

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ
ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑΣ
ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΚΑΣΣΑΝΔΡΑΣ**

Ζαφειρόπουλος, Γ.Α., Γρηγορίου, Ι.Α., Κουρής, Π.Σ.

ΔΕΠ-ΕΚΥ, Κηφισσίας 199, Μαρούσι 151 24

Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η

Η σωστή επιλογή εξειδικευμένων μεθόδων επεξεργασίας έχει μεγάλη σημασία στην απόκτηση του μεγαλύτερου δυνατού αριθμού υπεδιαφικών πληροφοριών με το μικρότερο εφικτό κόστος. Η χρησιμοποίηση αναλύσεων ταχύτητας κατά μήκος διακεκριμένων οριζόντων, της ακτινικής θεωρίας για τον υπολογισμό μοντέλλων βάθους και τέλος της χωροθέτησης βάθους στην τελική ερμηνεία των σεισμικών γεγονότων βοηθά στον εντοπισμό τεκτονικών γεγονότων και την παρακολούθησή τους στο χώρο. Οι μέθοδοι εφαρμόστηκαν με επιτυχία σε μία σεισμική τομή ανακλάσεως στην περιοχή Κασσάνδρα της Χαλκιδικής, όπου αποσαφηνίσθηκε η παρουσία ενός ρήγματος που οριοθετεί μία Ηωκαινική λεκάνη.

**THE LATERAL VELOCITY VARIATION ANALYSIS AND THE USE OF RAY
THEORY INTERPRETATION OF SEISMIC SECTION IN KASSANDRA AREA**

Zafiropoulos, G.A., Grigoriou, Y.A. and Kouris, P.S.

A B S T R A C T

The choice of special processing methods is of great interest in the acquisition of the maximum number of subsurface information, maintaining in parallel the processing cost at a sufficient level.

The use of horizon velocity analysis, the ray theory for depth modelling and the depth migration help a lot in the final seismic interpretation and the mapping of tectonic events. The methods have been applied in a seismic section of Kassadra area and the existence of a fault was revealed, which delineates an Eocene basin.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ανάλογα με τα ιδιαίτερα προβλήματα κάθε περιοχής, τους στόχους και τη σπουδαιότητά της, ο γεωφυσικός χρησιμοποιεί εξειδικευμένες τεχνικές επεξεργασίας σε δεδομένα σεισμικών ανάκλασης, όπως επεξεργασία κυματομορφής (wavelet processing), χωροθέτηση πριν την υπέρθεση, λεπτομερέστερη ανάλυση ταχυτήτων (HVA κ.α.), μετασχηματισμούς του σύνθετου σεισμικού (χνους

(Hilbert transform), modelling, χωροθέτηση βάθους κ.α.

Η σωστή επιλογή των καταλλήλων μεθόδων ειδικής εξεπεργασίας έχει μεγάλη σημασία στην απόκτηση του μεγαλύτερου δυνατού αριθμού πληροφοριών με το μικρότερο εφικτό κόστος (Claerbout, 1985).

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Προσδιορισμός της ταχύτητας

Ο προσδιορισμός της ταχύτητας διάδοσης του σεισμικού σήματος αποτελεί μία από τις σημαντικότερες και δυσκολότερες φάσεις της επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων.

Ο απόλυτα ακριβής προσδιορισμός της ταχύτητας για μία στενή περιοχή γύρω από μία γεώτρηση επιτυγχάνεται με την ακουστική διαγραφή (sonic log). Στην επεξεργασία σεισμικών δεδομένων χρησιμοποιούνται τα ίδια τα δεδομένα για τον υπολογισμό της καλύτερης δυνατής συνάρτησης ταχύτητας. Η επιθυμητή ακρίβεια εξαρτάται κύρια από τον στόχο της έρευνας. (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Ανεκτά λάθη Ταχύτητας (Hubral and Krey, 1980).

<u>Χρήση ταχύτητας</u>	<u>% ανεκτό λάθος</u>	
	stacking	interval ταχύτητα
συμβατική επεξεργασία	2-10	-
τεκτονική ανωμαλία ύψους 30m σε βάθος 300m	0.5	-
μεγάλη λιθογραφική μεταβολή πάχους 300m σε βάθος 3000m	0.7	10
στρωματογραφική μεταβολή πάχους 120m σε βάθος 300m	0.1	3

Στις περισσότερες περιπτώσεις μελετούμε την μεταβολή της ταχύτητας σαν συνάρτηση του διπλού χρόνου διαδρομής. Ο υπολογισμός γίνεται σε ισαπέχουσες ή όχι αποστάσεις κατά μήκος της σεισμικής τομής. Για τα ενδιάμεσα σημεία η ταχύτητα υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή. Η διαδικασία αυτή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε συνάρτηση πάντα με την ποιότητα των δεδομένων. Υπάρχουν, όμως, περιπτώσεις όπου χρειαζόμαστε λεπτομερέστερη μελέτη της πλευρικής μεταβολής της ταχύτητας. (Larner, 1981). Αυτό επιτυγχάνεται με την ανάλυση της ταχύτητας ορίζοντος (Horizon velocity analysis).

Στη μέθοδο αυτή υπολογίζεται η βελτιστοποίηση της υπέρθεσης (stack) για μία οικογένεια ταχυτήτων και για ένα συγκεκριμένο παράθυρο λίγων msec, το οποίο επικεντρώνεται στον υπό μελέτη ορίζοντα. Το παράθυρο έχει συνήθως μήκος ίσο με την περίοδο του παλμού του ορίζοντα. Οι προς δοκιμή ταχύτητες επιλέγονται γύρω από μία αναμενόμενη τιμή και το βήμα της μεταβολής είναι συνήθως

από 10 έως 50m/sec.

Οι αναλύσεις γίνονται για όλο το μήκος του ορίζοντα και καταρτίζεται πίνακας που δίνει την ταχύτητα που βελτιστοποιεί την σεισμική υπέρθεση για κάθε υπεδαφικό σημείο του ορίζοντα. Τελικά υπολογίζεται μία συνεχής συνάρτηση της ταχύτητας κατά μήκος του ορίζοντα. Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται τόσο για να δώσει μία καλύτερη υπέρθεση όσο και για την εξαγωγή γεωλογικών συμπερασμάτων (ρήγματα, πλευρικές μεταβολές, κλπ). Σε μία σεισμική τομή μπορεί να γίνει ανάλυση ταχύτητας για περισσότερους από ένα ορίζοντες και στη συνέχεια να υπολογιστεί με ακρίβεια η ενδιάμεση ταχύτητα (interval velocity).

Χωροθέτηση Χρόνου και Βάθους

Η χωροθέτηση χρόνου (time migration) σήμερα αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της σεισμικής επεξεργασίας. Οι διάφορες τεχνικές χωροθέτησης χρόνου (Kirchhoff summation, Finite-difference, Stolt F-K) στηρίζονται στην επίλυση της βαθμωτής εξίσωσης κύματος.

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} = \frac{4}{v^2(x, z)} \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2}$$

όπου $\rho(x, z, t)$ είναι η διαταραχή σαν συνάρτηση της οριζόντιας συνιστώσας x , της κάθετης συνιστώσας z και του διπλού χρόνου διαδρομής t . Κοινό μειονέκτημα όλων των μεθόδων χωροθέτησης χρόνου είναι η δυνατότητά τους να δώσουν ακριβή αποτελέσματα μόνο για μικρές σχετικά γεωλογικές κλίσεις και μικρές πλευρικές μεταβολές της ταχύτητας. (Kjartansson, 1978). Σε περιπτώσεις με έντονες πλευρικές μεταβολές η σωστή χωροθέτηση της σεισμικής τομής επιτυγχάνεται με τη χωροθέτηση βάθους.

Έχουν αναπτυχθεί δύο γενικές προσεγγίσεις του προβλήματος της χωροθέτησης βάθους.

Η ακτινοθεωρητική χωροθέτηση μπορεί να αναλυθεί στα ακόλουθα βήματα (Γρηγορίου κ.α. 1988).

- Χωροθέτηση σε χρόνο.
- Ερμηνεία της χωροθετημένης τομής και ψηφιοποίηση των κυρίων ανακλαστήρων.
- Καθορισμός μοντέλου ταχυτήτων όσο δυνατόν πιο κοντά στην πραγματικότητα.
- Γραφική χωροθέτηση των ανακλαστήρων χρησιμοποιώντας την μέθοδο των εικονικών ακτίνων (inverse image ray tracing).
- Βελτίωση του μοντέλου ταχύτητας.
- Χωροθέτηση βάθους της αρχικής τομής με την χρησιμοποίηση του τελικού μοντέλου ταχυτήτων.

Η μέθοδος αυτή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο στις περιπτώσεις όπου οι πλευρικές μεταβολές δεν είναι εξαιρετικά απότομες. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται η κυματοθεωρητική χωροθέτηση βάθους. Στη μέθοδο αυτή επιλύεται η πλήρης μορφή της κυματικής εξίσωσης με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Υποπερίπτωση της κυματοθεωρητικής χωροθέτησης βάθους είναι η μέθοδος χωροθέτησης βάθους στο πεδίο απόσταση κυματοριθμός (ω - χ depth migration), η οποία δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και για γεωλογικές κλίσεις μέχρι και 90 βαθμούς.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ Δ. ΚΑΣΣΑΝΔΡΑ

Στη δυτική περιοχή της χερσονήσου της Κασσάνδρας εκτελέστηκε ένα εκτεταμένο δίκτυο σεισμικών διασκοπήσεων. Από την ερμηνεία των σεισμικών τομών εντοπίστηκε μία Ηωκαινική υπολεκάνη που για την οριοθέτησή της υπήρχε μία αβεβαιότητα για την ύπαρξη ή όχι ενός ρήγματος. Επιλέχθηκε η τομή που έδινε τις καλύτερες πληροφορίες και χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι ειδικής επεξεργασίας ώστε να βελτιωθεί η τελική ερμηνεία.

Η σεισμική τομή κατεγράφη με πηγή ενέργειας υδραυλικούς δονητές, πολλαπλότητα υπεδαφινής κάλυψης 4800% και απόσταση ιχνών 25μ.

Αρχικά έγινε συμβατική επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων και παρήχθη η τελική σεισμική τομή υπέρθεσης (Σχ.1), η οποία στην συνέχεια χωροθετήθηκε σε χρόνο (Finite Difference) με 90% των ταχυτήτων που χρησιμοποιήθηκαν στην υπέρθεση (Σχ.2). Τα δεδομένα αυτά ερμηνεύτηκαν σύμφωνα με την εμπειρία από το υπόλοιπο σεισμικό δίκτυο της περιοχής και τις υπάρχουσες γεωτρήσεις και επιλέχθηκαν χαρακτηριστικοί ορίζοντες για περαιτέρω αναλύσεις ταχυτήτων. Οι ψηφιοποιημένοι ορίζοντες εμφανίζονται στο σχήμα 3.

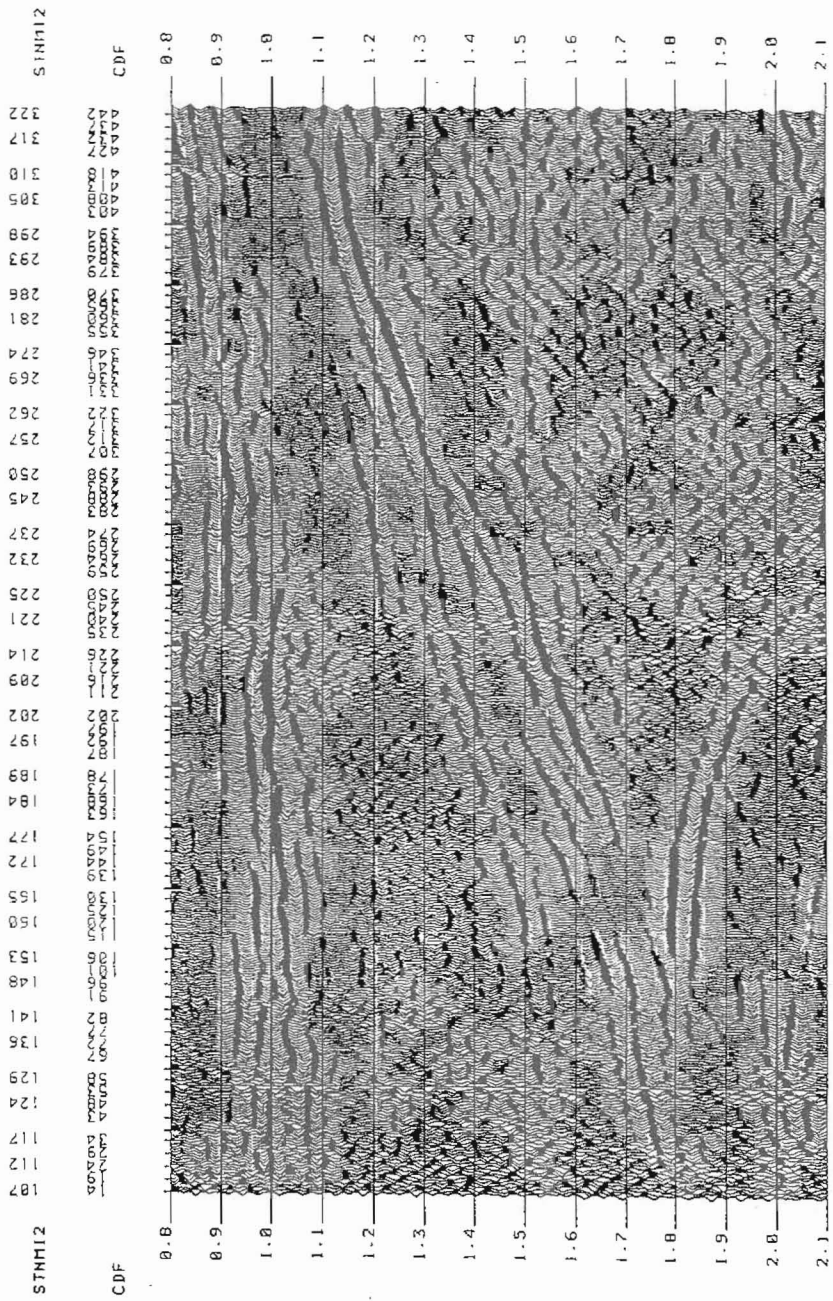
Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται η ανάλυση ταχυτήτων του ορίζοντα 5 του σχήματος 3. Για κάθε ορίζοντα και για κάθε υπεδαφινικό σημείο χρησιμοποιήθηκε δέσμη 50 ταχυτήτων με διαφοροποίηση 50m/sec μεταξύ των ταχυτήτων. Οι υπολογισμοί έγιναν μέσα σε παράθυρο πλάτους διπλάσιου του κυρίαρχου μήκους κύματος κάθε ορίζοντος. Στη συνέχεια υπολογίσθηκαν οι ενδιάμεσες ταχύτητες (DIX, 1955) μεταξύ των οριζόντων για την περίπτωση ασυμφωνίας (σχ.5) και ρήγματος (σχ.6).

Από την ερμηνεία της μεταβολής των ενδιάμεσων ταχυτήτων του ορίζοντα 4 του σχήματος 5 και των αντιστοίχων οριζόντων 12 και 13 του σχήματος 6, είναι σαφές ότι η λύση του ρήγματος είναι πλέον πιθανή, δεδομένου ότι οι ενδιάμεσες ταχύτητες κυμαίνονται μέσα σ' ένα παραδεκτό εύρος της τάξεως των 5500m/sec, ενώ στην περίπτωση της ασυμφωνίας υπάρχει μία μεταβολή των ταχυτήτων, αναμενόμενη βέβαια, η οποία όμως δίνει τιμές περίπου 4600 m/sec που είναι ασύμβατες με τα στοιχεία που υπάρχουν από την περιοχή (γεωτρήσεις, σεισμικά).

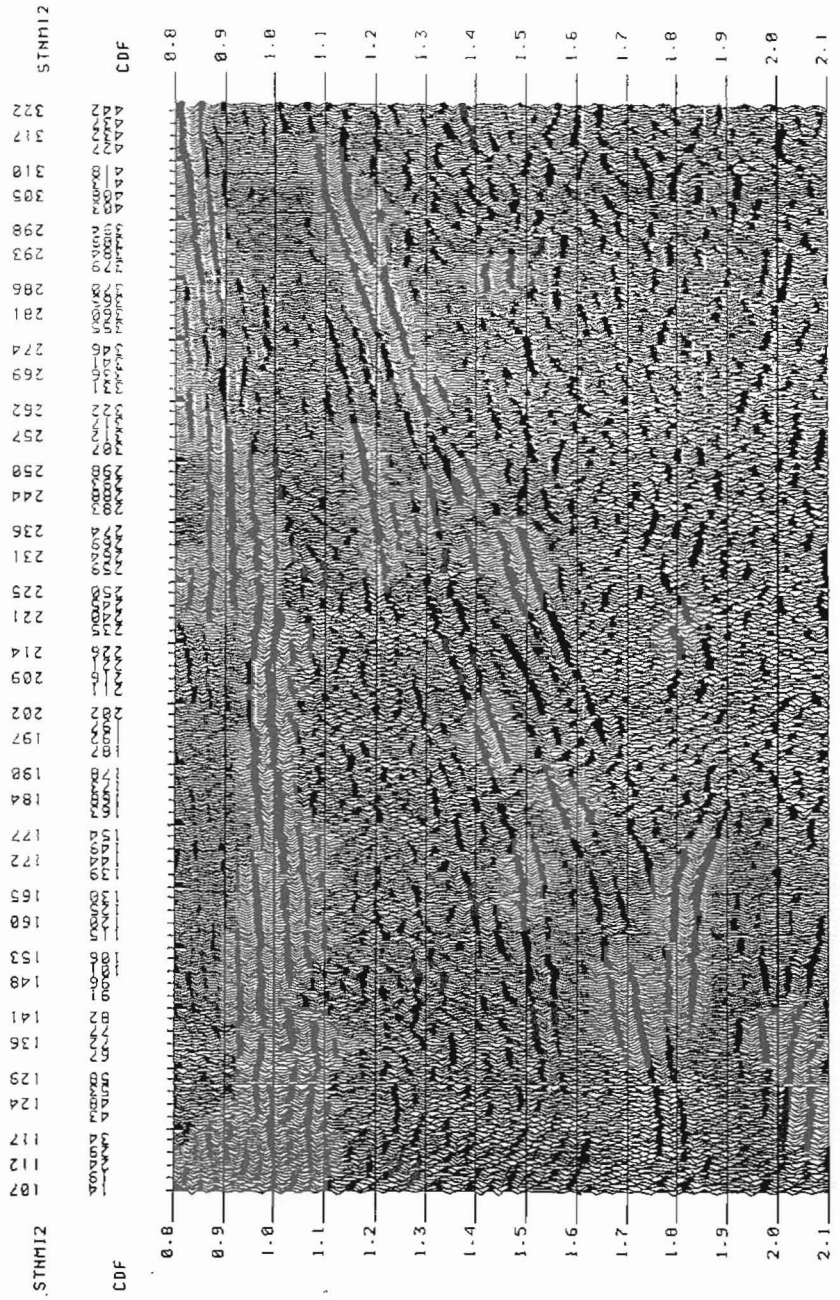
Για την λεπτομερέστερη μελέτη του ρήγματος χρησιμοποιήθηκε η ακτινική θεωρία. Σαν σημείο εκκίνησης χρησιμοποιήθηκε η υπέρθεση που έγινε με τις ταχύτητες που υπολογίσθηκαν με την μέθοδο της ανάλυσης ταχύτητας ορίζοντα. Ψηφιοποιήθηκαν ορισμένοι ορίζοντες (σχήμα 7) και με την βοήθεια της ακτινικής θεωρίας (σχήμα 8) το μοντέλο χρόνου μετατράπηκε σε μοντέλο βάθους (σχήμα 9).

Μετά τον υπολογισμό του καλύτερου δυνατού μοντέλου, η ακριβής θέση του ρήγματος προσδιορίστηκε με forward modeling του μοντέλου βάθους σε μοντέλο χρόνου (σχήμα 10) και σύγκριση με την αρχική τομή.

Τέλος, έγινε χωροθέτηση σε βάθος χρησιμοποιώντας την μέθοδο ω - x (σχήμα 11).

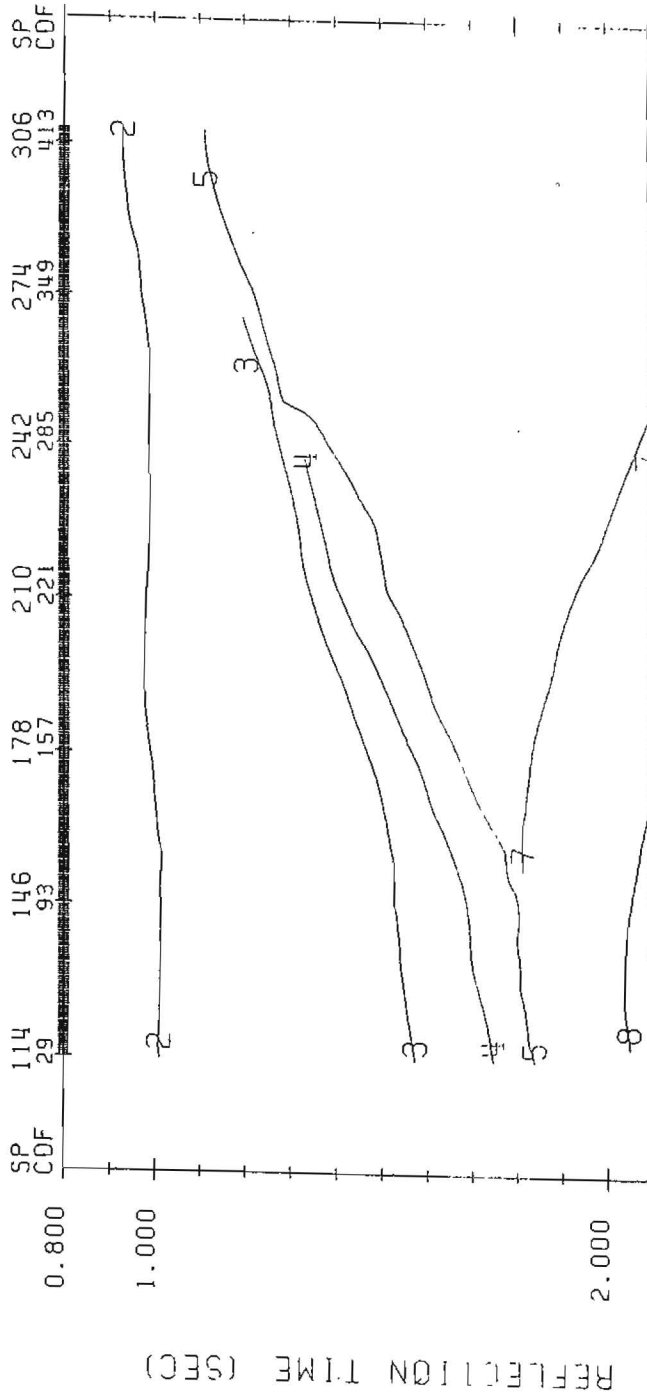


ΣΧ.1. Σεισμική τομή υπέρθεσης.



Σχ-2. Σεισμική τομή χαροθετημένη σε χρόνο.

DIGITISED HORIZONS INPUT FOR HVA



ΣΧ.3. Ορίζοντες για HVA.

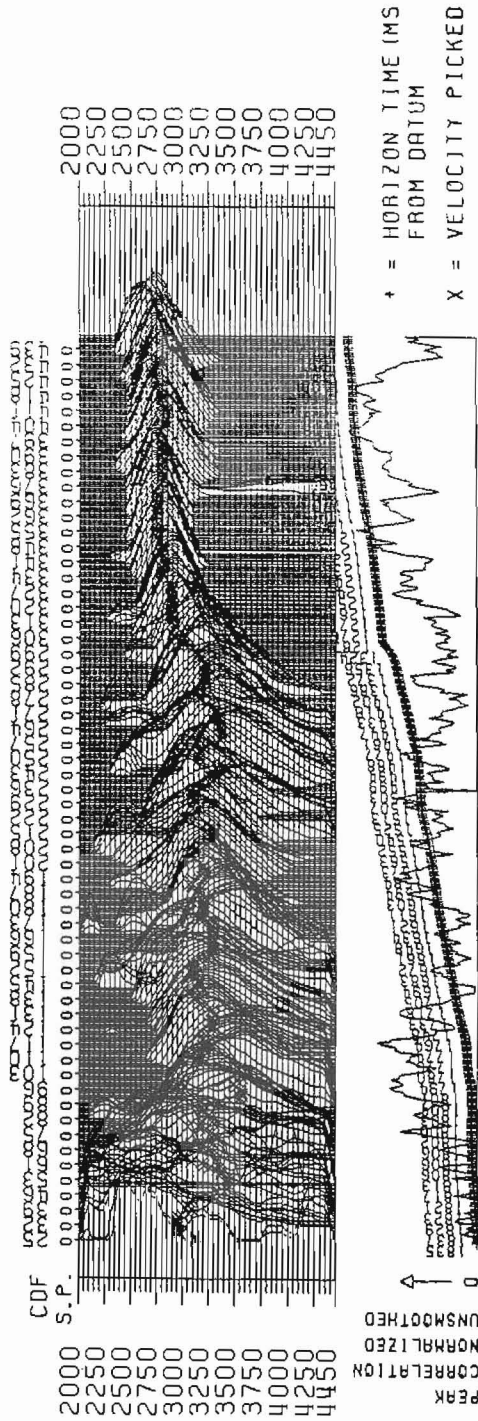
WGC HORIZON VELOCITY ANALYSIS

LINE HV-103 STN 101-421

HORIZON NO. 5, 5D VELOCITIES ANALYZED, VELOCITY INCREMENT = 50 MI/SEC

NUMBER OF TIME GATES = 3, GATE LENGTH = 48 MSEC, GATE INCREMENT = 24 MSEC, RATIO SUMMED = 1 1 1

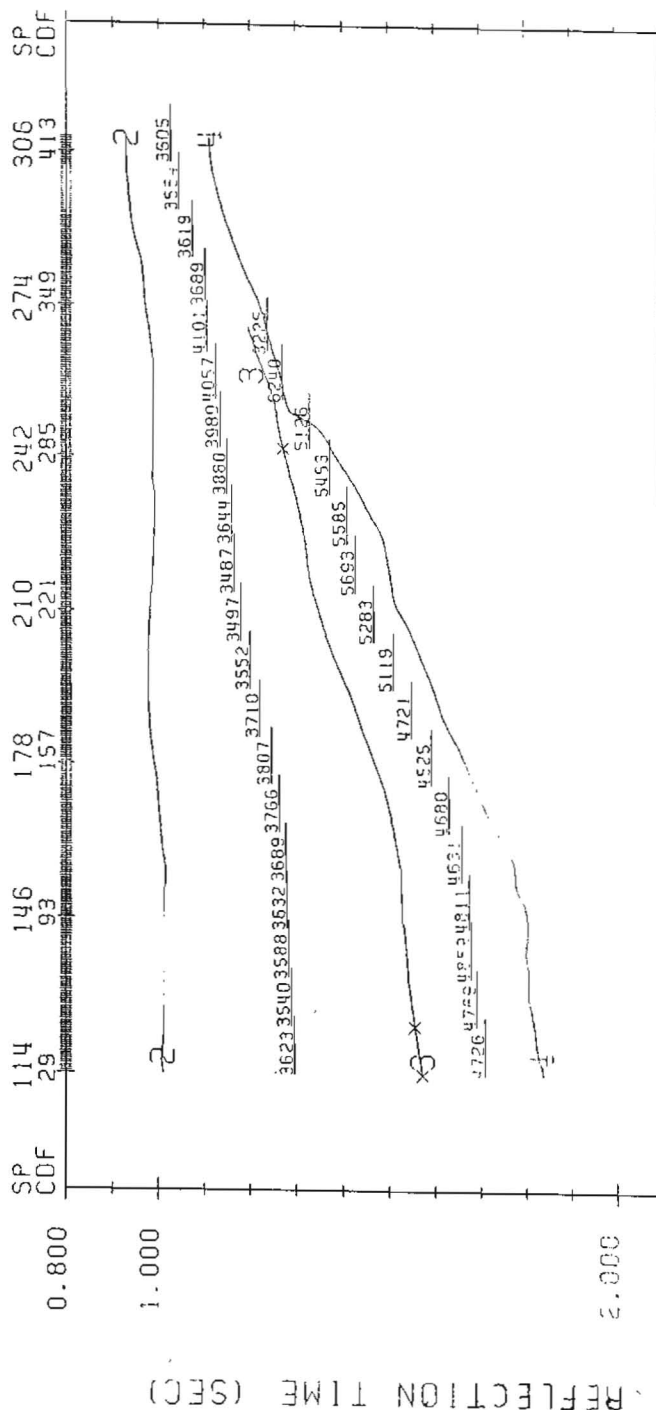
VELOCITIES SMOOTHED = 3, SUMS SMOOTHED = 5, CDF'S /SUM = 1, BIAS REMOVED = 90 %



MAXIMUM CORRELATION = 0.59 E 0

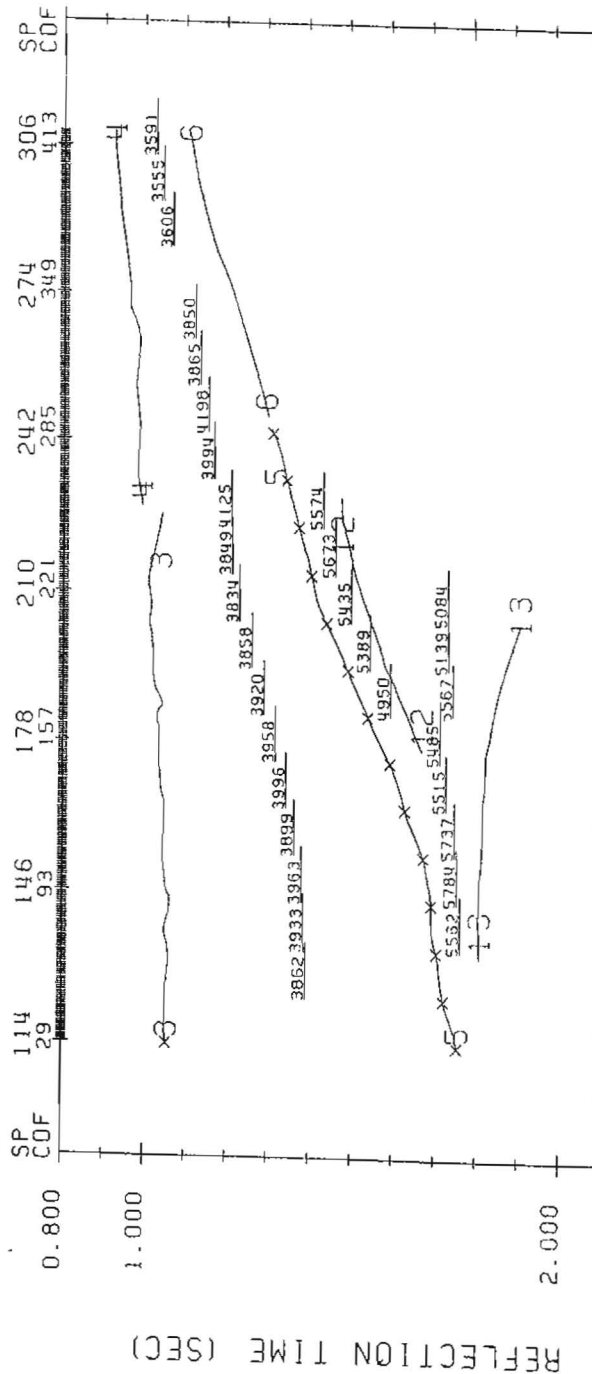
Σχ.4. Horizon Velocity Analysis.

INTERVAL VELOCITIES FROM HVA ANCONFORMITY

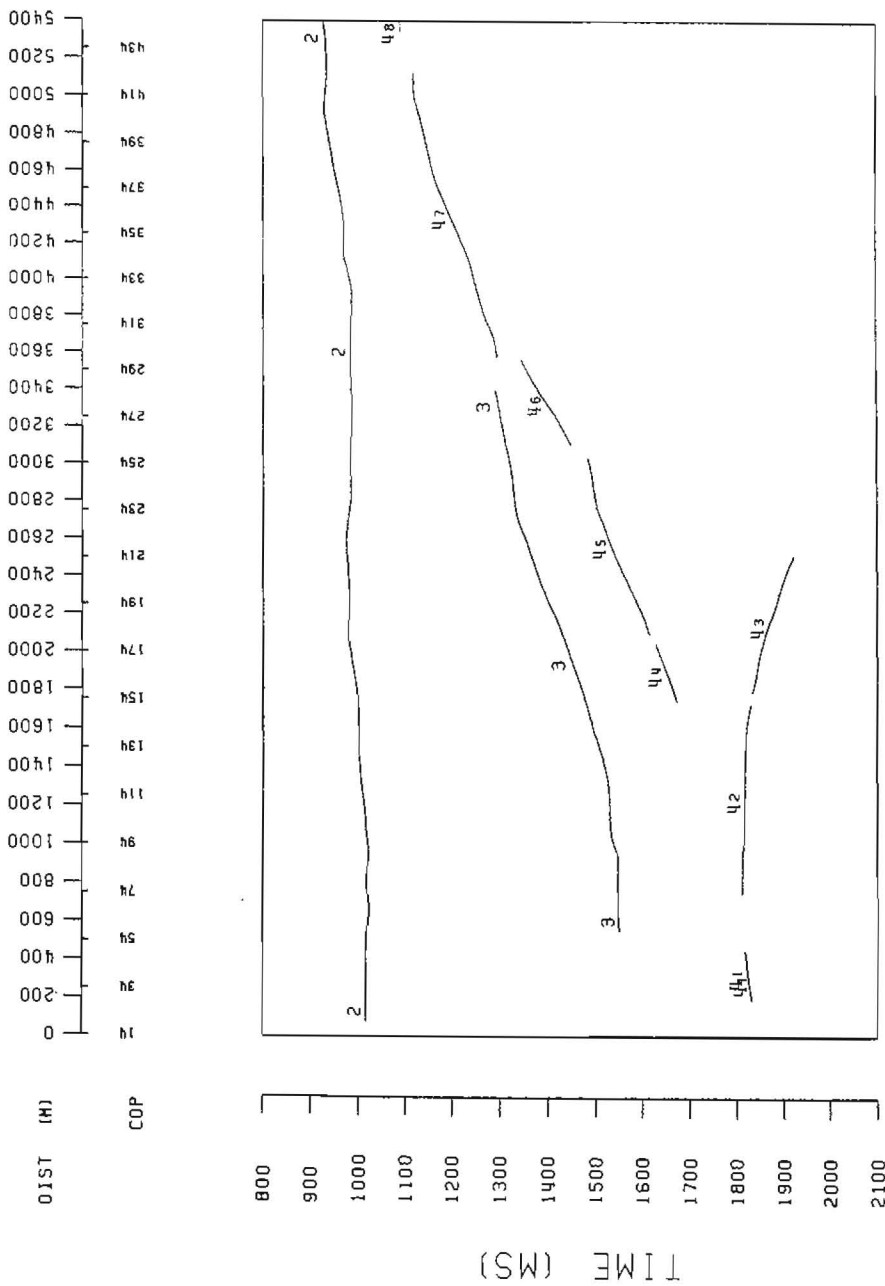


ΣΧ.5. Ενδιάμεσες ταχύτητες για ασυμφωνία.

INTERVAL VELOCITIES FROM HVA FAULT

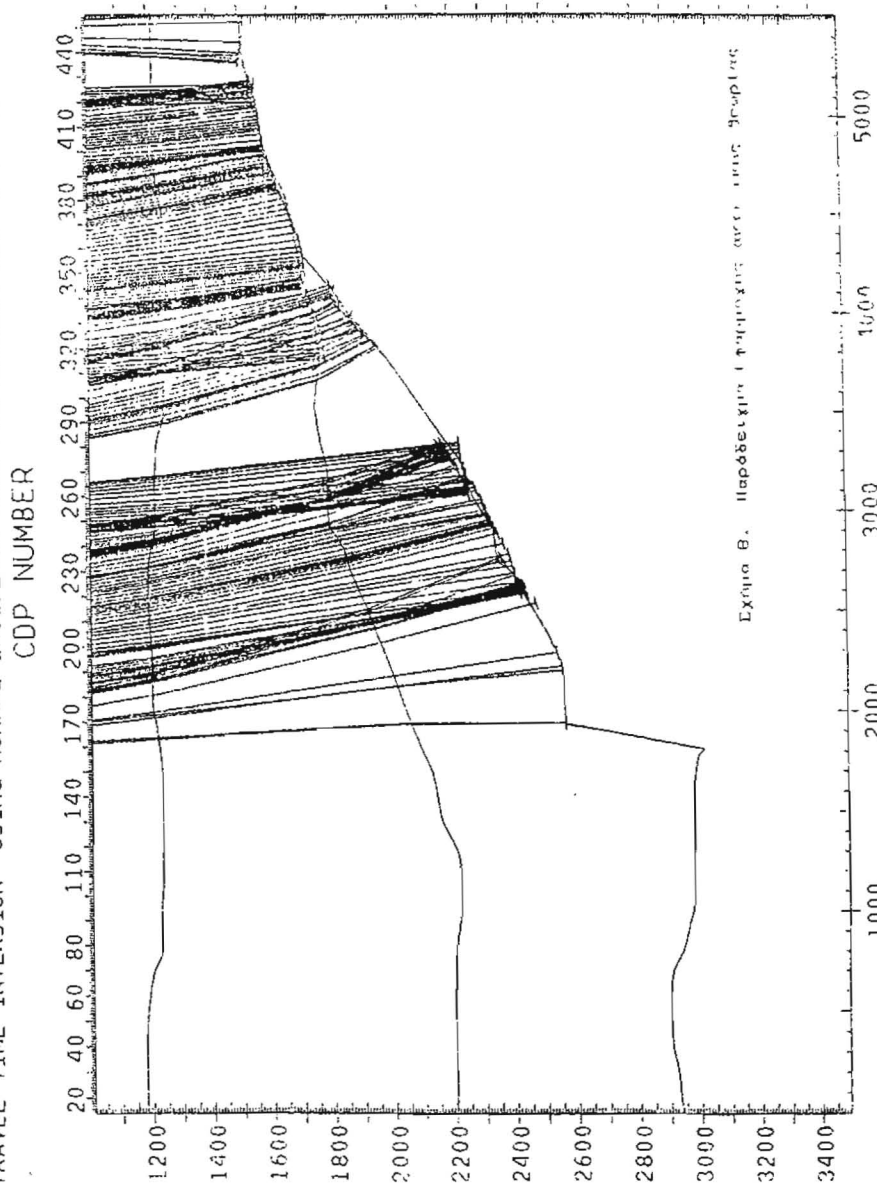


Σχ.6. Ενδιδίμεσες ταχύτητες για ρήγμα.

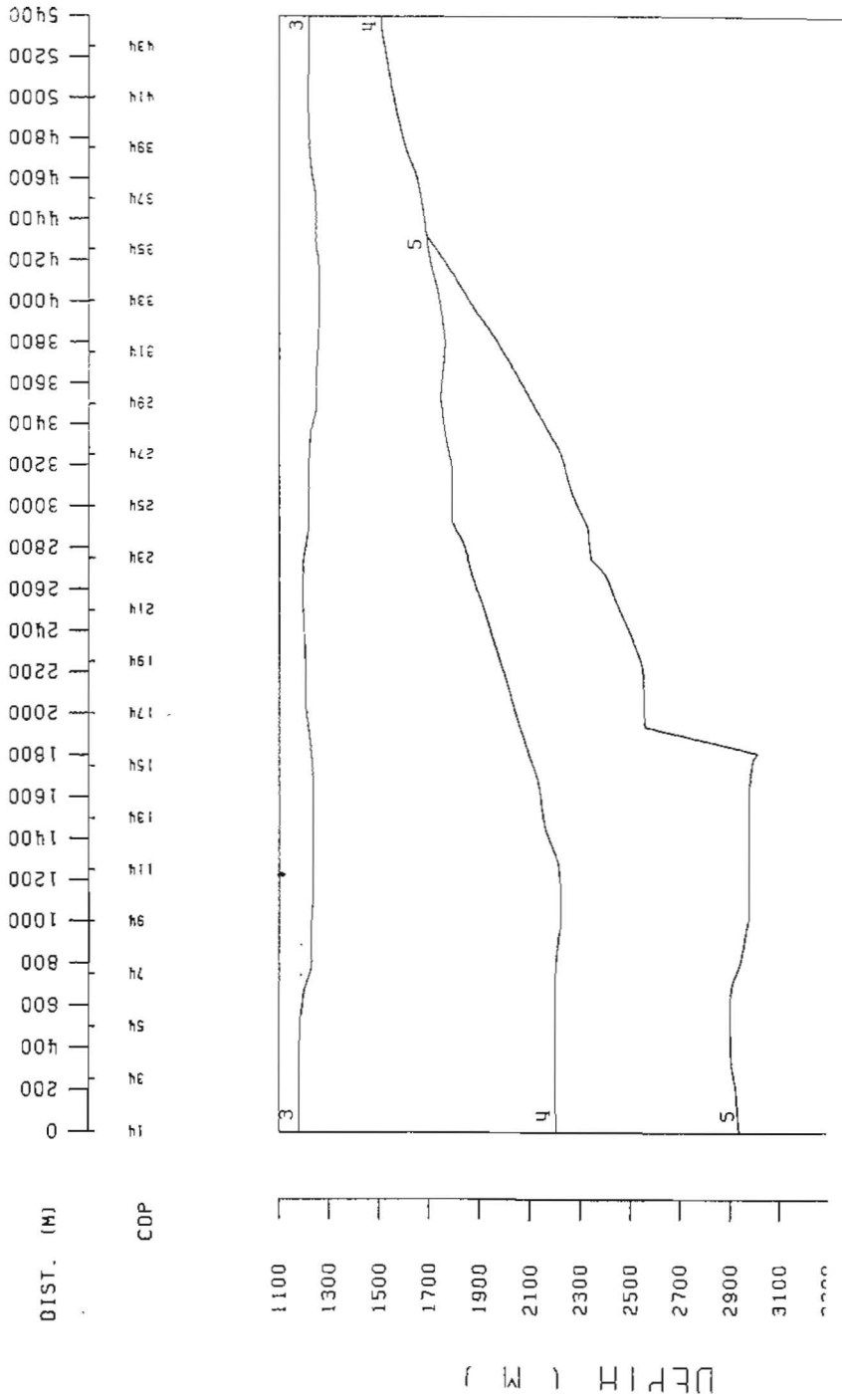


ΣΧ.7. Μοντέλο χρόνου.

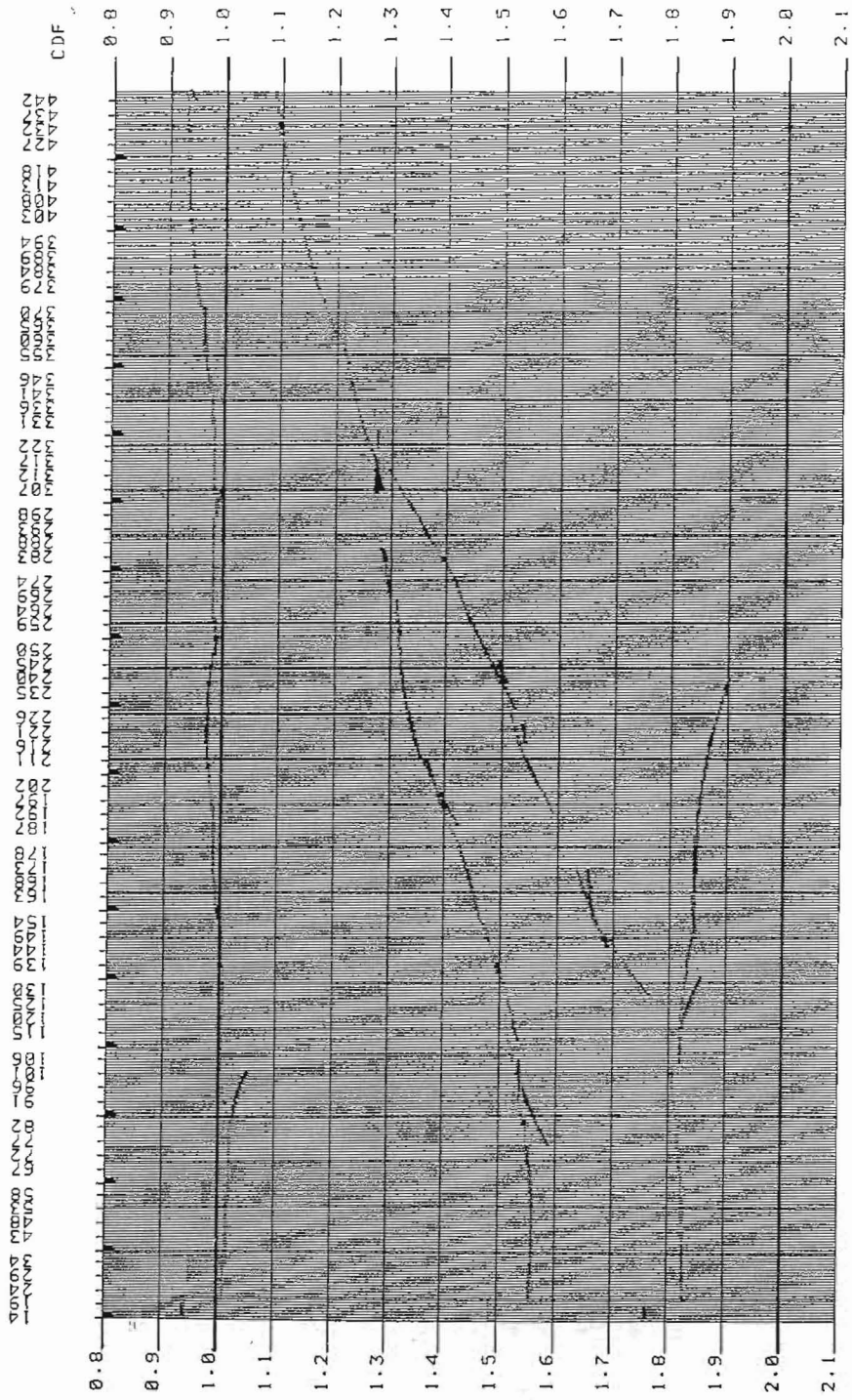
TRAVEL TIME INVERSION USING NORMAL INCIDENCE RAYS FOR HORIZON NO. 5 CMP SKIP = 1



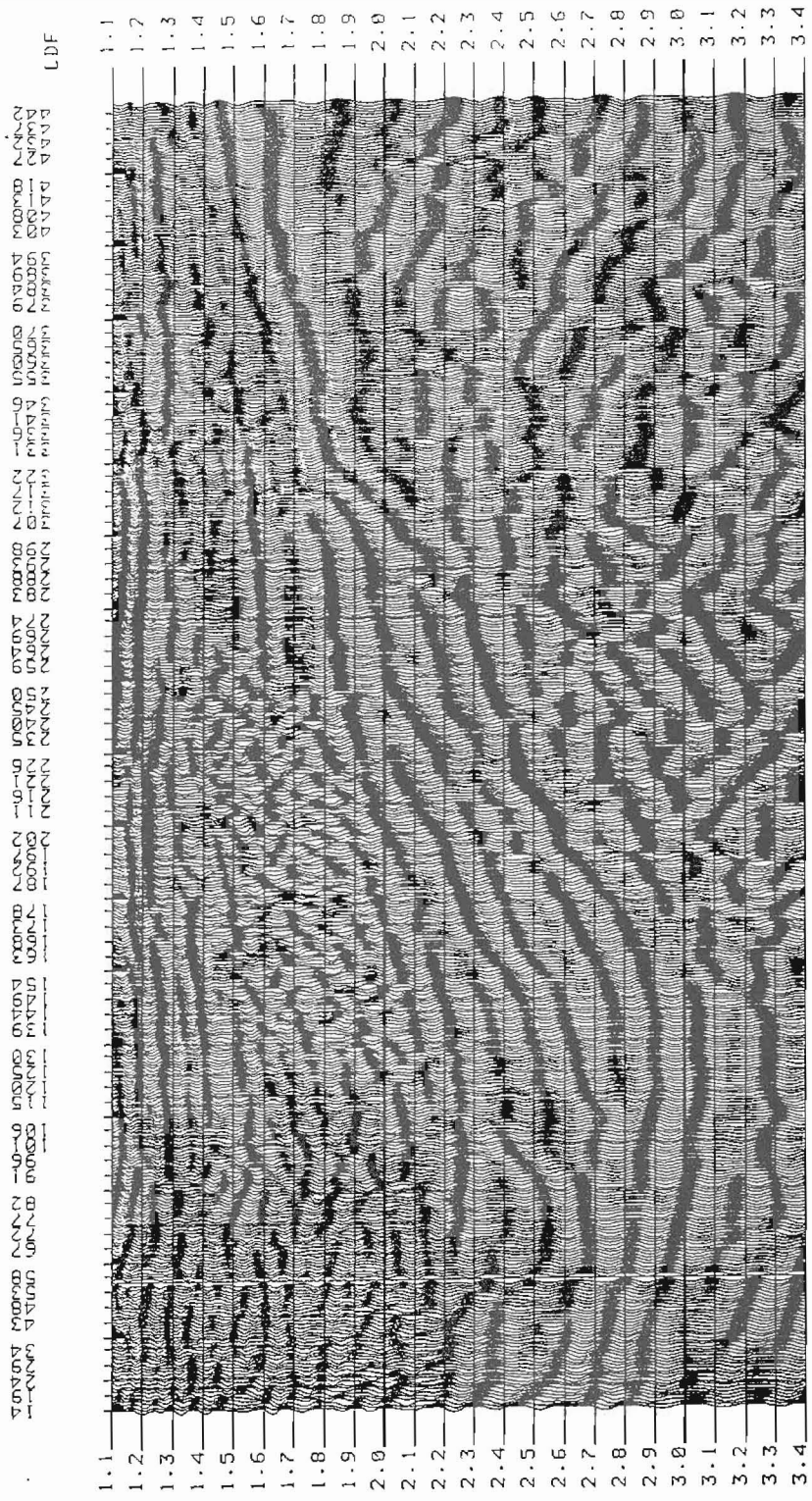
Σχ.8. Παράδειγμα εφαρμογής ακτινικής θεωρίας.



ΣΧ.9. Μοντέλο βάθους.



Σχ.10. Forward Modelling.



Σχ.11. Χωροθέτηση βάθους.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρησιμοποίηση αναλύσεων ταχύτητας κατά μήκος διακεκριμένων οριζόντων, της ακτινικής θεωρίας για τον υπολογισμό μοντέλων βάθους και, τέλος, της χωροθέτησης βάθους στην τελική ερμηνεία των σεισμικών τομών, βοηθά στον εντοπισμό τεκτονικών γεγονότων. Η εφαρμογή των μεθόδων σε μία σεισμική τομή ανακλάσεως από την περιοχή Κασσάνδρα της Χαλκιδικής οδήγησε στην αποσαφήνιση ενός ρήγματος που οριοθετεί μία Ηωκαινική λεκάνη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γρηγορίου,Ι., Λουκογιαννάκης,Μ., Μητσάκης,Δ., Τυράσκης,Π., (1988). Ακτινική και κυματική θεωρία στην ερμηνεία τεκτονικών γεγονότων . 4ο Γεωλογικό Επιστημονικό Συνέδριο, Αθήνα.
- Glearbout, J.F., (1985). Imaging the Earth's interior, Blackwell Scientific Publications.
- Dix, C.H., (1955). Seismic velocities from surface measurements. Geophysics vol. 20, p.p.68-86.
- Hubral, P., Krey, T., (1980). Interval velocities from seismic reflection time measurements, SEG, Tulsa, Oklahoma 203p.
- Kjartansson, E., (1978). Modeling and Migration using monochromatic wave equation, DEP report No 15.
- Laruer, K., Hatton, L., Eibson, B. and Hsu, I., (1981). Depth Migration of image time sections. Geophysics, vol. 46, pp 734-750.
- Larne, K., Hatton, L., Gibson, B., (1981). Migration of seismic data in inhomogenous media. Geophysics vol. 46, pp 751-767.