

## ΚΑΤΑΤΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

Κ.Κοτρόπουλος\* Ι.Πήτας\* Π.Τυράοκης\*\*

\* Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Θεσσαλονίκη 54006

\*\* Πολυτεχνείο Κρήτης

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρουσιάζουμε μια νέα μέθοδο για την ανάλυση υψής και την κατάτμηση των σεισμικών τμημάτων. Η μέθοδος βασίζεται στην ανίχνευση των σεισμικών οριζόντων και στον υπολογισμό των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων τους (π.χ μήκος, ένταση ανάκλασης, χαρακτήρα ανάκλασης). Αυτά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα αναπαριστούν την υψή της σεισμικής εικόνας. Οι ορίζοντες κατατάσσονται σε τάξεις σύμφωνα με ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Κάθε τάξη αναπαριστά ένα ξεχωριστό χαρακτηριστικό υψής της σεισμικής εικόνας. Μετά από αυτή την αρχική κατάταξη-ομοσώματωση τα σημεία κάθε οριζόντα χρησιμοποιούνται σαν πυρήνες για την κατάτμηση του σεισμικού τμήματος.

### ABSTRACT

A new method is presented in the texture analysis and segmentation of geophysical images. It is based on the detection of the seismic horizons and on the calculation of their features (e.g length, average reflection strength, signature). These features represent the texture of the seismic image. The horizons are clustered into classes according one or a multitude of their features. Each cluster represents a distinct texture characteristic of the seismic image. After this initial clustering, the points of each horizon are used as seeds for geophysical image segmentation. All pixels in the seismic image are clustered in those classes according to their geometric proximity to points lying on classified horizons. Thus the entire seismic trace is classified according to different seismic texture patterns. Two new methods are presented for pixel clustering according to their geometric proximity to reference points. The first one is based on Voronoi tessellation and on mathematical morphology. The second one is based on a "radiation" model for region growing.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην έρευνα για κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικών αερίων, οι γεωφυσικοί έρχονται αντιμέτωποι με το πρόβλημα της εκτίμησης της γεωλογίας του υπεδάφους σε βάθη ως 6000 μέτρα. Η σεισμική μέθοδος (reflection seismology) χρησιμοποιείται πλατιά για να συντεθεί μια ακριβής κατατομή του υπεδάφους. Σεισμική ενέργεια από μια έκρηξη ή άλλη τεχνητή σεισμική πηγή πάνω στην επιφάνεια της γης, διαδίδεται προς τα κάτω δια των πετρωμάτων. Εάν σημειώνονται διαφορές της ακουστικής αντίστασης μεταξύ των διαφόρων γεωλογικών στρωμάτων, τότε θα συμβεί ανάκλαση μέρους της σεισμικής ενέργειας από τα στρώματα των πετρωμάτων, η οποία θα ανιχνευτεί από δέκτες πάνω ή κοντά στην επιφάνεια της γης. Όπως είναι γνωστό, η έξαδος από τα γεώφωνα/υδρόφωνα είναι το σεισμικό ίχνος. Πολλά σεισμικά ίχνη συνθέτουν ένα σεισμικό τμήμα. Τα σεισμικά ίχνη είναι πολύ "θορυβώδη". Συνεπώς γίνονται αντικείμενο εκτεταμένης επεξεργασίας προτού χρησιμοποιηθούν στην ερμηνεία του υπεδάφους. Τέτοιες επεξεργασίες είναι η ουσώρευση (stacking), το φιλτράρισμα ταχυτήτων (velocity filtering), η αποσυνέλιξη (deconvolution) και η αντιμετώπιση των φαινομένων διάδοσης του κύματος (migration) [1,2,3]. Το επεξεργασμένο σεισμικό τμήμα συνιστά μια σχετικά ακριβή εικόνα της γεωλογίας του υπεδάφους. Το επόμενο βήμα στην έρευνα υδρογονανθράκων είναι να ερμηνευτούν τα σεισμικά τμήματα. Η σεισμική ερμηνεία [4] συσχετίζει τη σεισμική λεπτομέρεια (κυματομορφή, πλάτος ανάκλασης κ.τ.λ) με τη γεωλογική λεπτομέρεια, δηλαδή τη στρωματογραφία και τη φύση των έγκλειστων ρευστών.

Ένας ερμηνευτής, γενικά, ξεκινά με το πιο εμφανές χαρακτηριστικό γνώρισμα, συνήθως την ισχυρότερη ανάκλαση ή το γεγονός που κατέχει το πιο ξεχωριστό χαρακτήρα και το ακολουθεί, ενόσω παραμένει αξιόπιστο. Το επόμενο βήμα, η δομική ερμηνεία (structural interpretation), συνίσταται στο να αναγνωριστούν οι δομές ευρείας κλίμακας, που ενδεχομένως προέκυψαν, από τις διάφορες δυνάμεις που επέδρασαν πάνω στα ιζηματογενή πετρώματα. Αυτές οι δομές [2] ταξινομούνται γενικά σαν ρήγματα (faulting) ή πτυχώσεις (folding), χωρίς να αποκλείεται και συνδυασμένη εμφάνιση ρήγματος μαζί με πτύχωση. Τέτοιες ενδιαφέρουσες δομές είναι τα ρήγματα, τα αντίκλινα, οι θόλοι άλατος, οι ασυνέχειες κ.τ.λ. Μιά άλλη προ-σέγγιση στη σεισμική ερμηνεία είναι η σεισμική στρωματογραφία. Μέρη μιας ιζηματογενούς ακολουθίας μπορούν να διακριθούν από άλλα, σύμφωνα με τη γενική σεισμική εμφάνιση. Τα ακόλουθα σεισμικά δεδομένα (seismic facies elements) θα έπρεπε να ληφθούν υπόψη [5]:

πλάτος ανάκλασης, κυρίως συχνότητα, ταχύτητα διαστήματος, διαμόρφωση ανασκλάσεων (reflection configuration), συνέχεια ανασκλάσεων, γεωμετρία σεισμικών μορφών, αφθονία ανακλάσεων, παρουσία περιθλάσεων (diffractions).

Περιέχουν πληροφορία για τον τύπο της διαστρωμάτωσης, τη λιθολογία, την εναποθευτική διαδικασία και περιβάλλον κ.τ.λ.

Για παράδειγμα η ελεύθερη διαμόρφωση ανακλάσεων είναι χαρακτηριστική των υφάλων. Η παράλληλη διαμόρφωση ανακλάσεων είναι φυσιολογικά η πιο διαδεδομένη διαμόρφωση των ιζηματογενών πετρωμάτων. Συγκλίνουσα διαμόρφωση ανακλάσεων θα μπορούσε να προκληθεί είτε από διάτρηση (pinch out) είτε από διαφορική συμπίεση. Η τεμνόμενη (cross bedding) διαμόρφωση είναι χαρακτηριστική των ψαμμιτών και ουνιστά ένα διαγνωστικό κριτήριο για τα αμμολιθικά πετρώματα. Η οιζμοειδής και πλάγια διαμορφώσεις συμβαίνουν σε συνδυασμό με βαθμιαία (progradational) πρότυπα στην υφαλοκρηπίδα. Χαστική διαμόρφωση είναι χαρακτηριστική των δομών ροής (flow structures), των οποίων η εσωτερική δομή είναι περιπλοκή.

Η ερμηνεία των σεισμικών τμημάτων δεν έχει ακόμη αυτοματοποιηθεί, εξαιτίας του τεράστιου ποσού γνώσης που εμπλέκεται στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Το ανθρώπινο μυαλό μπορεί να διακρίνει τα διάφορα πρότυπα εξαιρετικά καλά και γενικά δεν έχει ξεπεραστεί από κανένα υπολογιστή. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιοι λόγοι για να χρησιμοποιούνται "υπολογιστικές" μέθοδοι, προκειμένου να βοηθηθεί ο ερμηνευτής. Τέτοιοι λόγοι είναι [6] ταχύτητα, συνέπεια, και συγκεκριμένος προσδιορισμός κριτηρίων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Στο παρελθόν σημειώθηκαν μερικές προσπάθειες να χρησιμοποιηθούν τεχνικές επεξεργασίας εικόνων και σημάτων στη σεισμική ερμηνεία. Μερικές τεχνικές επικεντρώνονται στην αυτόματη επιλογή ορίζοντων [7,8] είτε σε σεισμικό τμήμα μίας γραμμής είτε σε σεισμικά τμήματα που κλείνουν βρόγχο. Χρησιμοποιήθηκαν [7] τεχνικές ακολούθησης γραμμών, ακολούθησης τροχιών (contours), που είναι βασικές τεχνικές στο πεδίο της επεξεργασίας εικόνων. Παραμετρική περιγραφή του χαρακτήρα ανάκλασης (signature), συσχετίσεις ιχνών προκειμένου να προσδιοριστούν τα δύο μέρη ενός ρήγματος, προσαρμογή ιχνους σε αναδρομικό (AR) μοντέλο προτείνονται στο [8]. Χρήση θεωρίας των ασαφών συνόλων στη σεισμική ερμηνεία προτείνεται στο [9]. Μια προσέγγιση αναπαράστασης γνώσης στη σεισμική ερμηνεία περιγράφεται στο [10]. Η χρήση της υψής στην κατάτμηση σεισμικών εικόνων περιγράφεται στο [11]. Η τοπική υψή σε μια σεισμική εικόνα περιγράφεται με διάφορες μάσκες (templates). Τότε κάθε pixel θα μπορούσε να ταξινομηθεί συγκρίνοντας (matching) την τοπική υψή, όπως χαρακτηρίζεται από τα σεισμικά δεδομένα στη γειτονιά του (π.χ ένας NxN πίνακας με κεντρικό στοιχείο το εξεταζόμενο pixel) με αυτές τις μάσκες. Μια προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων προτείνεται για να εκφραστεί η γειτονιά γύρω από κάθε pixel σαν γραμμικός συνδυασμός με όρους τις μάσκες. Μία άλλη προσέγγιση για την περιγραφή υψής στο [11] είναι η χρήση μηκών ακολουθιών (run lengths) στα σεισμικά τμήματα. Κάθε pixel χαρακτηρίζεται από το μήκος της ακολουθίας στην οποία συμμετέχει. Τα pixels σε περιοχές που έχουν επιμήκη χαρακτηριστικά (π.χ μακριά παράλληλοι ορίζοντες τείνουν να έχουν μεγαλύτερα μήκη ακολουθιών, από τα pixels που ανήκουν π.χ σε περιοχές με χαστική διαμόρφωση ανακλάσεων. Συνεπώς, μια κατάτμηση του σεισμικού τμήματος σε περιοχές με μακριούς/κοντούς ορίζοντες θα μπορούσε να επιτευχθεί.

## 2. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Ο κύριος σκοπός της έρευνάς μας είναι να αναπτύξουμε μεθόδους για την κατάτμηση των σεισμικών τμημάτων σε χαρακτηριστικές ενότητες (clusters). Μ' άλλα λόγια αναζητούμε εκείνους τους συστηματικούς (τόσον από πλευράς θεωρίας τεχνητής όρασης, όσον και από μέρος της γεωφυσικής ερμηνείας) τρόπους που θα μας επιτρέψουν να διακρίνουμε περιοχές που παρουσιάζουν μια ειδοποιό διαφορά ως προς τις υπόλοιπες σ' ένα σεισμικό τμήμα. Οι περιοχές αυτές θα μπορούσαν να κληθούν συστατικές περιοχές του σεισμικού τμήματος. Τούτο σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα (features) των δομικών στοιχείων υψής (primitives) που χρησιμοποιούνται στην κατάτμηση πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε να αντιστοιχούν στις έννοιες που χρησιμοποιούν οι ερμηνευτές. Η γεωφυσική ερμηνεία βασίζεται κυρίως στους σεισμικούς ορίζοντες, τα χαρακτηριστικά τους και τις μεταξύ τους σχέσεις. Επομένως, χρησιμοποιήσαμε τους σεισμικούς ορίζοντες και τα χαρακτηριστικά τους:

μήκος, χαρακτήρας ανάκλασης (παραμέτροι που περιγράφουν τον παλμό Ricker π.χ zero-crossings, σχετικά με το μέγιστο πλάτη κορυφών και κοιλάδων, σημεία ημίσεος πλάτους, εύρη κορυφών), ένταση ανάκλασης, κατεύθυνση( συνολική και μερικές-τμηματικές κλίσεις)

σαν δομικά στοιχεία για την ανάλυση υψής του σεισμικού τμήματος. Αναλογίες με τα σεισμικά δεδομένα που πρέπει να ληφθούν υπόψη στη στρωματογραφική ερμηνεία διαπιστώνονται εύκολα, π.χ τα μήκη οριζόντων θα μπορούσαν να ληφθούν σαν ποσοτικός χαρακτηρισμός της συνέχειας ανακλάσεων, ενώ η κατεύθυντική πληροφορία θα μπορούσε να συσχετιστεί με τη διαμόρφωση ανακλάσεων κ.ο.κ. Σε κάθε pixel που ανήκει σε οριζόντα αποδίδεται η τιμή του γνωρίματος που χαρακτηρίζει είτε ολόκληρο τον οριζόντα είτε τμήματά του (π.χ μερική τμηματική κλίση). Η συχνότητα εμφάνισης κάθε τιμής του χαρακτηριστικού γνωρίματος δημιουργεί το ιστόγραμμα αυτού του γνωρίματος. Οι ορίζοντες μπορούν να συσχετισθούν σε διάφορες τάξεις προσδιορίζοντας κατώφλια πάνω στα ιστόγραμματα των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων. Προσδιορίζοντας λ.χ κατώφλια στο ιστόγραμμα έντασης ανάκλασης μπορούμε να ξεχωρίσουμε δύο υποσύνολα τους ισχυρούς και ασθενείς ορίζοντες. Κάθε ορίζοντας έχει μια θέση στην εικόνα. Στις περισσότερες περιπτώσεις όλοι οι ορίζοντες που ονομάστηκαν αδύναστοι τείνουν επίσης να συγκεντρώνονται στην ίδια περιοχή της εικόνας. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι ορίζοντες που έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά δημιουργούνται και από γεωλογικούς οχηματισμούς με παρόμοια χαρακτηριστικά και εντοπίζονται στην ίδια περιοχή στο υπέδαφος. Ωστόσο, αυτή η συσχέτιση σε ενότητες δεν είναι πλήρης. Μόνο τα pixels που αντιστοιχούν στους σεισμικούς ορίζοντες έχουν ταξινομηθεί. Όλα τα άλλα pixels δεν έχουν συσχετισθεί σε ενότητες. Τούτα θα μπορούσαν να εκχωρηθούν σε περιοχές ανάλογα με τη

γεωμετρική εγγύτητά τους στους σεισμικούς ορίζοντες. Μιά ανάλογη προσέγγιση θα μπορούσε να ακολουθηθεί όταν χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα (λ.χ. αναζητείται να προσδιοριστούν περιοχές που να έχουν κοντούς και δυνατούς ορίζοντες). Αν  $m$  χαρακτηριστικά γνωρίσματα χρησιμοποιούνται, τότε  $m$ -διάστατα ιστογράμματα πρέπει να υπολογιστούν. Επιλέγοντας κατώφλια, μπορούμε πάλι να ουσιοσωματώσουμε τους ορίζοντες με παρόμοια χαρακτηριστικά σε διάφορες τάξεις. Ακολουθώς, μπορούμε να προχωρήσουμε στην ανάπτυξη περιοχών, όπως έχει περιγραφεί προηγουμένως. Η προσέγγισή μας για την περιγραφή της υψής της σεισμικής εικόνας και την ανάπτυξη περιοχών απαιτεί τα ακόλουθα βήματα:

1. περιγραφή των δομικών στοιχείων σεισμικής υψής με όρους των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων οριζόντων
2. ακολουθήση οριζόντων
3. υπολογισμό ιστογραμμάτων μίας ή περισσότερων διαστάσεων
4. προσδιορισμό κατωφλίων στα ιστογράμματα οριζόντων
5. ουσιομάτωση σε περιοχές των pixels ανάλογα με τη γεωμετρική εγγύτητά τους στους σεισμικούς ορίζοντες.

Τα βήματα (1)-(4) βασίζονται κυρίως στην εμπειρία. Επομένως, εκτελούνται από τον "ερμηνευτή "διαλογικά". Ο ερμηνευτής διαλέγει μια περιοχή από το σεισμικό τμήμα που είναι χαρακτηριστική της σεισμικής υψής και ζητά από το σύστημα να ακολουθησει τους ορίζοντες και να υπολογισει τα χαρακτηριστικά γνωρίσματά τους. Έπειτα επιλέγει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά γνωρίσματα και παραγγέλλει στο σύστημα να υπολογισει τα μονοδιάστατα/πολυδιάστατα ιστογράμματα. Επιλέγει κατώφλια στο σεισμικό τμήμα και δημιουργεί τους κανόνες περιγραφής της σεισμικής υψής. Ας υποθέσουμε ότι  $m$  χαρακτηριστικά γνωρίσματα  $a_1, \dots, a_m$  χρησιμοποιούνται στην περιγραφή της σεισμικής υψής. Έστω επίσης  $X_1, \dots, X_k$  ότι είναι τα  $k$  διαφορετικές ενότητες υψής. Ένας ορίζοντας  $h$  εκχωρείται στην ενότητα  $k$ , εάν ικανοποιεί ένα κανόνα απόφασης της μορφής:

$$\text{Εάν } L(P_1, P_2, \dots, P_m), \text{ τότε } h \in X_k \quad (1)$$

όπου  $L$  είναι μια λογική πρόταση και  $P_i, i=1, \dots, m$  είναι ιδιότητες (predicates) της μορφής:

$$P_i : a_i < T_i \quad (2)$$

$a_i, T_i, i=1, \dots, m$  είναι τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα και τα αντίστοιχα κατώφλια. Εάν είναι γνωστή η επιλογή των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων οριζόντων, τότε η επιλογή των βέλτιστων κατωφλίων και του βέλτιστου κανόνα μπορεί να γίνει αυτόματα από μια διαδικασία εκμάθησης (learning) που περιγράφεται στο [12]. Ο ερμηνευτής παρουσιάζει στο σύστημα περιοχές με διαφορετική υψή. Το σύστημα υπολογίζει τα βέλτιστα κατώφλια  $T_1, \dots, T_m$ , που επιτυγχάνουν να διακρίνουν τα διάφορα πρότυπα υψής. Βρίσκει το βέλτιστο κανόνα (1) για οναγνώριση υψής. Μπορεί, επίσης, να απορριψει χα-

ρακτηριστικά γνωρίσματα που δεν έχουν διακριτική ικανότητα στην περιγραφή υψής. Το κριτήριο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται είναι η ελάχιστη εντροπία.

### 3. ΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΓΝΩΡΙΣΜΑΤΩΝ

Ένας σεισμικός ορίζοντας περιγράφεται σαν λίστα της ακόλουθης μορφής:

```
struct horizon_point{
    int dttime;      /* χρόνος διπλής διαδρομής */
    int trace;      /* σε ποιο ίχνος ανήκει ο κόμβος */
    unsigned long marker;
    /* χαρακτηριστικό γνώρισμα που εκχωρείται σε κάθε κόμβο */
    struct horizon_point *nextpoint;
    /* δείκτης στον επόμενο κόμβο */
};
```

Πληροφορία σχετικά με τα τοπικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα (π.χ τοπική ένταση ανάκλασης, τοπική κατεύθυνση κ.τ.λ) σε κάθε σημείο του ορίζοντα αποθηκεύονται σε κάθε κόμβο του ορίζοντα. Συνολική πληροφορία (π.χ μήκος ορίζοντα, μέση ένταση ανακλάσεων, μεταβλητότητα έντασης ανακλάσεων, συνολική κλίση ορίζοντα) αποθηκεύονται στην κεφαλή της λίστας. Αυτόματη ακολούθηση οριζόντων έχει επιχειρηθεί εκτεταμένα στη βιβλιογραφία [7,8,10]. Χρησιμοποιούμε μια μέθοδο ανάλογη μ' αυτήν που περιγράφεται στο [10]. Η ακολούθηση οριζόντων θεωρείται ακολούθηση μεχίστων ανάκλασης, που υπερβαίνουν ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Η σεισμική εικόνα, προηγουμένως, φιλτράρεται με μη- γραμμικά φίλτρα[10,13] που οξύνουν τα μέγιστα ανάκλασης. Έτσι παράγονται λιγότερο "οδοντωτοί" ορίζοντες.

Έστω  $I(i,j)$  η συνάρτηση εικόνας που παριστά την ένταση ανάκλασης στο pixel  $(i,j)$ , όπου  $i$  συμβολίζει αριθμό σεισμικού ίχνους (οριζόντια χωρική μεταβλητή) και  $j$  συμβολίζει χρόνο διπλής διαδρομής (κατακόρυφη χωρική μεταβλητή). Η ένταση ανάκλασης έχει κωδικοποιηθεί σε 256 επίπεδα γκριζου. Άς υποθέσουμε ότι θέλουμε να ακολουθήσουμε έναν ορίζοντα και ότι βρισκόμαστε στο pixel  $(i,j)$  που είναι ένα τοπικό μέγιστο ανάκλασης στο  $i$ -στό ίχνος σε βάθος  $j$  (msec). Τότε τα pixels  $(i+1,j-1)$ ,  $(i+1,j)$ ,  $(i+1,j+1)$  εξετάζονται για πιθανή επέκταση του ορίζοντα. Μόνο εκείνα τα pixels που έχουν τιμή επιπέδου γκριζου από το επιλεγμένο κατώφλι κρατιούνται. Εάν περισσότερα από ένα υποψηφία pixels προς επέκταση παραμένουν, τότε αποφασίζουμε επέκταση προς εκείνο το pixel που έχει τη μέγιστη τιμή. Εάν υπάρχει σάφεια (π.χ περισσότερα από ένα pixels-διάδοχοι που έχουν ίση μέγιστη ένταση) αποφασίζουμε επέκταση προς τον πιο ευθυγραμμισμένο υποψηφίο διάδοχο. Το κριτήριο της ευθυγράμμισης οφείλεται με τον υπολογισμό των προηγούμενων και όλων των δυνατών τρεχουσών κλίσεων επέκτασης καθώς και των οπέλυτων διαφορών τους σε συνολική και τοπική ένταση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για τις επόμενες επεκτάσεις

του ορίζοντα. Ο ορίζοντας ακολουθείται μέχρι ένα pixel που η έντασή του πέφτει κάτω από το κατώφλι. Σημειώνουμε ως "μαρκαρισμένα" όλα τα pixels που συμμετέχουν στον ορίζοντα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για ένα νέο ορίζοντα. Μια πιο ακριβής ακολουθήση οριζόντων, που υλοποιήσαμε, λαμβάνει υπ' όψη μόνο τοπικά μέγιστα (χνους όχι μόνο όταν ένας ορίζοντας ξεκινά, αλλά και όταν επεκτείνεται. Επίσης επιτρέπουμε περισσότερους υποψήφιους να εισέρχονται στη διαδικασία επέκτασης (τα pixels  $(s,t)$  όπου  $s=i+1, i+2$  και  $t=j-2, \dots, j+2$ ). Παρόμοια κριτήρια χρησιμοποιούνται επίσης.

Μετά την ακολουθήση οριζόντων, υπολογίζεται η τοπική και συνολική πληροφορία, που αναφέρεται σε κάθε ορίζοντα. Ο υπολογισμός των περισσότερων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων (π.χ μήκος ορίζοντα, μέση ένταση ανάκλασης) είναι απλός και άμεσος. Η τοπική κλίση υπολογίζεται βροκοκοντας τη γραμμική τμηματική προσέγγιση (linear piecewise approximation) του ορίζοντα. Ο υπολογισμός και η αναπαράσταση του χαρακτήρα ανάκλασης είναι πιο πολύπλοκοι. Χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο των 14 παραμέτρων που προτείνεται στο [8]. Αυτές οι παράμετροι υπολογίζονται και αποθηκεύονται σε κάθε κόμβο της λίστας. Επιπλέον μια μέση "signature" αποθηκεύεται στην κεφαλή της λίστας. Βασισμένοι στο [11], υλοποιήσαμε μια τεχνική ακολουθήσης γενικευμένων ακολουθιών (generalized runs) που μας επιτρέπει να λάβουμε υπ' όψη μη οριζόντιους ανακλώντες ορίζοντες, που είναι και η γενική περίπτωση. Συγκεκριμένα, μετατρέπουμε το σεισμικό τμήμα σε διαδικτική εικόνα, όπου κάθε pixel παίρνει την τιμή "ένα", όταν στην αρχική εικόνα είχε τιμή πάνω από ένα κατώφλι, αλλιώς παίρνει την τιμή "μηδέν". Δηλαδή, μετατρέπουμε τα σεισμικά χνους σε παλμοσειρές, οπότε το πρόβλημα της ακολουθήσης της γενικευμένης ακολουθίας συνίσταται στο να εξακριβώνουμε αν υπάρχει επικάλυψη παλμών μεταξύ των χνών.

Εάν οι ορίζοντες έχουν ακολουθηθεί και τα χαρακτηριστικά τους γνωρίσματα υπολογιστεί, τότε η κατασκευή των μονοδιάστατων/πολυδιάστατων ιστογραμμάτων είναι μια απλή υπόθεση. Εάν τα κατώφλια απόφασης και οι σχετικοί κανόνες έχουν επιλεγθεί είτε από τον ερμηνευτή είτε από μια διαδικασία εκμάθησης [12], η ταξινόμηση των pixels που συμμετέχουν σε ορίζοντες (δηλαδή, η ταξινόμηση των οριζόντων) εκτελείται εφαρμόζοντας τις σχέσεις (1) και (2). Υπολείπεται η "διάδοση" αυτής της ουσωμάτωσης στην υπόλοιπη σεισμική εικόνα.

#### 4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Αυτό που μας εμποδίζει να εφαρμόσουμε τις κλασικές τεχνικές ανάπτυξης περιοχών [14,15] είναι ότι τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που εξαγάγαμε σναφέρονται μόνο στα pixels που συμμετέχουν στους ορίζοντες, ενώ στην κλασική κατάτμηση εικόνων χρώμα, γνωρίσματα υψής, επίπεδο γκριζου κ.ο.κ χαρακτηρίζουν κάθε pixel στην εικόνα που πρόκειται να κατατμηθεί. Η ανάπτυξη περιοχών εξαρτάται από την τάξη που εξετάζουμε τα pixels για ομοιότητα και τους πυρήνες (seeds)

που χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη των περιοχών. Στην περίπτωση μας πυρήνες για την ανάπτυξη περιοχών είναι προφανώς τα pixels πάνω στους ορίζοντες. Πρέπει, λοιπόν, να συνάξουμε τί πληροφορία να εκχωρήσουμε στα άλλα pixels που δεν συμμετέχουν σε ορίζοντες, υποθέτοντας ότι τα pixels κοντά στους ορίζοντες θα συμπεριφέρονται παρόμοια. Επομένως, πρέπει να εξετάσουμε την έννοια της εγγύτητας παρά της ομοιότητας.

Η απλούστερη προσέγγιση θα ήταν να "διαδώσουμε" την ιδιότητα ενός pixel ορίζοντα σ' όλα τα pixels κοντά σ' αυτό δηλαδή σ' όλα pixels είναι μεταξύ των δύο zero-crossings εκατέρωθεν του pixel που ανήκει στον ορίζοντα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλους τους ορίζοντες. Διαπιστώνεται ότι ένα τέτοιο σχήμα λαμβάνει υπ' όψη τη φύση των σεισμικών τμημάτων. Επιβάλλεται η χρήση ενός mode φίλτρου [16] είτε ενός median φίλτρου, για να συμπληρωθούν τα πιθανά κενά.

Μια δεύτερη προσέγγιση στην ανάπτυξη περιοχών βασίζεται σ' ένα συνδυασμό της Voronoi tessellation [17] και της μαθηματικής μορφολογίας [18]. Τα pixels οριζόντων χρησιμοποιούνται σαν πυρήνες της Voronoi tessellation της σεισμικής εικόνας. Διογκώνονται με διαδοχικά βήματα μέχρις ότου να καλύψουν ολόκληρη την εικόνα. Σε κάθε βήμα ελέγχεται εάν οι περιοχές που προέρχονται από ορίζοντες της ίδιας τάξης έχουν κοινό σύνορο. Εάν έτσι συμβαίνει αυτές οι περιοχές συγχωνεύονται. Το σύνορο (εάν υπάρχει τέτοιο) ανάμεσα σε διαφορετικές τάξεις, παγώνει σε κάθε βήμα. Η ανάπτυξη περιοχών γίνεται εκτελώντας υπό συνθήκη διόγκωση (conditional dilatation) [18]. Έστω  $X_k$ ,  $k=1, \dots, K$  ότι είναι τα υποσύνολα του  $Z^2$  που αναπαριστούν pixels της εικόνας που ανήκουν σε κάθε ενότητα υψής. Έστω  $X_k(i)$ ,  $k=1, \dots, K$  ότι είναι τα σύνολα που αναπαριστούν τις ενότητες υψής στο (i) βήμα της διαδικασίας ανάπτυξης περιοχών. Στο βήμα (0),  $X_k(0) = X_k$  και περιέχουν τα pixels που ανήκουν στην ενότητα  $k$ . Έστω  $B$  ένα σύνολο που καλείται δομικό στοιχείο, του οποίου το μέγεθος ισούται με το μέγεθος της περιοχής που αναπτύσσεται σε ένα βήμα. Το σχήμα του καθορίζει τη γεωμετρία της ανάπτυξης της ενότητας. Αν απαιτείται ομοιόμορφη ανάπτυξη σ' όλες τις διευθύνσεις το δομικό στοιχείο πρέπει να είναι ένας δίσκος. Σαν τέτοιο χρησιμοποιήθηκε το δομικό στοιχείο CIRCLE. Η ανάπτυξη περιοχών στο βήμα (i) δίνεται από την ακόλουθη αναδρομική σχέση:

$$X_k(i) = [X_k(i-1) \oplus B] \cap \left\{ \bigcup_{\substack{e=1 \\ e \neq k}}^K X_e(i-1) \right\} \quad (3)$$

όπου  $\oplus$ ,  $\cap$ ,  $\cup$ , συμβολίζουν τη διόγκωση, τομή και ένωση συνόλων [18]. Η εξίσωση (3) επιτρέπει την ανάπτυξη μιας ενότητας  $k$  σε pixels της εικόνας που δεν έχουν εκχωρηθεί σ' άλλες ενότητες. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι υπερτονίζει λεπτομέρειες που βρλοκονται μέσα σε μεγαλύτερες περιοχές και μάλλον αντιστοιχούν σε θόρυβο.

Το τρίτο σχήμα, που είναι περισσότερο αναλοητο σε θόρυβο, βασίζεται στο ακόλουθο ναπικό πείραμα: Ας υποθέσουμε ότι κάθε pixel που ανήκει σε ορίζοντα ακτινοβολεί σύμφωνα με τον νόμο  $1/r$ . Δηλαδή, η ακτινοβολία που

λαμβάνεται στο pixel  $(i,j)$  είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης αυτού του pixel από το ακτινοβολούν pixel που ανήκει σε ορίζοντα. Εάν όλα τα pixels που ανήκουν στην ίδια τάξη ακτινοβολούν στην ίδια συχνότητα, τότε η ενέργεια που λαμβάνεται στο pixel  $(i,j)$  είναι το άθροισμα της ακτινοβολίας από κάθε pixel αυτής της τάξης. Το pixel  $(i,j)$  εκχωρείται στην τάξη που στέλνει τη μέγιστη ακτινοβολία. Υλοποιώντας αυτήν την τεχνική, αποφεύγουμε να έχουμε μικρές κηλίδες θορύβου μέσα σε μεγαλύτερες περιοχές. Το πρότυπο ακτινοβολίας περιγράφεται με όρους μιας συνάρτησης της μορφής:

$$h(i,j) = c/r - c \cdot [(i/a)^2 + (j/b)^2]^{-1/2} ; r < R \quad (4)$$

Έστω  $x_k$  συμβολίζει τη θέση των ακτινοβολούντων pixels, που ανήκουν στην  $k$  ενότητα:

$$x_k(i,j) = \sum \delta(i_k - i, j_k - j) \quad (i_k, j_k) X_k \quad (5)$$

όπου  $\delta(i,j)$  είναι η δι-διάστατη δέλτα συνάρτηση. Η ακτινοβολία  $y_k(i,j)$  που λαμβάνεται σε κάθε pixel  $(i,j)$  δίνεται από την :

$$y_k(i,j) = x_k(i,j) ** h(i,j) \quad (6)$$

όπου  $**$  δηλώνει δι-διάστατη συνέλιξη. Το pixel  $(i,j)$  εκχωρείται στην τάξη  $l$  για την οποία:

$$y_l(i,j) = \max_{1 \leq k \leq K} y_k(i,j) \quad (7)$$

Το μόνο μειονέκτημα αυτού του μοντέλου της ανάπτυξης περιοχών είναι η υπολογιστική πολυπλοκότητά του, επειδή απαιτεί  $K$  2-d συνέλιξεις. Εάν ομοιόμορφη ανάπτυξη περιοχών προς όλες τις διευθύνσεις, ένα κυκλικό πρότυπο ακτινοβολίας εμπλέκεται επιλέγοντας  $a=b=1$ . Ωστόσο, στις σεισμικές εφαρμογές πρότυπα ακτινοβολίας επιμήκη κατά την οριζόντια διεύθυνση είναι προτιμότερα, γιατί οι περιοσότερες γεωλογικές δομές είναι επιμήκεις κατά την οριζόντια διεύθυνση.

## 5. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

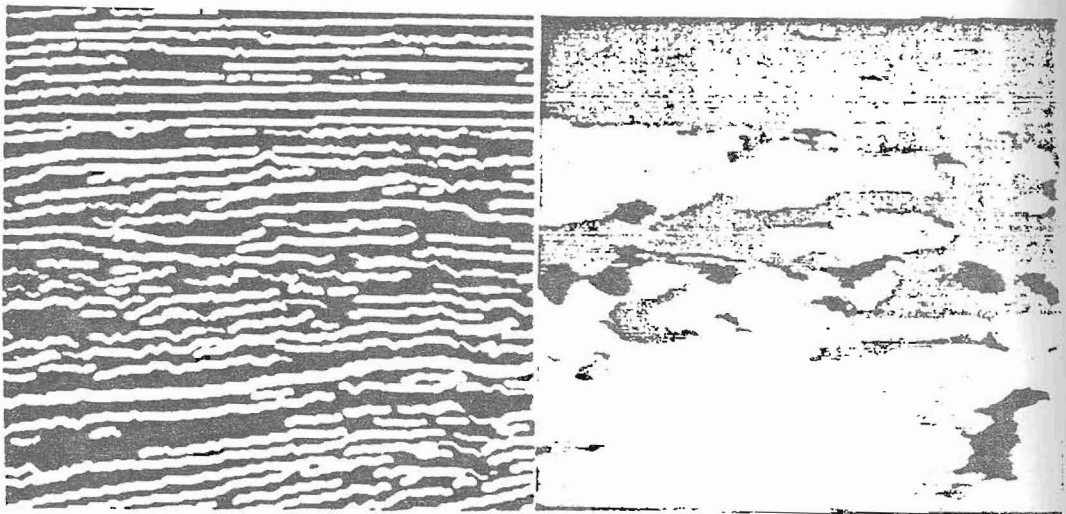
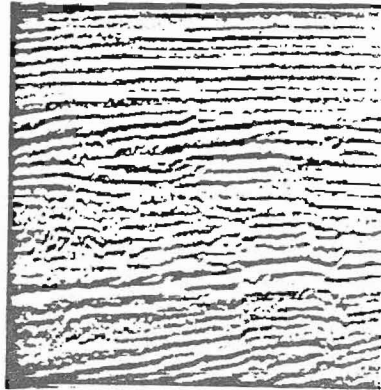
Ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου που αναφέρθηκε παραπάνω δίνεται στο σχήμα 1. Το αρχικό σεισμικό τμήμα φαίνεται στο σχήμα 1.α. Οι εικόνα των σεισμικών οριζόντων που ανιχνεύτηκαν δείχνεται στο σχήμα 1.β. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα που χρησιμοποιείται για κατάτμηση είναι ο τοπικός προσανατολισμός. Μ' άλλα λόγια ενδιαφερόμαστε να προσδιορίσουμε περιοχές που περιέχουν οριζόντια τμήματα οριζόντων, εκείνες που περιέχουν τμήματα που παρουσιάζουν θετική κλίση και αντίστοιχες περιοχές που προκύπτουν από τμήματα με αρνητική κλίση. Το αποτέλεσμα της ανάπτυξης περιοχών με κυκλικό πρότυπο ακτινοβολίας (ακτίνα 10 μονάδες) δείχνεται

στο σχήμα 1.γ. Με γκρι χρώμα, φαίνεται μια περιοχή με οριζόντια διαμόρφωση ανακλάσεων (τμήματα κλίσεων μεταξύ -5 και +5 μοιρών), με μαύρο χρώμα μια περιοχή τμημάτων με αρνητική κλίση (μεγαλύτερη από -5 μοίρες απολύτως) και με άσπρο χρώμα μια περιοχή τμημάτων με θετική κλίση (μεγαλύτερη των +5 μοιρών). Διακρίνονται δύο κυρίαρχες περιοχές: μια με οριζόντιες ανακλάσεις, πάνω και μια με τμήματα οριζόντων που παρουσιάζουν θετική κλίση, κάτω.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] R.M.McQuillin, M.Bacon and W.Barclay, An Introduction to Seismic Interpretation, Graham & Trotman Ltd., 1979.
- [2] H.R.Nelson Jr., New Technologies in Exploration Geophysics, Gulf Publishing Co., 1983.
- [3] M.T.Silvia, "Current inverse techniques in Geophysics", Proc. of the 2nd Int'l Symposium on Computer aided Seismic Analysis and Discrimination, 1981, pp. 1-10.
- [4] R.E.Sheriff and L.P.Geldart, Exploration Seismology, Vol. 2, Cambridge University Press, 1983.
- [5] M.M.Roksandic, "Seismic facies analysis concepts", Geophysical Prospecting, 1978, Vol.26, pp: 383-398.
- [6] I.B.Hoyle, "Computer techniques for zoning and correlation of well logs", Geophysical Prospecting, 1986, Vol. 34, pp.648-664.
- [7] N.Keskes and P.Mermey, "Seismic horizon extraction by heuristics methods", Proc. of IEEE Int'l Conf. on ASSP, 1984, pp.95-100.
- [8] P.Bois, "Some applications of pattern recognition to oil and gas exploration", IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-21, No.4, October 1983, pp. 415-426.
- [9] P.Bois, "Fuzzy seismic interpretation", IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-22, No.6, November 1984, pp. 692-697.
- [10] I.Pitas and A.N.Venestanopoulos, "Towards a knowledge based system for automated geophysical interpretation", Signal Processing, vol. 13, pp. 229-253, 1983.
- [11] P.L.Love and M.Simaan, "Seismic signal character recognition using texture analysis techniques", Proc. of IEEE Int'l Conf. on ASSP, 1982.
- [12] I.Pitas, E.Milios and A.N.Venestanopoulos, "Minimum entropy rule learning in image interpretation", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, under review.
- [13] I.Pitas and A.N.Venestanopoulos, "A general nonlinear filter structure for image processing" Proc. of IEEE Int'l Symposium on Circuits and Systems, pp.949-952, Helsinki, Finland, 1988.
- [14] B.H.Ballard and C.M.Brown, Computer Vision, Prentice Hall, 1982.
- [15] M.D.Levine, Vision in Man and Machine, McGraw-Hill, 1985.

- [16] G.B.Coleman and H.C.Andrews, "Image segmentation by clustering", IEEE Proceedings, vol. 67, No.5, pp.773-785, May 1979.
- [17] F.Preparata and M.I.Shamos, Computational Geometry: An introduction, Springer Verlag, 1985.
- [18] J.Serra, Image analysis and Mathematical Morphology, Academic Press, 1982.



Σχήμα 1: (α) Σεισμική εικόνα  
 (β) σεισμικοί οριζόντες που ανιχνεύτηκαν στην εικόνα  
 (γ) κατάτμηση της σεισμικής εικόνας σε περιοχές με οριζόντιους οριζόντες (με γκρι χρώμα), τμήματα οριζόντων με αρνητική κλίση (μαύρο χρώμα), και αντίστοιχα με θετική κλίση (λευκό χρώμα).