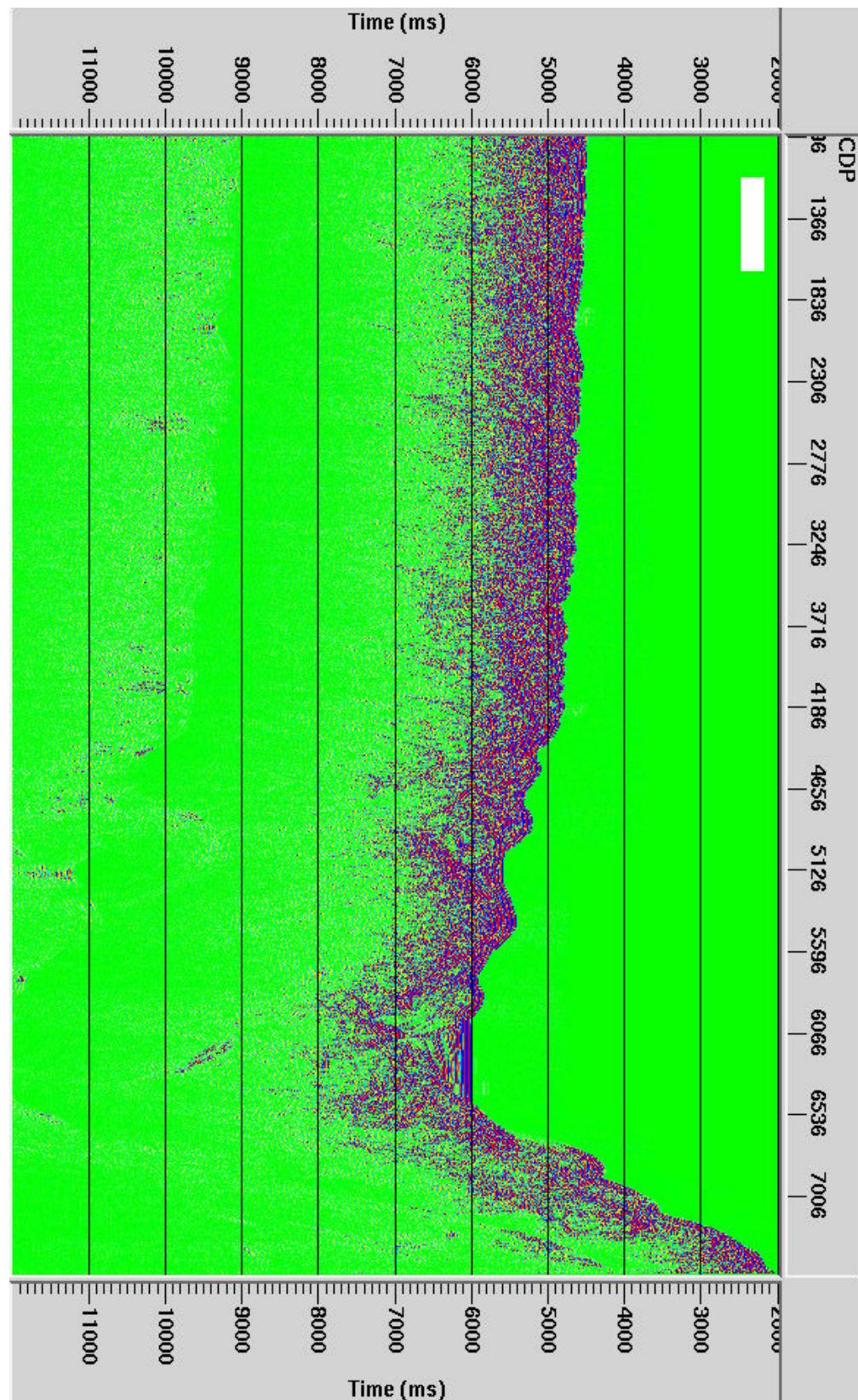


Σχήμα 73 Άθροισμα τομών υπέρθεσης σταθερής ταχύτητας με φίλτρα κλίσης. Το σήμα (η ευθυγραμμισμένη ενέργεια σύμφωνα με την κλίση α αντιστοιχεί στις μαύρες γραμμές. (John C. Bancroft, 2001)

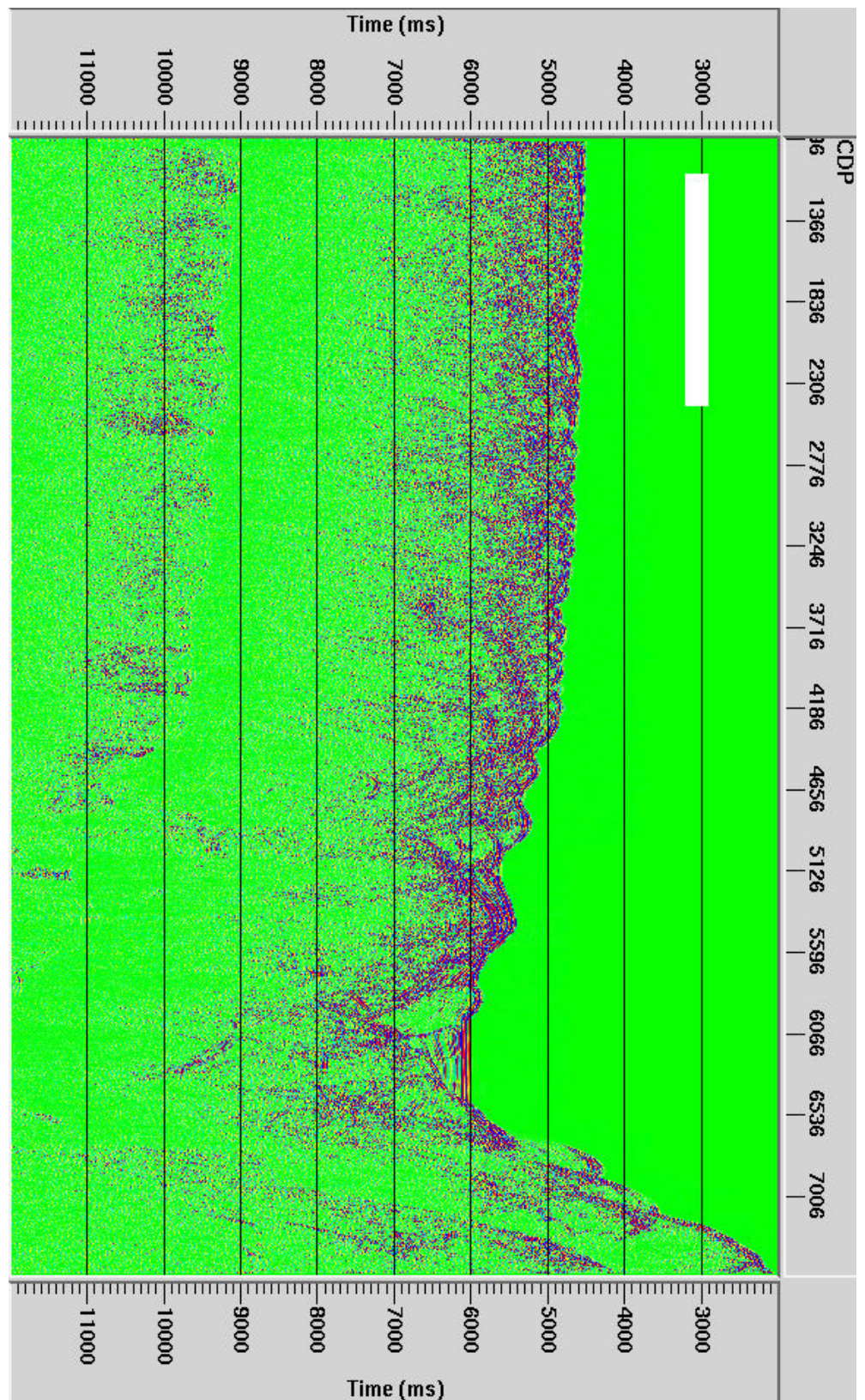
Στο σήμα 74, παρουσιάζεται η τομή υπέρθεσης με V_{rms} χωρίς διόρθωση για την γεωμετρική διασπορά. Στο σχήμα 75, παρουσιάζεται η τομή υπέρθεσης με V_{rms} και διόρθωση για την γεωμετρική διασπορά. Στο σχήμα 76, παρουσιάζεται η τομή υπέρθεσης με την μέθοδο υπέρθεσης σταθερής ταχύτητας και εφαρμογής φίλτρων κλίσης και διόρθωση για την γεωμετρική διασπορά. Παρατηρείται ότι η ενέργεια των περιθλαστικών καμπύλων έχει αυξηθεί. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει συγκρίνοντας το σχήμα 78 με το σχήμα 79. Στο σχήμα 77, παρουσιάζεται η τομή υπέρθεσης με την μέθοδο υπέρθεσης σταθερής ταχύτητας

και εφαρμογής φίλτρων κλίσης, διόρθωση για την γεωμετρική διασπορά και την διαδικασία εξασθένησης των πολλαπλών ανακλάσεων με το φίλτρο f-k.

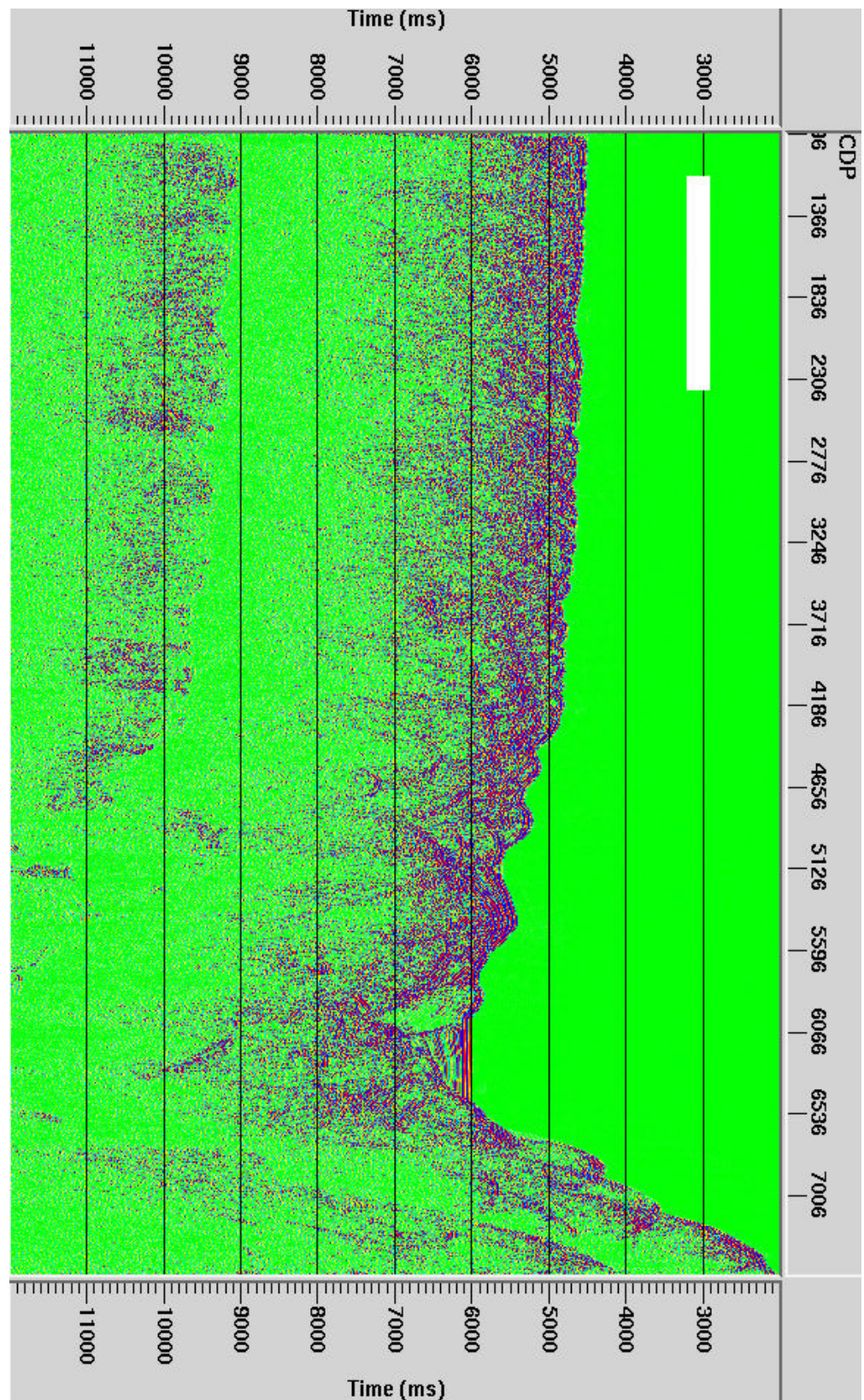
Σχήμα 74 Τομή υπέρθεσης χωρίς διόρθωση για την γεωμετρική διασπορά



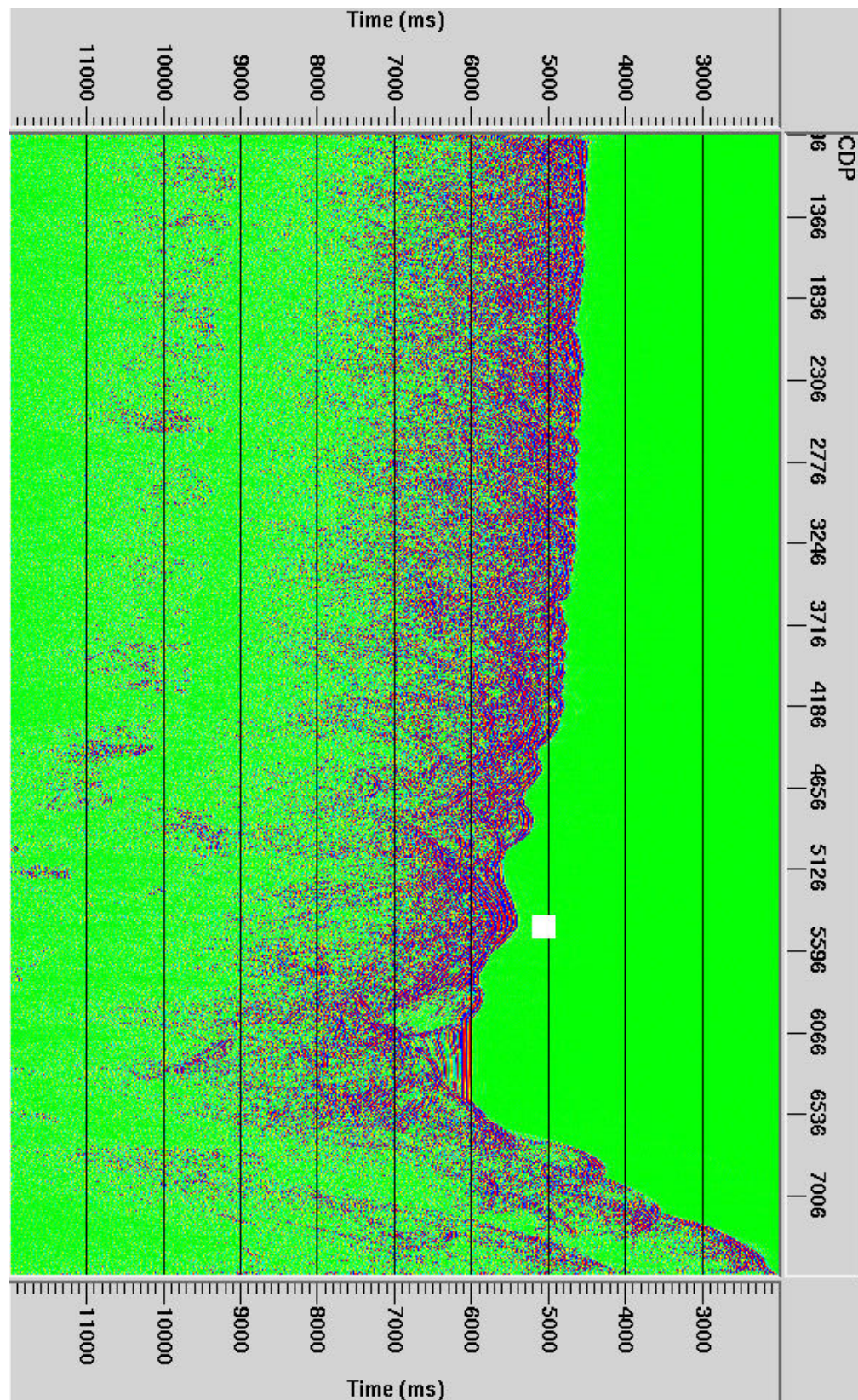
Σχήμα 75 Τομή υπέρθεσης με διόρθωση για την γεωμετρική διασπορά

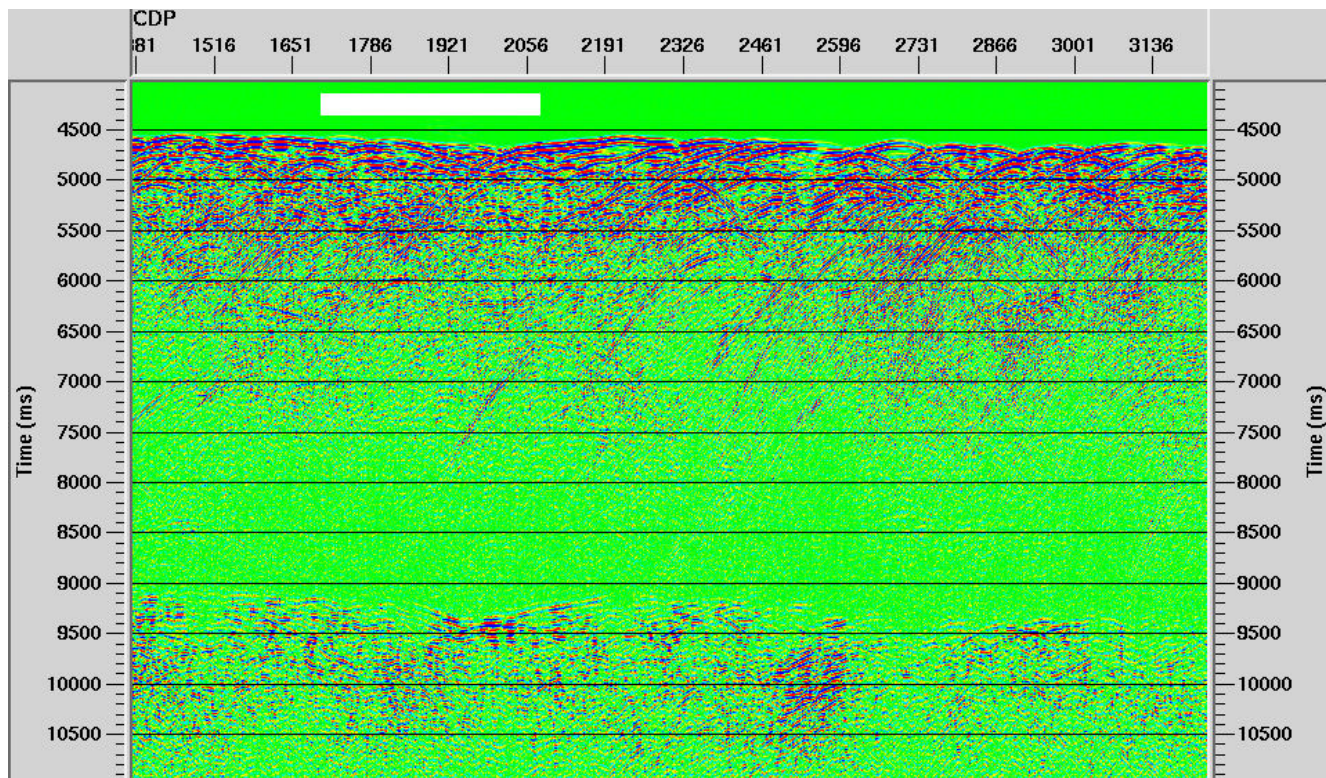


Σχήμα 76 Τομή υπέρθεσης με την μέθοδο υπέρθεσης σταθερής ταχύτητας και εφαρμογής φίλτρων κλίσης και διόρθωση για την γεωμετρική διασπορά

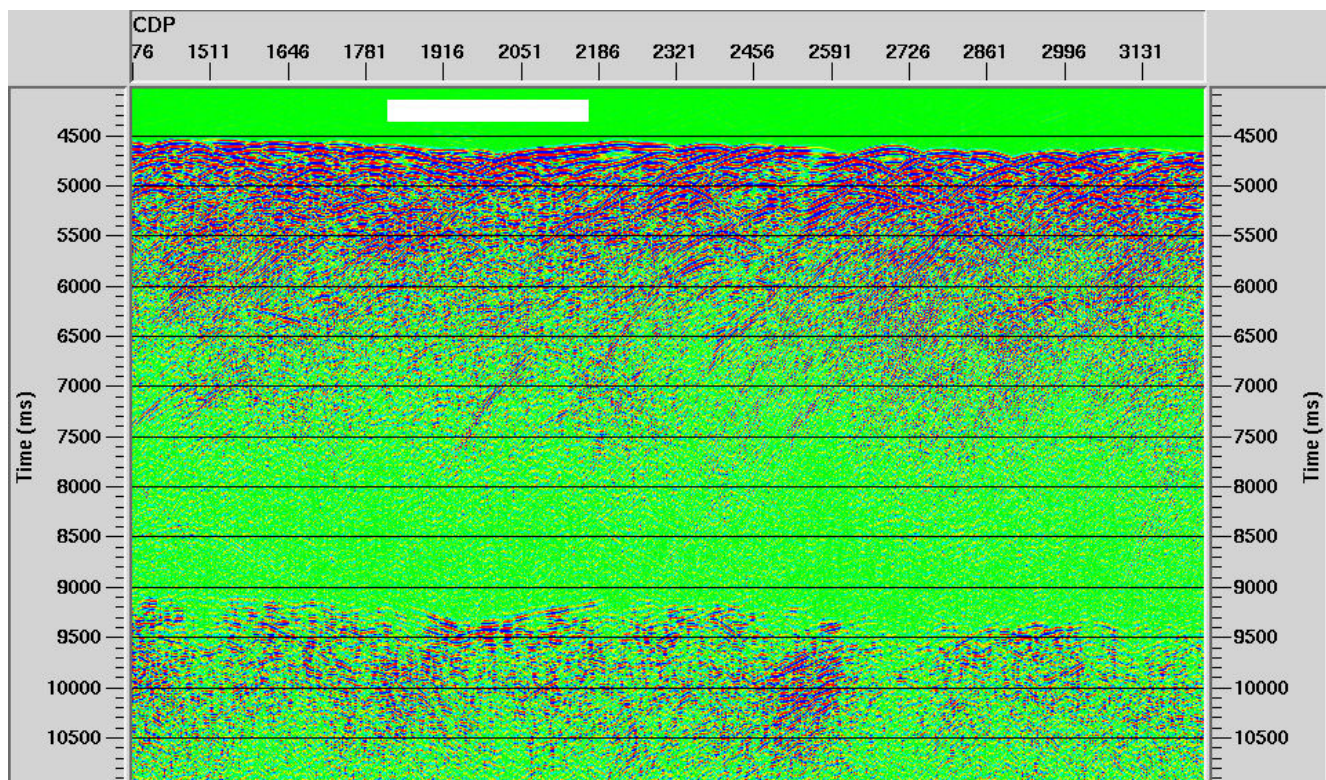


Εικόνα 77 Τομή υπέρθεσης με την μέθοδο υπέρθεσης σταθερής ταχύτητας και εφαρμογής φίλτρων κλίσης, διόρθωση για την γεωμετρική διασπορά και την διαδικασία εξασθένησης των πολλαπλών ανακλάσεων με το φίλτρο $f-k$.

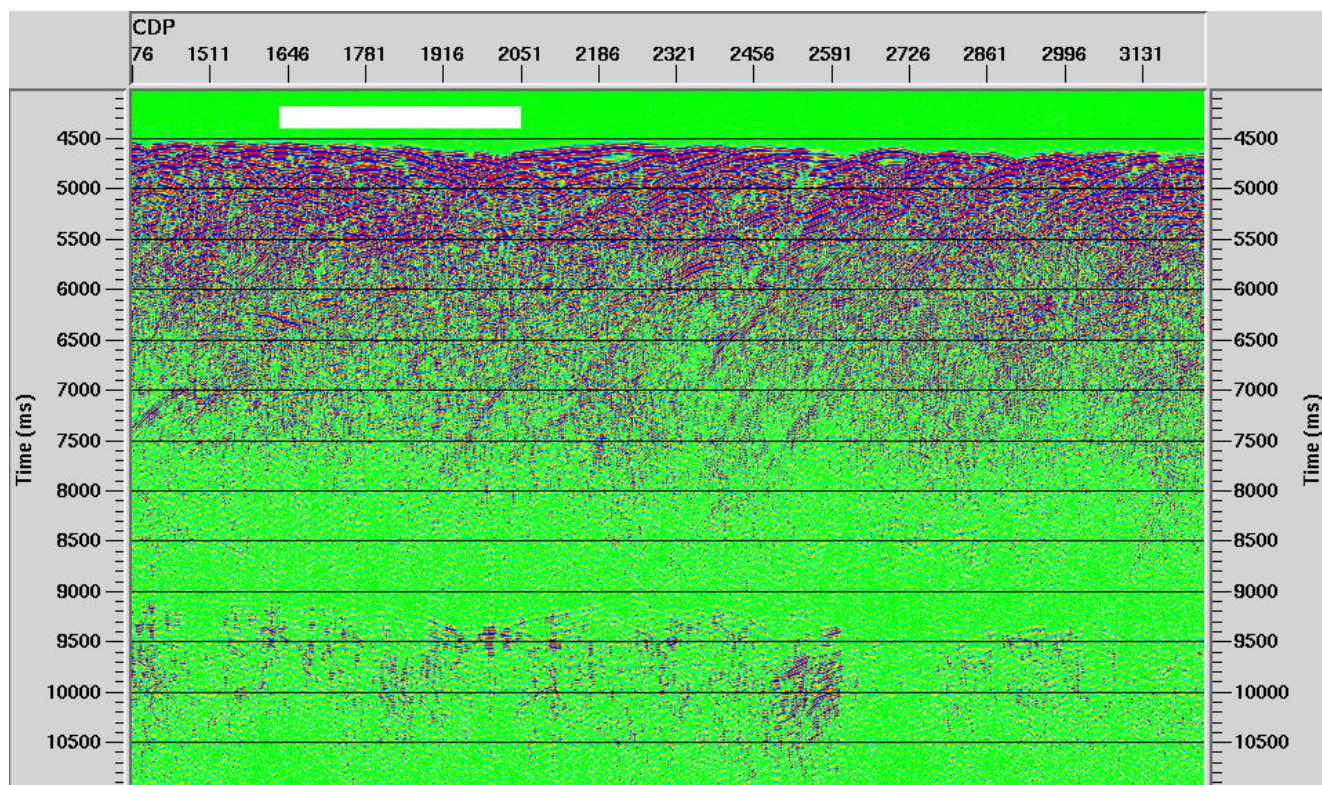




Σχήμα 78 Τμήμα της τομής με διόρθωση για την γεωμετρική διασπορά



Σχήμα 79 Τμήμα της τομής υπέρθεσης με την μέθοδο υπέρθεσης σταθερής ταχύτητας και εφαρμογής φίλτρων κλίσης και διόρθωση για την γεωμετρική διασπορά



Σχήμα 80 Τμήμα της τομήσμε την μέθοδο υπέρθεσης σταθερής ταχύτητας και εφαρμογής φίτρων κλίσης, διόρθωση για την γεωμετρική διασπορά και την διαδικασία εξασθένησης των πολλαπλών ανακλάσεων με το φίλτρο $f-k$.

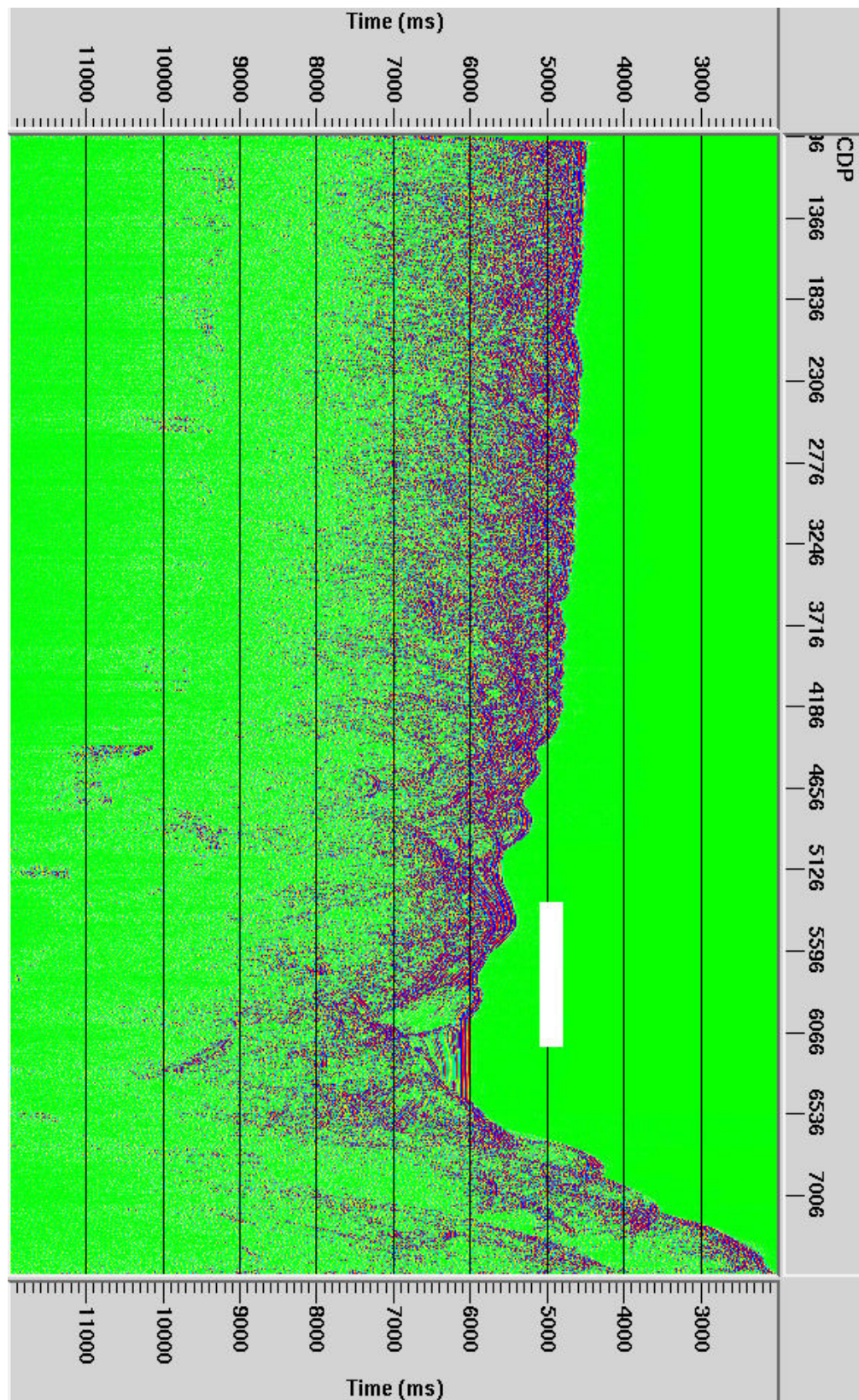
3.3.5 Αποσυνέλιξη πρόβλεψης

Η αποσυνέλιξη πρόβλεψης εφαρμόστηκε για την εξασθένηση της απομένουσας ενέργειας των πολλαπλών ανακλάσεων στα ίχνη της τομής υπέρθεσης. Η αποσυνέλιξη πρόβλεψης προβλέπει τις χρονοσειρές των περιοδικών πολλαπλών ανακλάσεων χρησιμοποιώντας την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης των καταγραφών και τις αφαιρεί από τις καταγραφές.

Η διαδικασία περιλαμβάνει τον σχεδιασμό του φίλτρου αποσυνέλιξης πρόβλεψης, την πρόβλεψη των χρονοσειρών των πολλαπλών ανακλάσεων και την αφαίρεσή τους από τις καταγραφές. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας εξαρτάται από τη διάρκεια του φίλτρου πρόβλεψης και από το χρόνο πρόβλεψης που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία των κανονικών εξισώσεων. Τα ίχνη της τομής υπέρθεσης χωρίστηκαν σε 9 ομάδες και σε κάθε ομάδα εφαρμόστηκε η αποσυνέλιξη πρόβλεψης με τη διάρκεια του φίλτρου πρόβλεψης και το χρόνο πρόβλεψης που έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα. Χρησιμοποιήθηκε η εντολή Spiking/PredictiveDeconvolution. Στο σχήμα 81, παρουσιάζεται η τομή υπέρθεσης μετά την εφαρμογή φίλτρου αποσυνέλιξης πρόβλεψης. Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται η διάρκεια του φίλτρου πρόβλεψης και ο χρόνος πρόβλεψης για κάθε ομάδα CMPs.

CMP	Διάρκεια φίλτρου (ms)	Χρόνος πρόβλεψης (ms)
896-3600	4900	4500
3601-4476	5200	4800
4477-4746	5400	4800
4747-5591	5500	4800
5592-6616	6200	4800
6617-6919	4500	4000
6920-7126	3800	3000
7127-7266	2900	2200
7267-7445	2300	1900

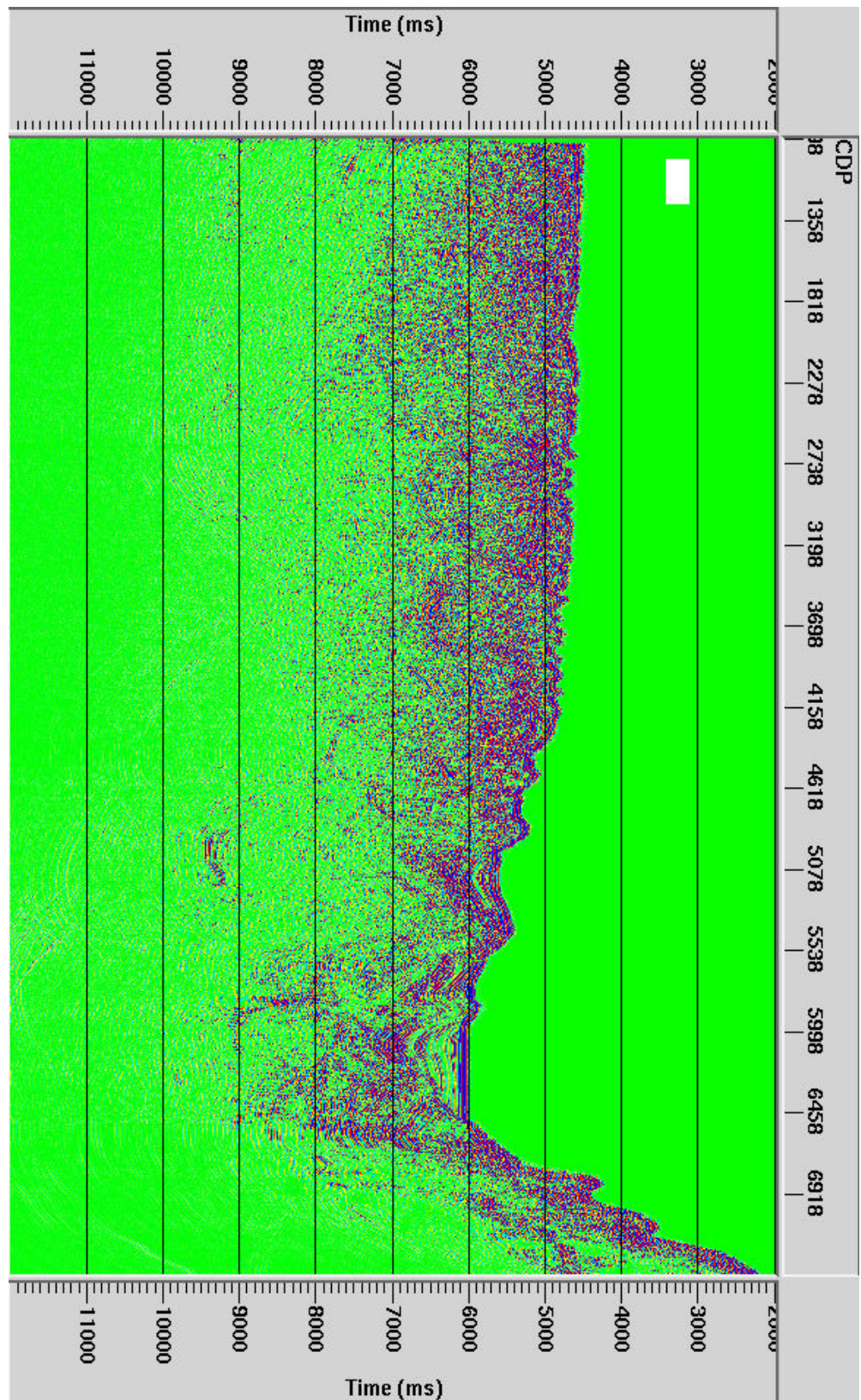
Σχήμα 81 Τομή υπέρθεσης μετά την εφαρμογή φίλτρου αποσυνέλιξης πρόβλεψης

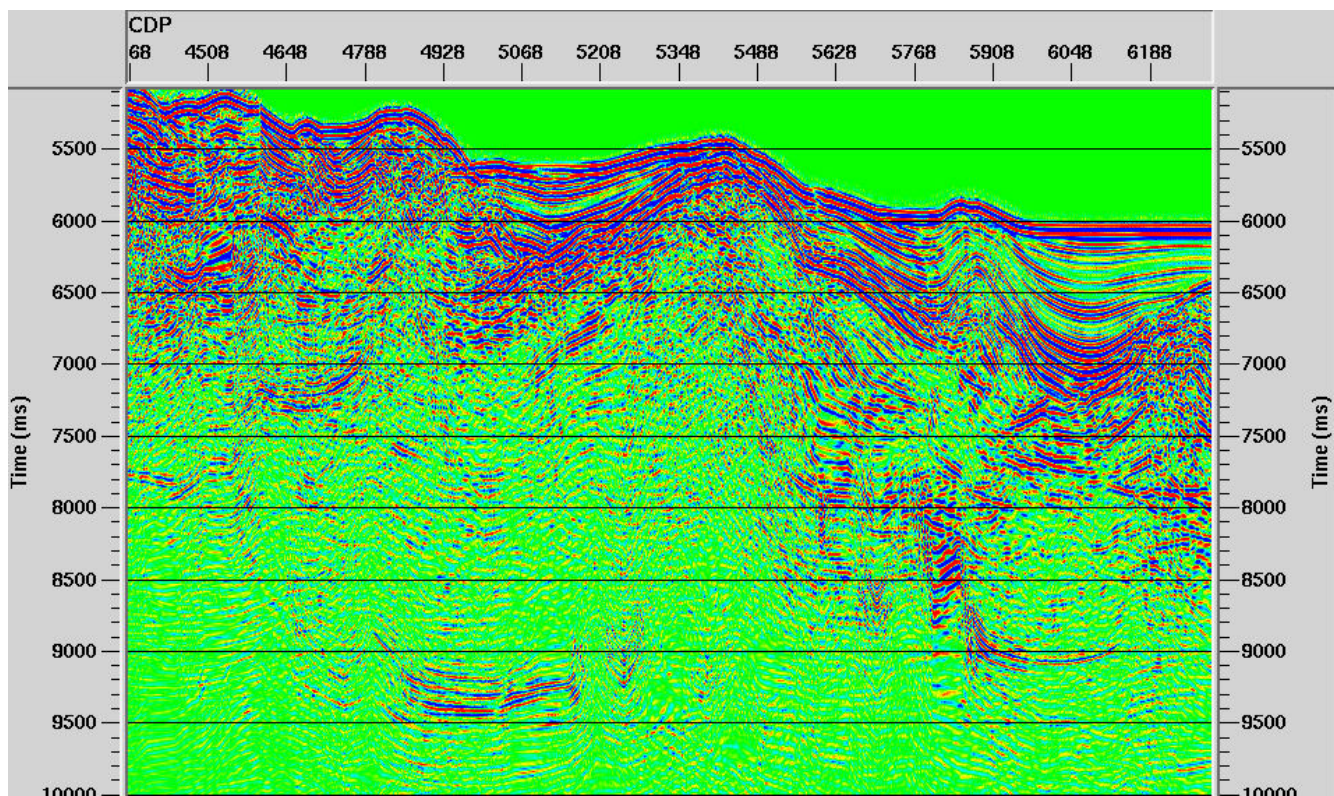
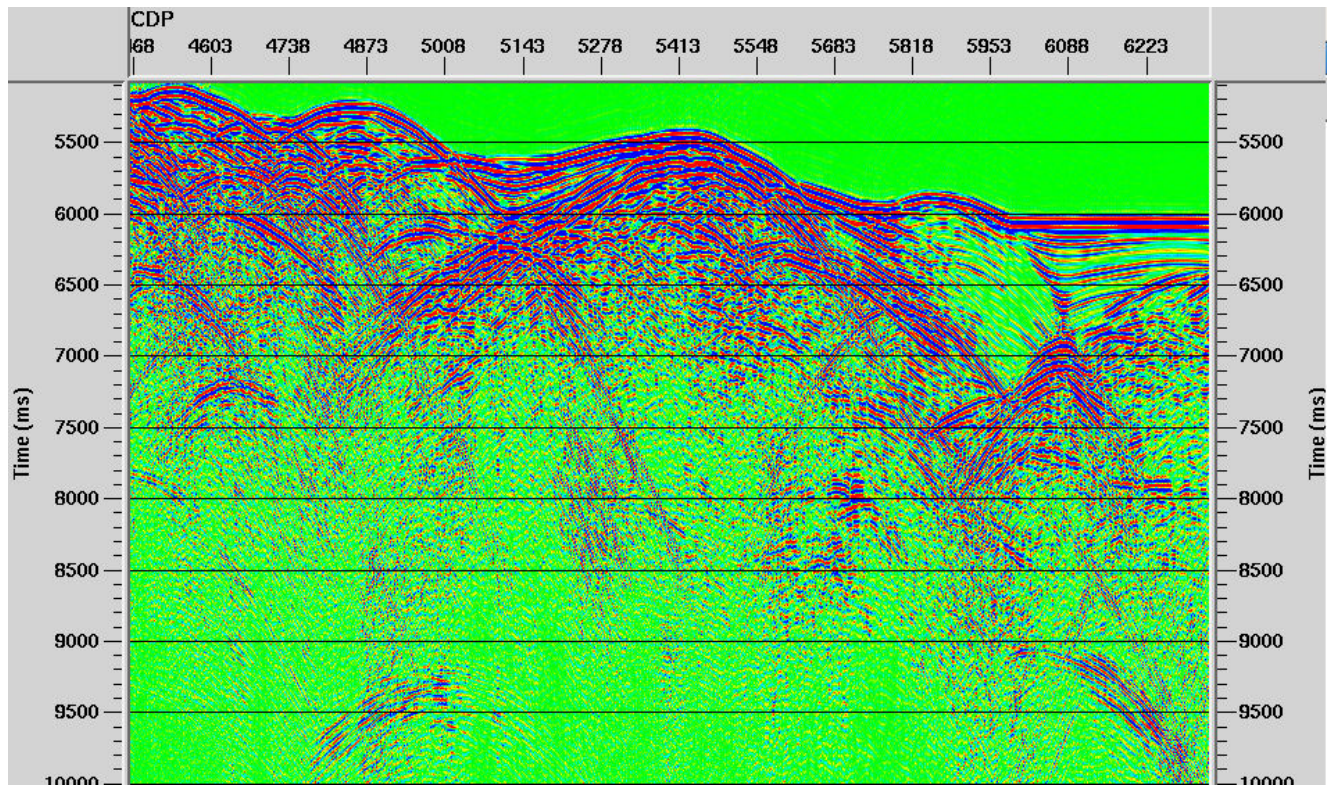


3.3.6 Χωροθέτηση Kirchhoff μετά την υπέρθεση

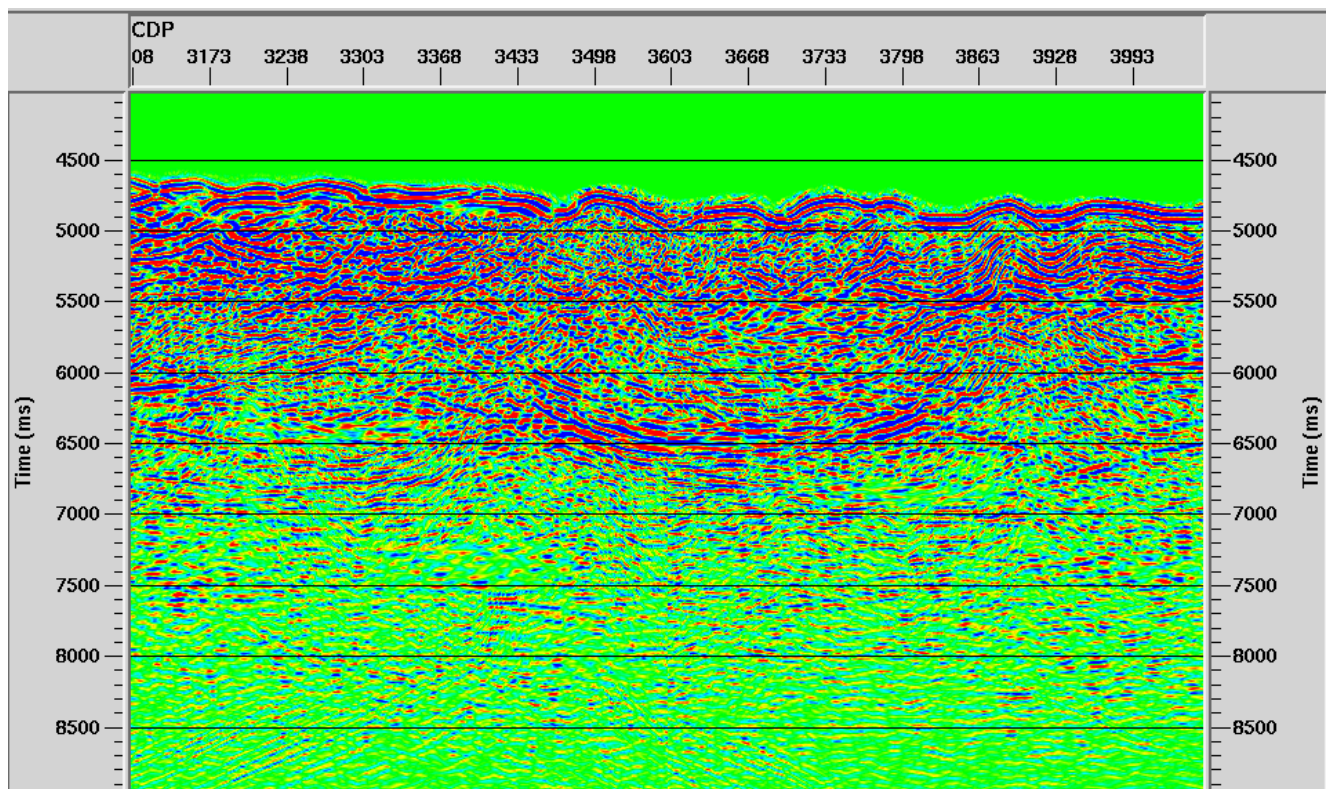
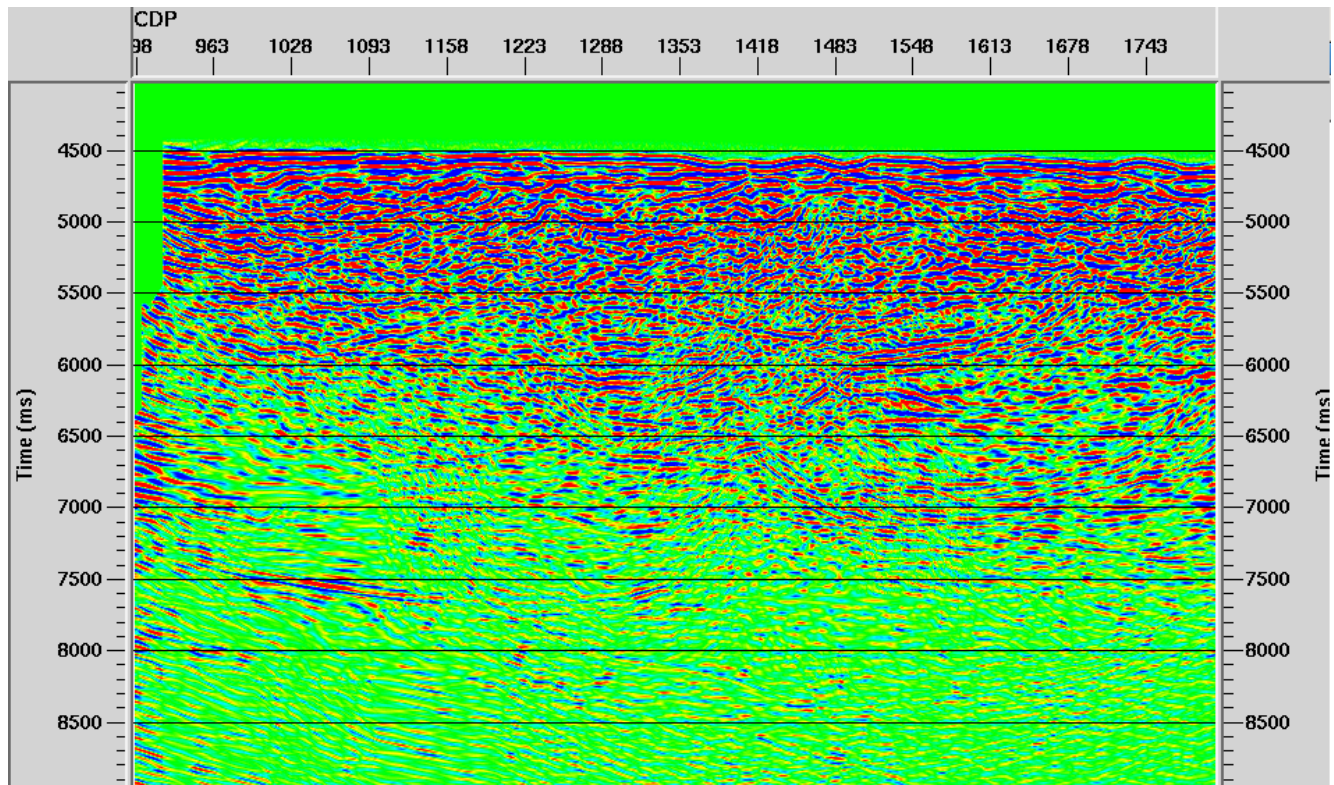
Ο σκοπός της χωροθέτησης είναι να κάνει την τομή υπέρθεσης να φαίνεται παρόμοια με την γεωλογική τομή (Yilmaz, 1987). Αυτό επιτυγχάνεται με την επανατοποθέτηση της ενέργειας των ανακλάσεων από την φαινόμενη τους θέση στην πραγματική τους θέση ανάκλασης στο επίπεδο $h=0$. Η χωροθέτηση Kirchhoff υποθέτει ότι η επιφάνεια ενός ανακλαστήρα αποτελείται από σημεία περίθλασης. Η χωροθέτηση Kirchhoff μετά την υπέρθεση λειτουργεί στο επίπεδο $h=0$, προσδιορίζει τους χρόνους διαδρομής των περιθλαστικών καμπύλων και αθροίζει τα πλάτη τους στο σημείο της περίθλασης τους. Αν το σημείο περίθλασης αντιστοιχεί σε σημείο κεκλιμένου ανακλαστήρα η χωροθέτηση θα αθροίσει πλάτη ανακλώμενων ακτίνων από διαφορετικά σημεία ανάκλασης. Επίσης ο συνδυασμός της δυναμικής διόρθωσης με την υπέρθεση δεν συγκεντρώνει την ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων στο επίπεδο $h=0$, επειδή οι χρόνοι διαδρομής τους δεν περιγράφονται από την εξίσωση της δυναμικής διόρθωσης. Στον πρώτο κλάδο του διαγράμματος ροής η χωροθέτηση Kirchhoff εφαρμόστηκε στην τομή υπέρθεσης με την εντολή KirchhoffTimeMigration και με το αρχείο ταχυτήτων των V_{rms} από την ανάλυση ταχυτήτων. Κάποια σημεία ήταν υπερχωροθετημένα (overmigrated), εξαιτίας της υπερεκτίμησης της ταχύτητας χωροθέτησης, οπότε οι V_{rms} τους μειώθηκαν στο 85%. Στο σχήμα 82 παρουσιάζεται η χωροθετημένη τομή. Στο σχήμα 83 παρουσιάζεται τμήμα της τομής υπέρθεσης πριν και μετά την χωροθέτηση. Από το σχήμα 84 έως το σχήμα 87 παρουσιάζονται τμήματα της χωροθετημένης τομής.

Σχήμα 82 Χωροθέτηση Kirchhoff μετά την υπέρθεση.

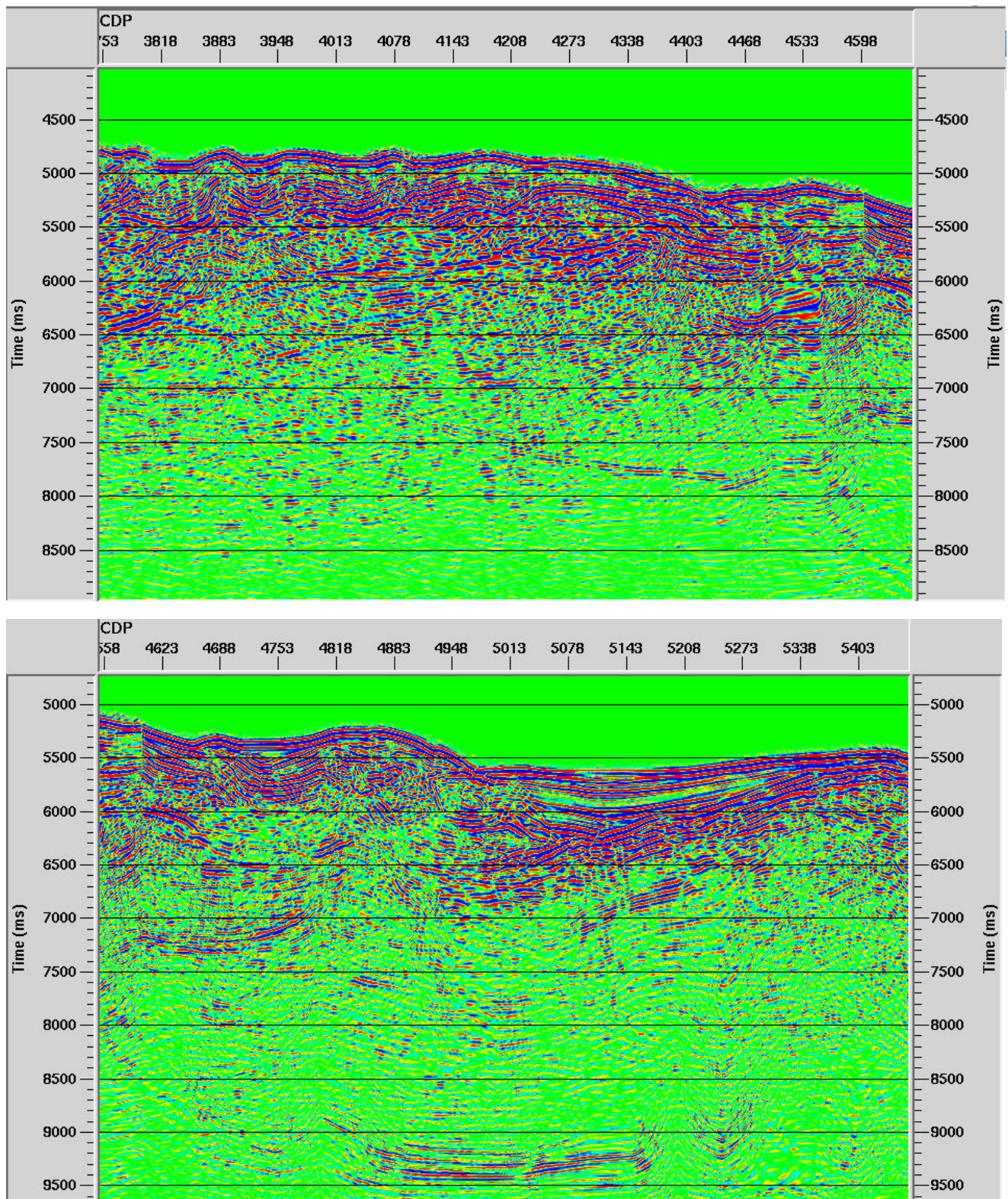




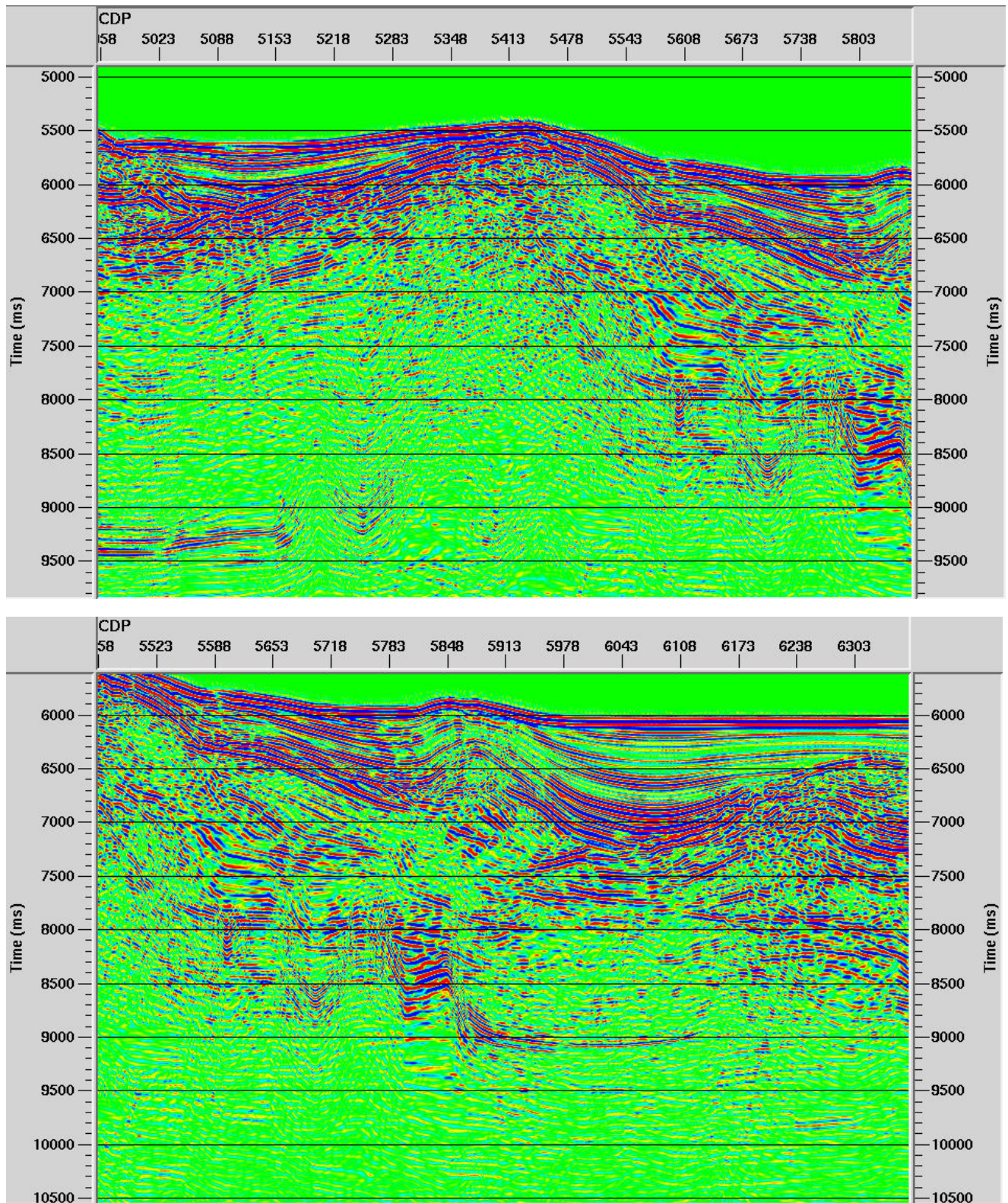
Σχήμα 83 Τομή υπέρθεσης (πάνω) και η χωροθέτηση της (κάτω).



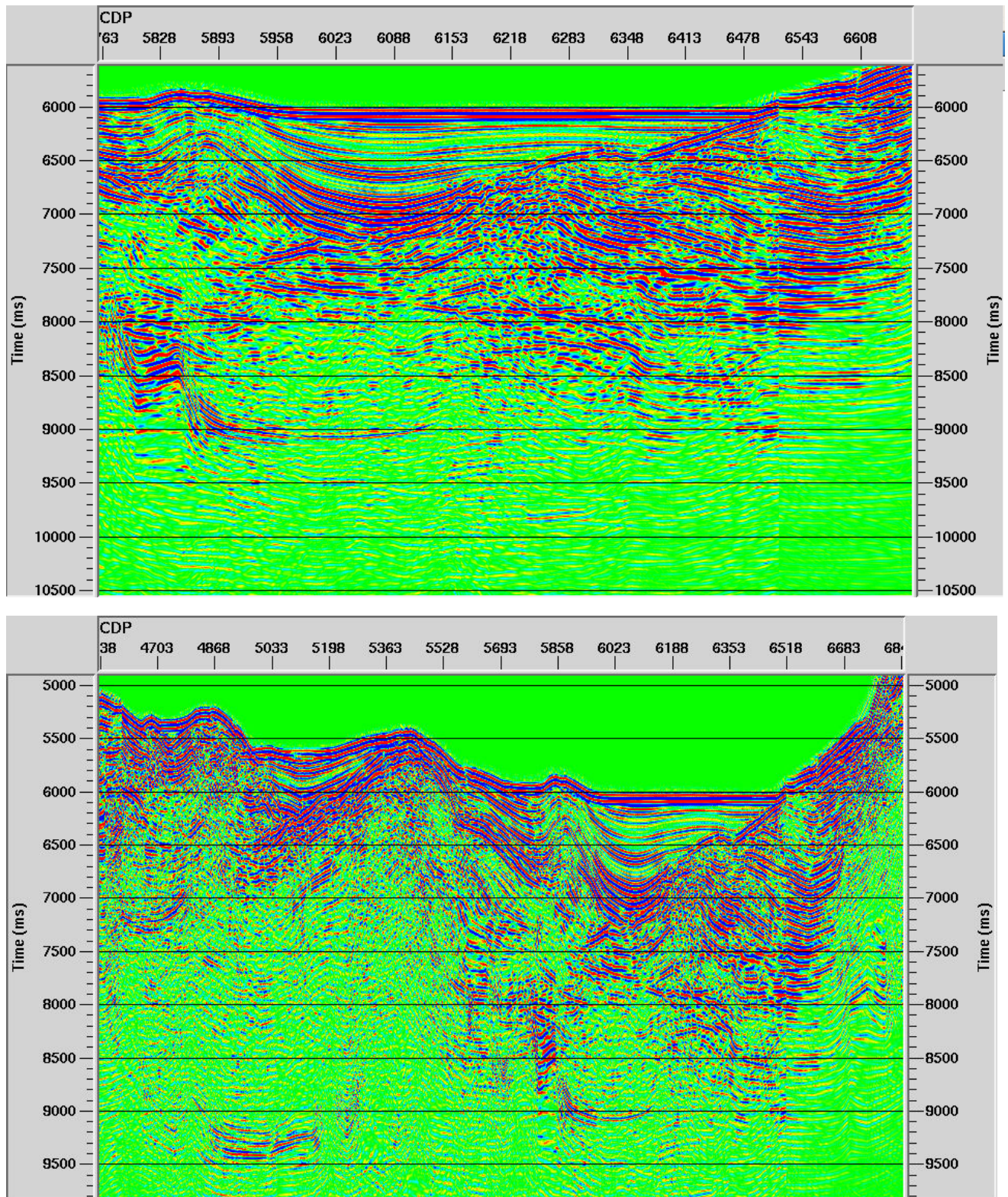
Σχήμα 84 Τμήματα της χωροθετημένης τομής.



Σχήμα 85 Τμήματα της χωροθετημένης τομής.



Σχήμα 86 Τμήματα της χωροθετημένης τομής.



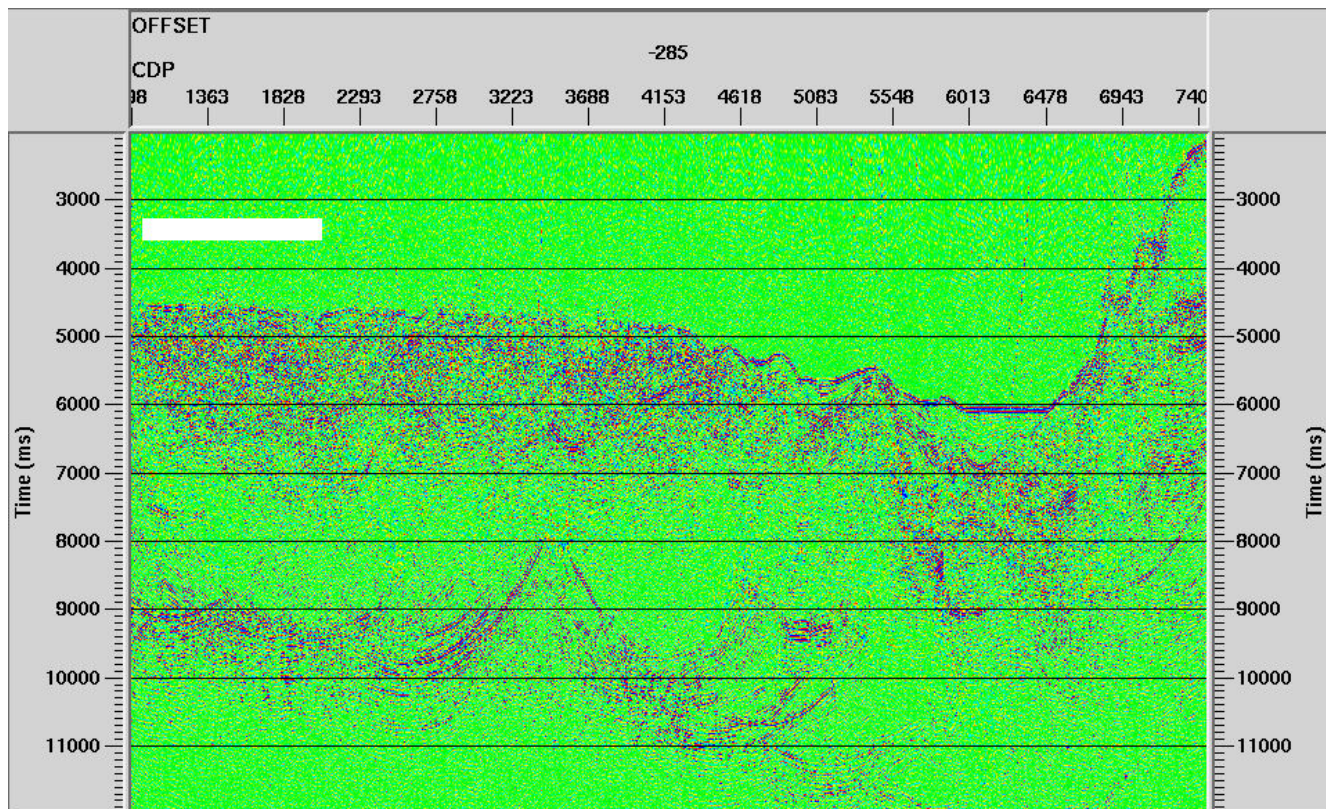
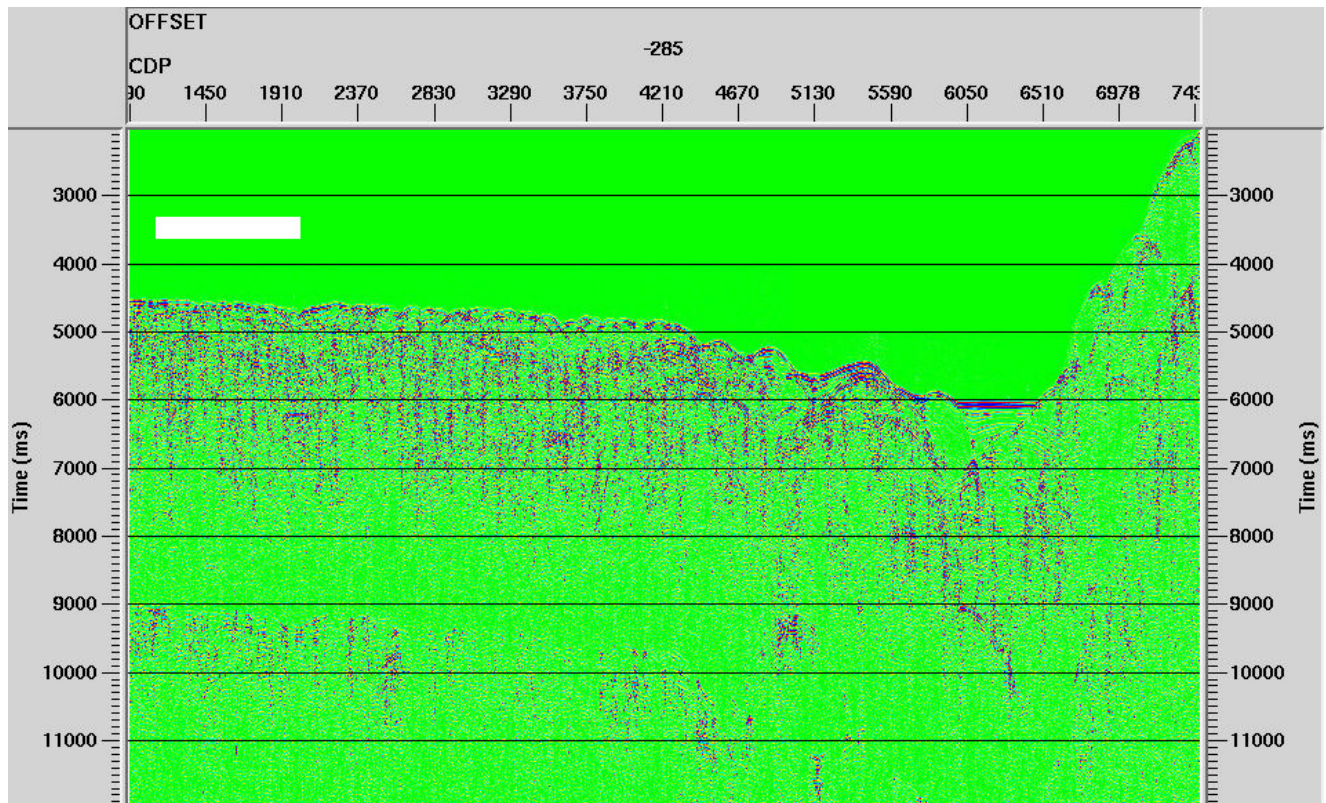
Σχήμα 87 Τμήματα της χωροθετημένης τομής.

3.4 Δεύτερο διάγραμμα ροής

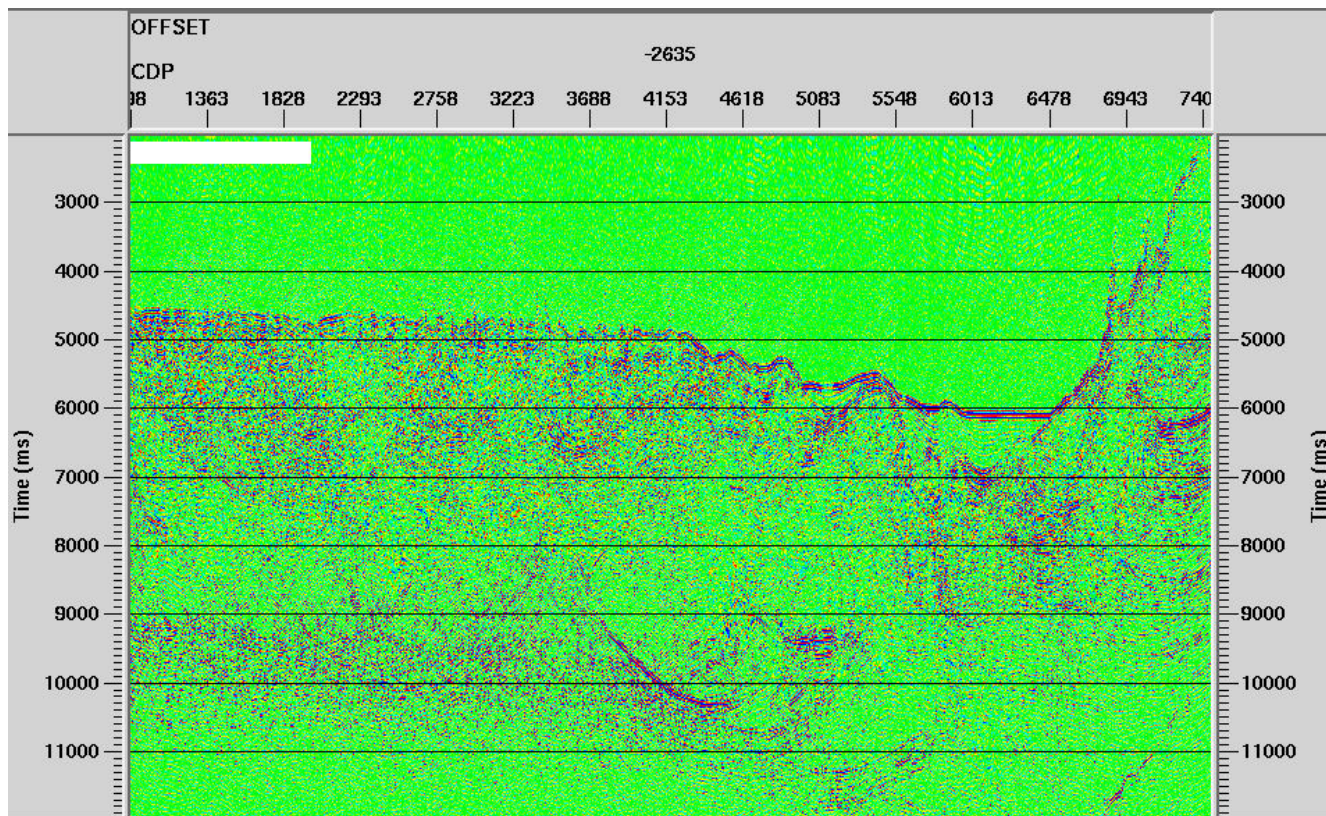
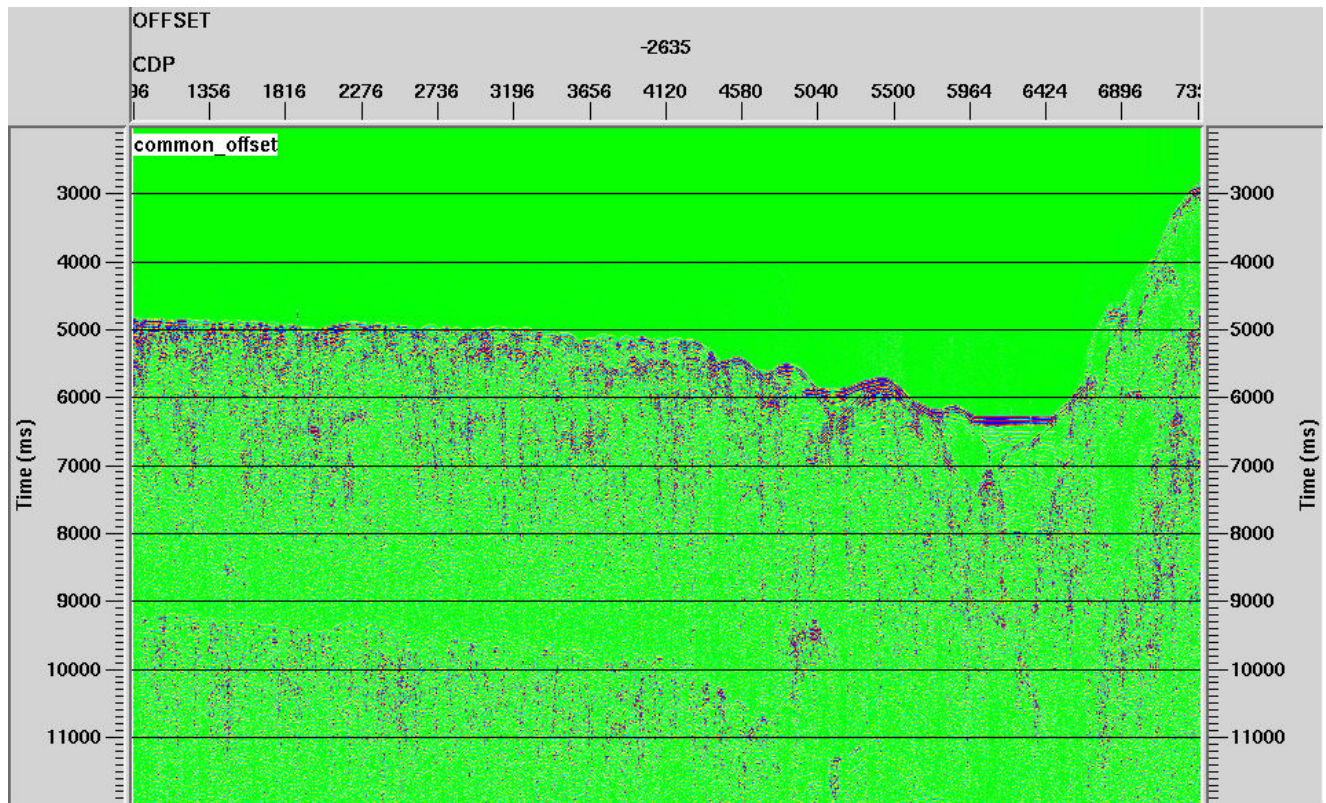
3.4.1 Χωροθέτηση Kirchhoff σε τομές σταθερού h

Σκοπός του δεύτερου κλάδου του διαγράμματος ροής ήταν η χωροθέτηση πριν την υπέρθεση. Για την εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων σε αυτό το διάγραμμα ροής εφαρμόστηκε μόνο η διαδικασία της εξασθένησης τους με το φίλτρο $f-k$. Για την χωροθέτηση Kirchhoff πριν την υπέρθεση η ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων βρίσκεται σε όλο τον όγκο των δεδομένων και για τον προσδιορισμό των χρόνων διαδρομής των περιθλώμενων ακτίνων, που τα πλάτη τους θα αθροιστούν στο σημείο περίθλασης χρησιμοποιείται η DSR εξίσωση. Για αυτό το λόγο η χωροθέτηση πριν την υπέρθεση θα πρέπει να παράγει τομή υψηλότερης διακριτικής ικανότητας από ότι η χωροθέτηση της τομής υπέρθεσης, στην οποία η ενέργεια των περιθλώμενων και των ανακλώμενων ακτίνων επανατοποθετείται στο σωστό σημείο ανάκλασης στο επίπεδο $h=0$.

Η τομή χωροθέτησης δημιουργήθηκε σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα χωροθετήθηκαν οι τομές σταθερού h με την εντολή Prestack Kirchhoff Time Migration και με το αρχείο ταχυτήτων των V_{rms} από την ανάλυση ταχυτήτων. Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκε η υπέρθεση των χωροθετημένων τομών σταθερού h με την εντολή CDP/EnsembleStack. Αποτέλεσμα είναι χωροθετημένη τομή με αυξημένο λόγο σήματος προς θόρυβο από οποιαδήποτε χωροθετημένη τομή σταθερού h πριν την υπέρθεση. Στο σχήμα 88 παρουσιάζεται η τομή για $h=285/2$ m, το οποίο είναι το ελάχιστο h , επειδή το κανάλι 1 έχει διαγραφεί, και η χωροθετημένη τομή της. Στο σχήμα 89 παρουσιάζεται η τομή για $h=2635/2$ m, το οποίο είναι το μέγιστο h , και η χωροθετημένη τομή της. Παρατηρείται ότι ο πυθμένας (CDP 1363) και η τάφρος (CDP 6013) στην χωροθετημένη τομή μέγιστου h έχουν μετατοπιστεί στην σωστή τους θέση, δηλαδή χωροθετήθηκαν από τα 4900 ms στα 4600 ms και από τα 6300ms στα 6000 ms, αντίστοιχα, όπως και στην χωροθετημένη τομή του ελάχιστου h . Στο σχήμα 90, παρουσιάζεται η υπέρθεση των χωροθετημένων τομών. Στα σχήματα 91 και 92 παρουσιάζονται τμήματα της. Στο σχήματα 93 και 94 παρουσιάζονται οι χωροθετημένες τομές πριν την υπέρθεση και μετά την υπέρθεση.

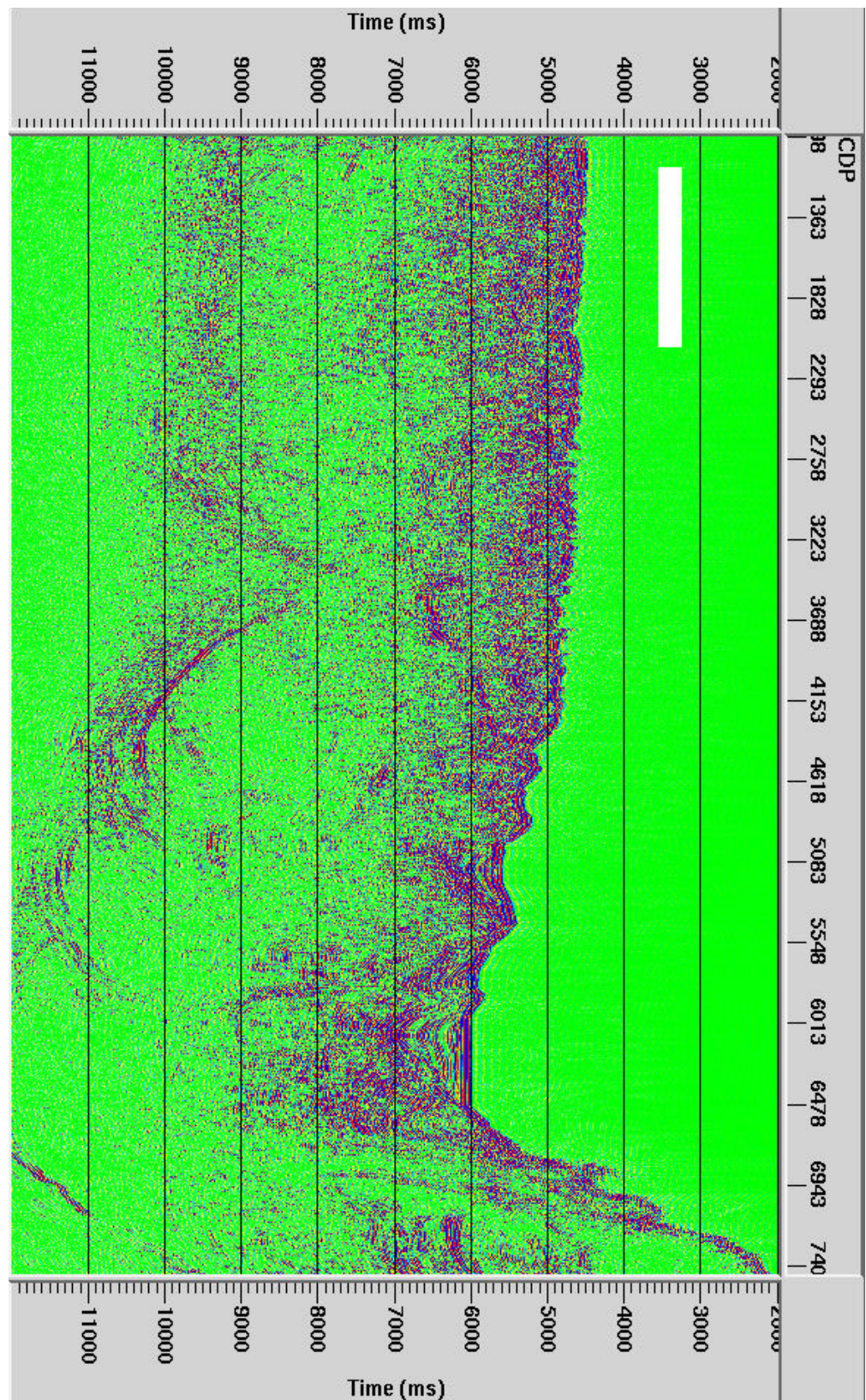


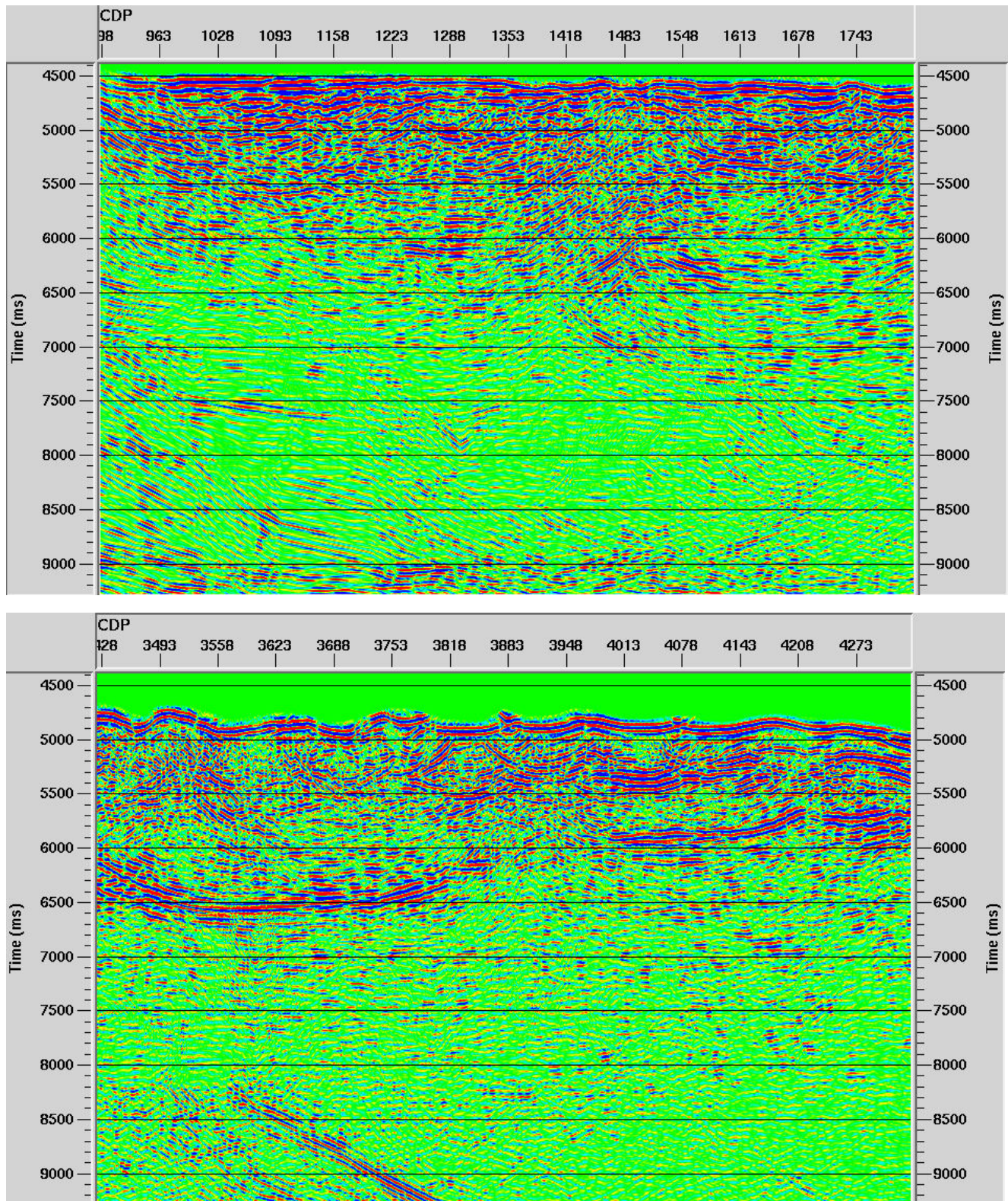
Σχήμα 88 Τομή για $h=285/2$ m (πάνω) και η χωροθετημένη τομή (κάτω)



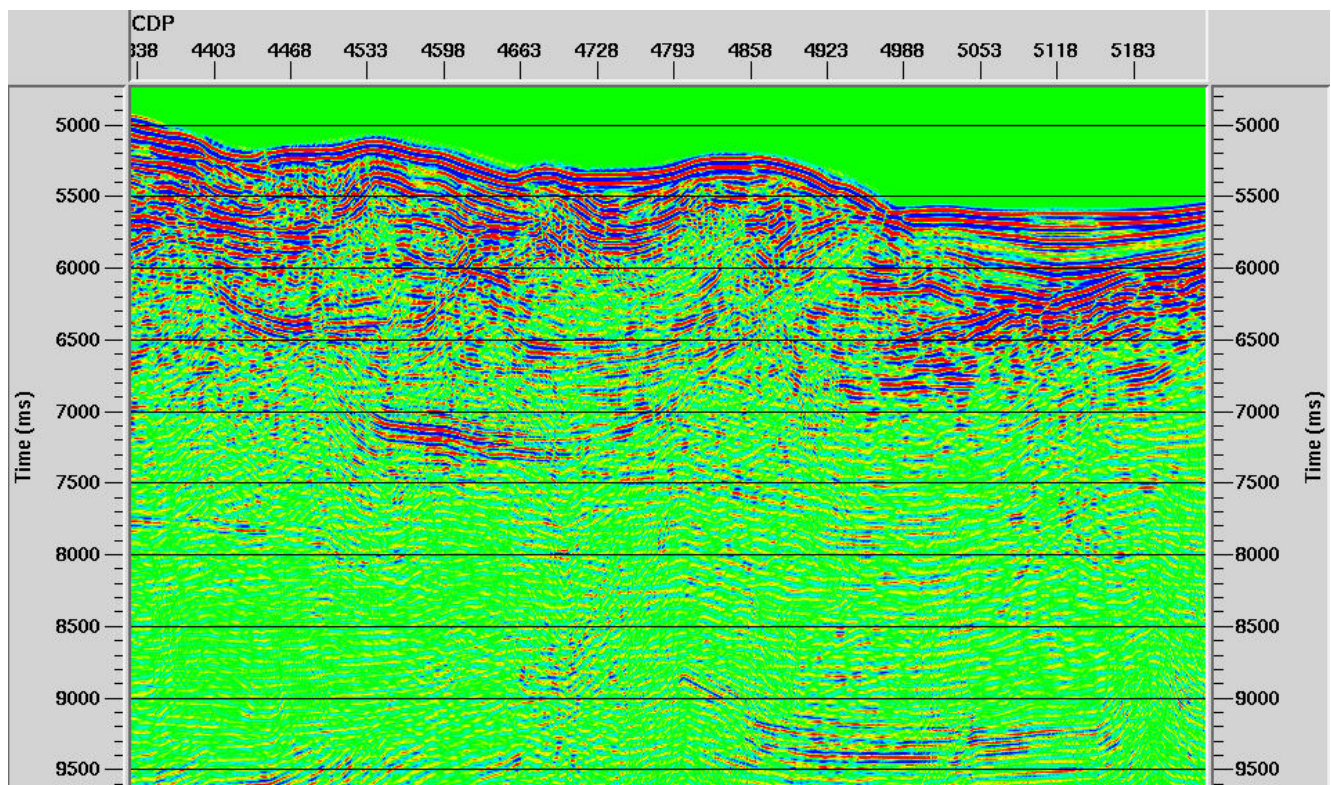
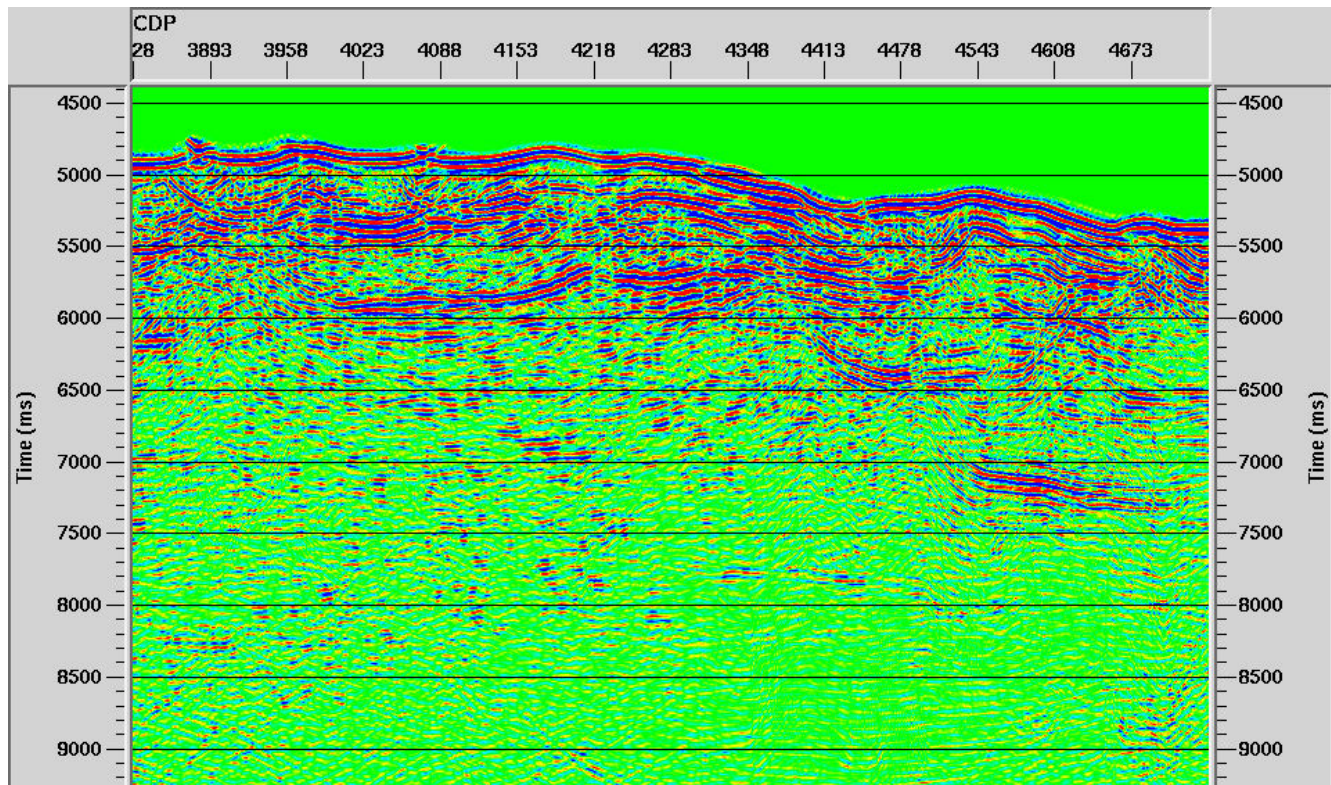
Σχήμα 89 Τομή) για $h=2635/2$ m(πάνω) και η χωροθετημένη τομή (κάτω).

Σχήμα 90 Υπέρθεση των χωροθετημένων τομών σταθερού h

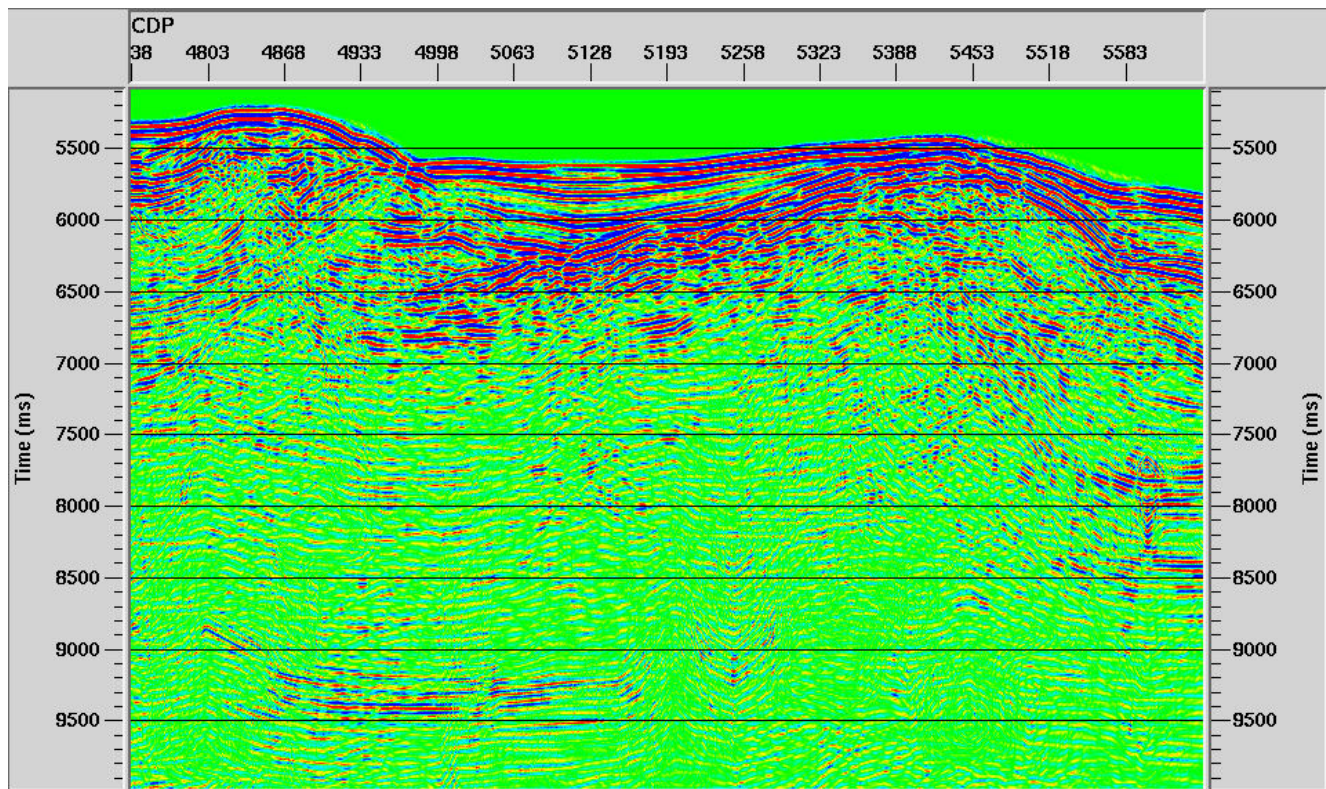
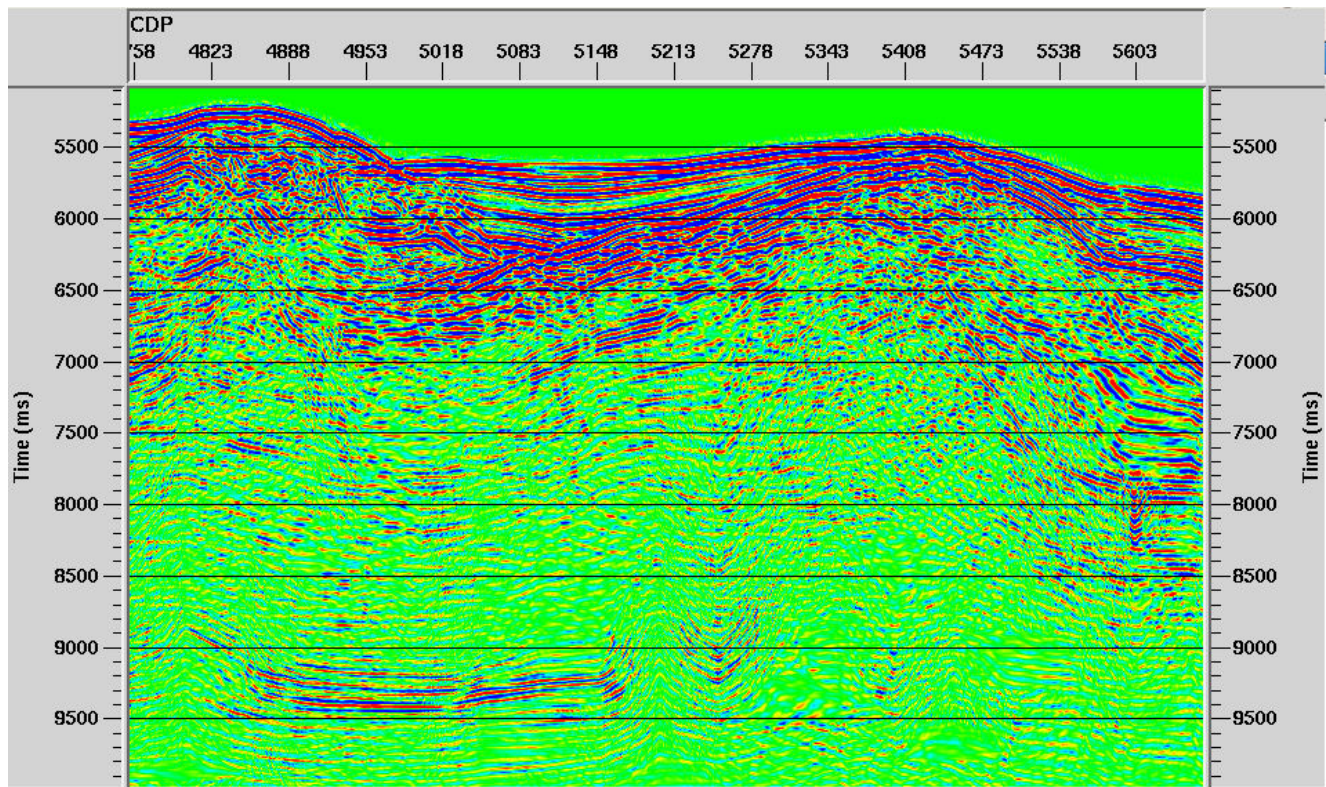




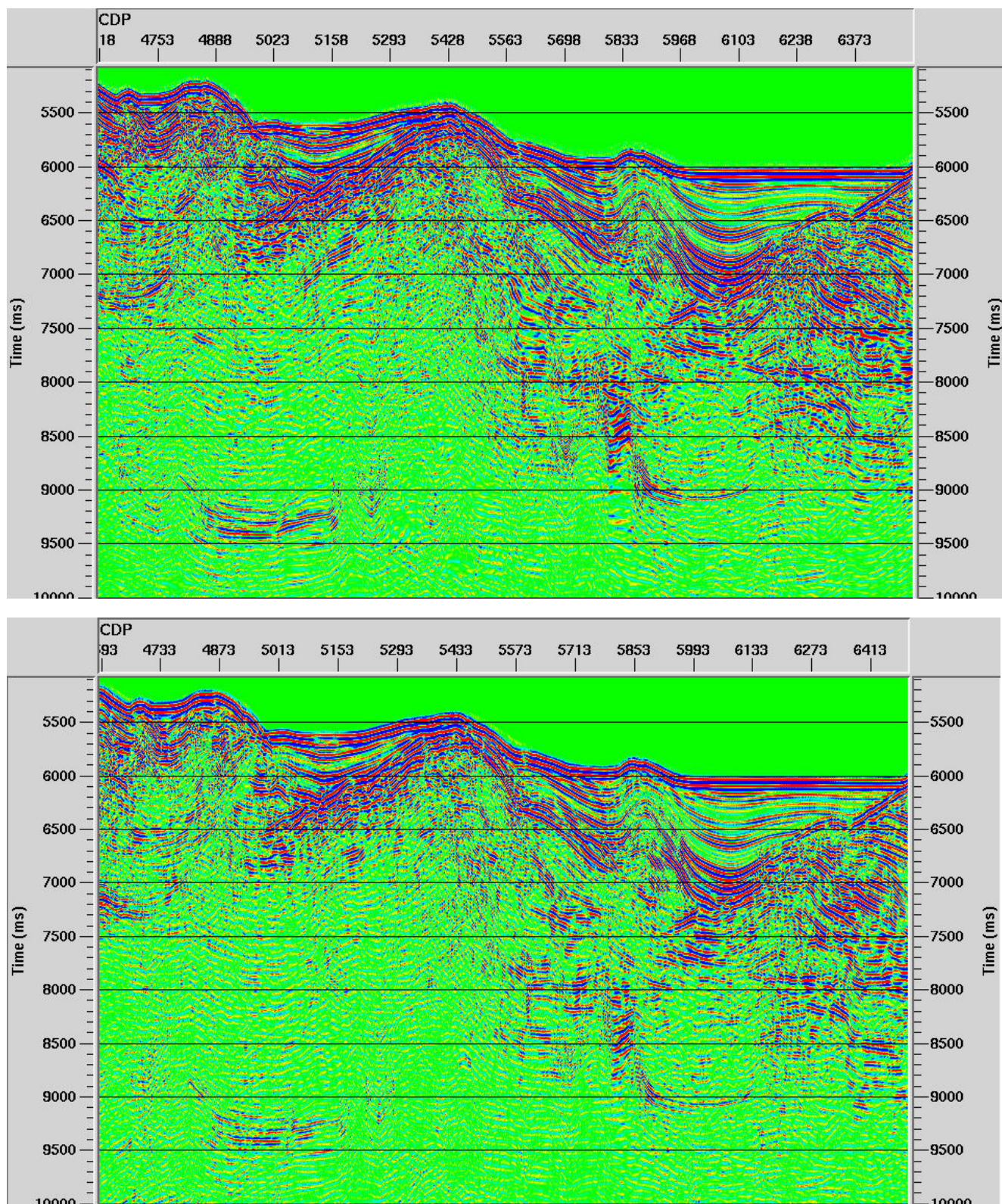
Σχήμα 91 Τμήματα της χωροθετημένης τομής πριν την υπέρθεση.



Σχήμα 92 Τμήματα της χωροθετημένης τομήστρον την υπέρθεση



Σχήμα 93 Τμήμα χωροθετημένης τομής πριν την υπέρθεση (κάτω) και μετά την υπέρθεση (πάνω)



Σχήμα 94 Τμήμα χωροθετημένης τομής πριν την υπέρθεση (κάτω) και μετά την υπέρθεση (πάνω)

Κεφάλαιο 4^ο: Συμπεράσματα-Προτάσεις

4.1 Εισαγωγή

Σκοπός της επεξεργασίας των δεδομένων σεισμικής ανάκλασης ήταν η δημιουργία σεισμικής τομής για την απεικόνιση των γεωλογικών δομών του υπεδάφους κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Η επεξεργασία πραγματοποιήθηκε με δύο διαγράμματα ροής για να συγκριθούν οι τελικές σεισμικές τομές τους. Στο πρώτο διάγραμμα ροής πραγματοποιήθηκε χωροθέτηση στην τομή υπέρθεσης με την μέθοδο υπέρθεσης σταθερής ταχύτητας και εφαρμογής φίλτρων κλίσης. Στο δεύτερο διάγραμμα ροής πραγματοποιήθηκε η χωροθέτηση των τομών σταθερού h πριν την υπέρθεση τους. Για την εξασθένηση της ενέργειας των πολλαπλών ανακλάσεων μεγάλης περιόδου εφαρμόστηκε φίλτρο f - k και για την εξασθένηση των περιοδικών ανακλάσεων στην τομή υπέρθεσης εφαρμόστηκε αποσυνέλιξη πρόβλεψης. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων από τα δύο διαγράμματα ροής και από την προσπάθεια εξασθένησης των πολλαπλών ανακλάσεων. Στη συνέχεια προτείνονται τεχνικές για την αύξηση της διακριτικής ικανότητας της τελικής τομής χωροθέτησης και για την βελτίωση της εξασθένησης των πολλαπλών ανακλάσεων.

4.2 Συμπεράσματα από την εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων

Η διαδικασία εξασθένησης των πολλαπλών ανακλάσεων με το φίλτρο f - k βασίζεται στην διαφορά της κανονικής χρονικής απόκλισης των πολλαπλών ανακλάσεων μεγάλης περιόδου από τις κύριες ανακλάσεις, που με την κατάλληλη χρονική διόρθωση ενισχύεται ώστε να διαχωριστούν οι συνιστώσες τους και να αποκοπούν. Από την εξασθένηση των πολλαπλών με το φίλτρο f - k προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η διαδικασία είναι αρκετά χρονοβόρα επειδή πρέπει να εφαρμοστεί σε κάθε συλλογή ιχνών διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου ξεχωριστά. Επίσης για να ενισχυθεί η διαφορά της κανονικής χρονικής απόκλισης πρέπει να μετατραπεί η συνάρτηση ταχύτητας κάθε συλλογής πριν την χρονική τους διόρθωση. Επιπλέον, πρέπει να σχεδιαστεί το φίλτρο αποκοπής στο φάσμα f - k , να εφαρμοστεί και να γίνει η αντίστροφη χρονική διόρθωση.
- Η μέθοδος είναι αποτελεσματική σε δεδομένα βαθιάς θάλασσας, όπως και της γραμμής μελέτης, επειδή οι καμπύλες των πολλαπλών είναι εμφανώς διαχωρισμένες από τις καμπύλες των κύριων ανακλάσεων και δεν υπάρχει κίνδυνος εξασθένησης των κύριων ανακλάσεων.
- Συγκρίνοντας τις τομές υπέρθεσης ή τα ίχνη διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου και χωρίς το φίλτρο f - k συμπεραίνεται ότι η μέθοδος έκτος από την εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων ενίσχυσε και την ενέργεια των κύριων ανακλάσεων στις καταγραφές, επειδή πιθανώς αφαίρεσε συνιστώσες θορύβου.
- Σε κάποια ίχνη διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου (σχήμα 71 και σχήμα 72) που οι πολλαπλές ανακλάσεις είχαν έντονα πλάτη το φίλτρο f - k δεν τις εξασθένησε ικανοποιητικά.

- Η μέθοδος αποτυγχάνει στην εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων σε μικρές αποστάσεις πηγής-δέκτη
- Η μέθοδος αποτυγχάνει στην απόσβεση της ενέργειας των πολλαπλών ανακλάσεων από κεκλιμένες διαχωριστικές επιφάνειες, όπως διαπιστώνεται από τα CMPs 6600-7445

Η αποσυνέλιξη πρόβλεψης προβλέπει και αφαιρεί τις περιοδικές πολλαπλές ανακλάσεις από τις καταγραφές. Το αποτέλεσμα της μεθόδου εξαρτάται από τη διάρκεια του φίλτρου πρόβλεψης και από το χρόνο πρόβλεψης. Η μέθοδος εφαρμόστηκε στην τομή υπέρθεσης για την απαλοιφή της ενέργειας των πολλαπλών ανακλάσεων που δεν εξασθένησε το φίλτρο f-k και προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα και παρατηρήσεις:

- Η ενέργεια των πολλαπλών ανακλάσεων εξασθενήθηκε σε βαθμό που να μην παρεμβάλλεται στο σήμα των κύριων ανακλάσεων στην τομή χωροθέτησης
- Η διαδικασία είναι αρκετά χρονοβόρα επειδή ιδανικά πρέπει να εφαρμοστεί σε κάθε ίχνος ξεχωριστά
- Σε κάποια ίχνη η ενέργεια των πολλαπλών ανακλάσεων δεν απαλείφθηκε ολοκληρωτικά και σε κάποια ίχνη εξασθενήθηκε και μέρος της ενέργειας των κύριων ανακλάσεων. Αυτό οφείλεται στην κακή εκτίμηση της διάρκειας του φίλτρου πρόβλεψης και του χρόνου πρόβλεψης.
- Η μέθοδος αποτυγχάνει στην εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων από κεκλιμένες διαχωριστικές επιφάνειες, επειδή δεν εμφανίζουν περιοδικότητα

4.3 Συμπεράσματα από την σύγκριση των τομών χωροθέτησης

Συγκρίνοντας την τομή υπέρθεσης με την τομή υπέρθεσης με την μέθοδο υπέρθεσηςσταθερής ταχύτητας και εφαρμογής φίλτρων κλίσης και τα τμήματά τους συμπεραίνεται ότι στην δεύτερη τομή ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων έχει συγκεντρωθεί αποτελεσματικότερα στο επίπεδο $h=0$, με αποτέλεσμα την αύξηση της διακριτικής ικανότητας της τομής χωροθέτησης. Για παράδειγμα στο σχήμα 85 και στο σχήμα 86 η δομή περίπου στα 9 sec χωρίς την μέθοδο υπέρθεσηςσταθερής ταχύτητας και εφαρμογής φίλτρων κλίσης δεν θα φανεωνόταν. Βέβαια η χωροθέτηση μετά την υπέρθεση δεν συγκεντρώνει την ενέργεια των ανακλάσεων από κεκλιμένες διαχωριστικές επιφάνειες και την ενέργεια των περιθλώμενων ακτίνων στην πραγματική τους θέση στο επίπεδο $h=0$, επειδή οι χρόνοι διαδρομής τους δεν προσδιορίζονται πλήρως από την εξίσωση της δυναμικής διόρθωσης.

Συγκρίνοντας την τομή χωροθέτησης του πρώτου διαγράμματος ροής (χωροθέτηση μετά την υπέρθεση) με εκείνη του δεύτερου διαγράμματος ροής (χωροθέτηση πριν την υπέρθεση) συμπεραίνεται ότι η τομή χωροθέτησης μετά την υπέρθεση εμφανίζει υψηλότερη διακριτική ικανότητα. Θεωρητικά θα έπρεπε να συμβαίνει το αντίθετο. Αυτό οφείλεται στην όχι αρκετά πυκνή ανάλυση ταχυτήτων με αποτέλεσμα οι χρόνοι διαδρομής των περιθλώμενων ακτίνων να μην προσδιορίζονται με επαρκή ακρίβεια από την DSR εξίσωση πριν την άθροιση τους στο σημείο χωροθέτησης. Επίσης, στην τομή υπέρθεσης του δεύτερου διαγράμματος ροής εφαρμόστηκε μόνο το φίλτρο f-k για την εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων με αποτέλεσμα η τομή χωροθέτησης να έχει χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο.

4.4 Προτάσεις

Η αποτελεσματικότερη τεχνική για την εξασθένηση των πολλαπλών ανακλάσεων δεδομένων βαθιάς θάλασσας είναι η SRME, η οποία αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.5.3. Η SRME προβλέπει και αφαιρεί όλες τις πολλαπλές ανακλάσεις ελεύθερης επιφάνειας από τα τα ίχνη διάταξης κοινής πηγής. Η πρόβλεψη του ίχνους με τους χρόνους διαδρομής των πολλαπλών ανακλάσεων για κάθε ίχνος καταγραφής πραγματοποιείται με την συνέλιξη συνέλιξη των ιχνών διάταξης κοινής πηγής με θέση που αντιστοιχεί στη θέση της πηγής του ίχνος καταγραφής με τα ίχνη διάταξης κοινού δέκτη που αντιστοιχεί στη θέση του δέκτη του ίχνους καταγραφής. Το άθροισμα των συνέλιξεων αποδίδει το ίχνος πρόβλεψης με τους χρόνους διαδρομής των πολλαπλών ανακλάσεων ελεύθερης επιφάνειας που αφαιρείται από το ίχνος καταγραφής. Η αφαίρεση πραγματοποιείται με προσαρμοστική αφαίρεση. Η διαδικασία είναι αρκετά γρήγορη. Απαιτεί μόνο την γεωμετρία της συλλογής των δεδομένων, τη διάρκεια του χρονικού παραθύρου και του φίλτρου για την αφαίρεση των πολλαπλών ανακλάσεων από τα ίχνη των καταγραφών. Στα δεδομένα της γραμμής μελέτης η μέθοδος θα ήταν αρκετά αποτελεσματική, επειδή εξαλείφει πλήρως την ενέργεια των πολλαπλών ανακλάσεων του πυθμένα, που οι άλλες μέθοδοι δεν κατάφεραν να αποσβέσουν ολοκληρωτικά επειδή εμφανίζονται με ισχυρά πλάτη. Επίσης, η SRME θα ήταν πιο αποτελεσματική αν εφαρμόζονταν πριν την αποσυνέλιξη πρόβλεψης στα ίχνη.

Από τις χωροθετημένες σεισμικές τομές διαπιστώνεται ότι η περιοχή μελέτης περιέχει σύνθετες γεωλογικές δομές και από το μοντέλο τμηματικής ταχύτητας παρατηρούνται ισχυρές πλευρικές και κατακόρυφες μεταβολές της σεισμικής ταχύτητας. Επομένως, η χωροθέτηση βάθους θα δημιουργούσε σεισμική τομή υψηλότερης διακριτικής ικανότητας από την χρονική χωροθέτηση. Επειδή η χωροθέτηση βάθους απαιτεί ακριβές μοντέλο ταχυτήτων, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν, οι χωροθετημένες τομές σταθερού ηγια να ξαναγίνει ανάλυση ταχυτήτων ώστε να βελτιωθούν οι V_{rms} , αφού πρώτα πραγματοποιηθεί αντίστροφη δυναμική διόρθωση με τις αρχικές V_{rms} στα ίχνη διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου. Τέλος, η χωροθέτηση πριν την υπέρθεση στα ίχνη διάταξης κοινής πηγής, τα οποία αντιπροσωπεύουν το πραγματικό κυματικό πεδίο από μία πηγή, θα ήταν πιο αποτελεσματική εξαιτίας των ισχυρών μεταβολών τις σεισμικής ταχύτητας.

Βιβλιογραφία

Ξένηβιβλιογραφία:

- A. Guitton and D.J. Verschuur, 2002. Adaptive subtraction of multiples using L1-norm
- Andrew S. Long Roald van Borselen Leharne Fountain ,2001. Surface-Related Multiple Elimination – Applications to an offshore Australia data set
- Arthur B. Weglein, William H. Dragoset, Daniel Ebrom, 2004. MULTIPLE ATTENUATION
- Chunyan (Mary) Xiao, John C. Bancroft, R. James Brown, and Zhihong (Nancy)Cao, 2003. Multiple suppression: A literature review
- C.C. Collins, I. B. Osazuwa, 2009. The use of f-k filter in the elimination of after facts from a shallow seismic reflection data in Zaria, Nigeria
- D. J. Verschuur, A. J. Berkhout, C. P. A. Wapenaar, 1992. Adaptive surface-related multiple elimination, D. J. Verschuur, A. J. Berkhout, and C. P. A. Wapenaar
- Dora B. Umoetok, Etim Daniel Uko, 2015. Characteristics of Multiples in Shallow and Deep Marine Seismograms in Gulf of Guinea
- Derman Dondurur, 2018. Acquisition and Processing of Marine Seismic Data
- Dela Spickermann, 2011. Stacking velocities from water column Reflections
- Eleni Kokinou, Nikolaos Andronikidis, Antonios Vafidis, Evangelos Kamberis, Emmanouil Manoutsoglou, 2017. Deformation patterns in the southwestern part of the Mediterranean Ridge (South Matapan Trench, Western Greece),
- Egbai, Atakpo, Aigbogun,2012. Predictive deconvolution in seismic data processing in Atala prospect of rivers State
- Jacques G. Jenny, 2013. High Resolution Seismic Reflection Practical basis
- Juefu Wang and Shaowu Wang, 2013. Practical strategies for data-driven land multiple attenuation
- John C. Bancroft, 2001. Review of seismic imaging: Poststack
- John C. Bancroft, 2001. Review of seismic imaging: Prestack
- John C. Bancroft, 2007. A Practical Understanding of Pre- and Poststack Migrations: Poststack
- John C. Bancroft, 2007. A Practical Understanding of Pre- and Poststack Migrations: Poststack
- Jing Chen, Edip Baysal, Orhan Yilmaz, 2005. Surface Related Multiple Attenuation on Sigsbee2B Dataset
- M Rashed, 2014. Fifty years of stacking
- Mei Wu and Shungen Wang, 2011. A case study of f-k demultiple on 2D offshore seismic data
- Muhammad Salman Abbasi, 2004. Attenuation of multiples in 2d short streamer length multi-channel seismic data, Gulf of California
- Marco A. Perez and David C. Henley, 2000. Multiple attenuation via predictive deconvolution in the radial domain
- Mark E. Everett, 2013. Near-Surface Applied Geophysics
- Mohamed Mhmod, Liu Hai Yan, Liu Cai and Feng Xuan, 2016. Performing Spiking and Predictive Deconvolution on 2D Land Data (PSTM)

- Michel Lavergne, 1989. Seismic Methods
- Nazmul Haque Mondol, Knut Bjolykke, 2010. Seismic Exploration
- Ozdogan Yilmaz, 1987. Seismic data processing
- Paul J. Fowler, Western Geophysical, 1997. A comparative overview of prestack time migration methods
- Philip Kearey, Michael Brooks, Ian Hill, 2002. An Introduction to Geophysical Exploration
- Poli Naidu, Santosh, Subhash Chand and U.C. Saxena Surface Related Multiple Elimination: A Case study from East Coast India
- Sri Wahyuni, Riatna, Sufridah Hardianti, Yulinar Firdaus, Sabrianto Aswad, 2018. Multiple Attenuation Using SRME (Surface Related Multiple Attenuation) Methods on 2D Marine Seismic Data Line 'X'
- Tumpal Bernhard Nainggolan, Said Muhammad Rasidin, Imam Setiadi, 2019. Combined Multiple Attenuation Methods and Geological Interpretation: Seram Sea Case Study 2D Marine Seismic Data
- V. Dimri, 1992. Deconvolution and Inverse Theory: Application to Geophysical Problems

Ελληνική βιβλιογραφία:

- Αποστολόπουλος Γ, 2013, Εφαρμοσμένη Γεωφυσική, Σημειώσεις
- Αθανάσιος Σκόρδας, Βασίλειος Αναστασόπουλος, 2003. Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων και Σημάτων
- Βαφείδης Α, 2011. Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Ι - Σεισμικές Μέθοδοι
- Δασακλής Σ, Σιγαλός Γ, 2016. Στρατηγική μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων για την έρευνα και εκμετάλλευσή υδρογονανθράκων, Τόμος Α: Ιόνιο Πέλαγος
- Κοκκίνου Ελένη, 2002. Επεξεργασία και ερμηνεία θαλασσιών σεισμικών καταγραφών ανάκλασης στην περιοχή του Ιονίου
- Παναγιώτης Δ. Καρβέλης, 1996. Συμβολή στην ενεργό γεωδυναμική του Ελληνικού τόξου με βάση τη διάκριση ενεργών ρηγμάτων

Διαδικτυακοί ιστότοποι:

- wiki.seg.org
- crewes.org/ResearchLinks/

Άλλες πηγές:

- ProMAX Reference Manual Vol.1 and Vol.2
- ProMAX Training Manual Version 6.0, Landmark

