

SEGMENTATION OF SEISMIC IMAGES

Kotropoulos C., Pitas I., Tyraskis P.

Dept. of Electrical Engineering, University of Thessaloniki, 540 06 Thessaloniki, GREECE

In oil and gas prospecting geophysicists are confronted with the problem of estimating earth subsurface to depths up to 6000 meters. Reflection seismology is a widely used method to construct an accurate profile of the subsurface geology, i.e. a seismic section. Seismic sections are processed extensively before being used for interpretation with techniques as stacking, velocity correction, deconvolution and migration. Seismic interpretation correlates seismic detail (waveshape, amplitude etc) with geological detail. An interpreter generally starts with the most obvious feature, usually the strongest reflection event or the event which possesses the most distinctive character and follows this event as long as it remains reliable. We are interested in the part of interpretation which is called seismic stratigraphy. Critical points which should be taken into consideration are:

reflection amplitude, dominant frequency, interval velocity, reflection configuration, the geometry of the seismic facies unit, abundance of reflections, presence of diffractions.

Our system exploits the information of amplitude, configuration and continuity of reflections.

Specifically, the main purpose of our research is to develop methods for seismic image segmentation to characteristic clusters. In other words, we investigate for those systematic (with respect to computer vision theory, and of course, to geophysical interpretation) techniques which will permit us to distinguish regions that possess a distinctive character among the others on a seismic section. These regions could be called textured regions of the seismic section. As has already been seen, geophysical interpretation is heavily based on the seismic horizons, their characteristics and their interrelations. So we have used the seismic horizons and their features (length, signature, reflection strength, global & partial slope i.e the geometric appearance of horizon) as our primitives for texture analysis and segmentation of seismic images. We can assign to every pixel that participates in a horizon the value of a feature which characterizes either the horizon entirely (e.g length) or its pieces (e.g partial slope). The frequency of appearance of a

specific value of feature creates the histogram of the feature. The horizons can be clustered to different classes by defining thresholds on the feature histogram. For instance, by defining appropriate thresholds on the histogram of the reflection strength we can cluster the horizons to weak and strong ones. Each horizon has a position on an image. In most cases, all horizons labelled weak tend also to concentrate in the same image region. This is explained by the fact that horizons having similar attitude are created by geological formations having similar characteristics and being located in the same region in the earth subsurface. However, this clustering is not complete. Only image pixels belonging to horizons have been clustered. All other pixels have not been clustered yet. Those pixels can be assigned to clusters according to their geometric proximity to seismic horizons. A similar approach can be followed, when we use a multitude of features.

Thus our approach to seismic texture description and seismic image segmentation requires the following steps:

1. Description of the seismic texture primitives in terms of horizon features.
2. Horizon following.
3. Calculation of the 1-d or m-d histograms of the horizon features.
4. Calculation of thresholds in the horizon histograms.
5. Clustering of the seismic image pixels according to their geometric proximity to seismic horizons.

A challenge that we will be confronted hereafter is the syntactic description of a horizon with respect to its pieces. The objective is to specify the interrelations between horizons and consequently reflection configuration which leads to information about depositional processes and environment.

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 πηγαίνει 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 έξοδος 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 συσσώρευση (stacking), το φιλτράρισμα ταχύτητας (velocity filtering), η αποσυμπύκνωση (deconvolution) και η αντιμετώπιση των φαινόμενων διάδοσης του κύματος (migration) [1,2,3]. Το επεξεργασμένο σεισμικό τμήμα συνιστά μια σχετική 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 ευρέως 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 ενδιάμεσες δομές είναι τα ρήγματα, τα αντίκλινα, οι θάλοι άτατος, οι ασυνέχειες κ.τ.λ. Μια άλλη προ-σέχιση 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 ανακλάσεων (reflection configuration), συνέχεια ανακλάσεων, γεωμετρία σεισμικών μορφών, απθονία ανακλάσεων, παρουσία περιθλάσεων (diffractions).

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

ΚΑΤΑΤΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

Κ. Κοτρόπουλος* 1. Πήτας* Π. Τυράσκης**

* Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Θεσσαλονίκη 54006

** Πολυτεχνείο Κρήτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρουσιάζουμε μια νέα μέθοδο για την ανάλυση υψής και στην κατάρτιση των σεισμικών τμημάτων. Η μέθοδος βασίζεται στην ανίχνευση των σεισμικών οριζώντων και στον υπολογισμό των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων τους (π.χ μήκος, ένταση ανάκλασης, χαρακτήρα ανάκλασης). Αυτά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα 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-συσσωμάτωση τα σημεία κάθε οριζόντια χρησιμοποιούνται σαν πυρήνες για την κατάρτιση 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.

Η παραλληλία διαμόρφωση ανακλάσεων είναι ψυολογικά η πιο διαδεδομένη διαμόρφωση των ιζηματο-ένων πετρωμάτων. Συγκλίνοσα διαμόρφωση ανακλάσεων θα πορούσε να προκληθεί είτε από διάτρηση (pinch out) είτε από λαφορική συμπίεση. Η τεμνόμενη (cross bedding) διαμόρφωση είναι χαρακτηριστική των ψαμμιτών και συνιστά ένα διαγνωστικό κριτήριο για τα αμμολιθικά πετρώματα. Η αυξομειώσις και λάγια διαμορφώσεως συμβαίνουν σε συνδυασμό με βαθμιαία (progradational) πρότυπα στην υφαλοκρηίδα. Χαστική διαμόρφωση είναι χαρακτηριστική των δομών ροής (flow structures), των οποίων η εσωτερική δομή είναι περίπλοκη. Η ερμηνεία των σεισμικών τμημάτων δεν έχει ακόμη υποστηρίχθει, εξαιτίας του τεράστιου ποσού γνώσης που μπλέκεται στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Το ανθρώπινο αυλό μπορεί να διακρίνει τα διάφορα πρότυπα εξαιρετικά καλά και γενικά δεν έχει ξεπεραστεί από κανένα υπολογιστή. στόσο, υπάρχουν κάποιοι λόγοι για να χρησιμοποιούνται υπολογιστικές" μέθοδοι, προκειμένου να βοηθηθεί ο ρητνευτής. Τέτοιοι λόγοι είναι [6] ταχύτητα, συνέπεια, και υκεκριμένος προσδιορισμός κριτηρίων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Στο παρελθόν σημειώθηκαν μερικές προσπάθειες να ρησιμοποιηθούν τεχνικές επεξεργασίας εικόνων και σημάτων τη σεισμική ερμηνεία. Μερικές τεχνικές επικεντρώνονται στην υτόματη επιλογή ορίζοντων [7,8] είτε σε σεισμικό τμήμα μιάς ραμής είτε σε σεισμικά τμήματα που κλείνουν βρόγχο. ρησιμοποιήθηκαν [7] τεχνικές ακολουθίας γραμμών, ακολουθίας τροχιών (contours), που είναι βασικές τεχνικές στο πεδίο ης επεξεργασίας εικόνων. Παραμετρική περιγραφή του χαρακτήρα ανάκλασης (signature), συσχετίσεως ιχών προκειμένου να προσδιοριστούν τα δύο μέρη ενός ρήγματος, προσαρμογή (χγους αναδρομικό (AR) μοντέλο προτείνονται στο [8]. Χρήση ερωίας των σασηών συνόλων στη σεισμική ερμηνεία προτείνεται το [9]. Μια προσέγγιση αναπαράστασης γνώσης στη σεισμική ρημνεία περιγράφεται στο [10]. Η χρήση της υψής στην πτάτρηση σεισμικών εικόνων περιγράφεται στο [11]. Η τοπική πη σε μια σεισμική εικόνα περιγράφεται με διάφορες μάσκες (templates). Τότε κάθε pixel θα μπορούσε να ταξινομηθεί (κρίνοντας (matching) την τοπική υψη, όπως χαρακτηρίζεται από τα σεισμικά δεδομένα στη γειτονιά του (π.χ ένας NxN υνακας με κεντρικό στοιχείο το εξεταζόμενο pixel) με αυτές τις μάσκες. Μια προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων προτείνεται 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 (un 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 κρηιοί παράλληλοι ορίζοντες τείλουν να έχουν μεγαλύτερα κρηια ακολουθιών, από τα pixels που ανήκουν π.χ σε περιοχές χαστική διαμόρφωση ανακλάσεων. Συνεπώς, μια κατάτρηση του χαστικού τμήματος σε περιοχές με μακρίους/κοντούς ορίζοντες θα μπορούσε να επιτευχθεί.

Ο κύριος σκοπός της έρευνάς μας είναι να αναπτύξουμε μεθόδους για την κατάτρηση 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 ειδοποία διαφορά ως προς τις υπόλοιπες σ' ένα σεισμικό τμήμα. Οι περιοχές αυτές θα μπορούσαν να κληθούν συστατικές περιοχές του σεισμικού τμήματος. Αυτό σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα (features) των δομικών στοιχείων υψής (primitives) που χρησιμοποιούνται στην κατάτρηση 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 (παράμετροι 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 ορίζοντων θα μπορούσαν να ληφθούν σαν ποσοτικός χαρακτηρισμός της συνέχειας ανακλάσεων, ενώ η κατευθυντική πληροφορία θα μπορούσε να συσχετιστεί με τη διαμόρφωση ανακλάσεων κ.ο.κ. Σε κάθε pixel που ανήκει σε ορίζοντα αποδίδεται η τιμή του γνωρίσματος που χαρακτηρίζει είτε ολόκληρο τον ορίζοντα είτε τμήματά του (π.χ μερική τμηματική κλίση). Η συχνότητα εμφάνισης κάθε τιμής του χαρακτηριστικού γνωρίσματος δημιουργεί το ιστόγραμμα αυτού του γνωρίσματος. Οι ορίζοντες μπορούν να συσσωματωθούν 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 αδύνατοι τείλουν επίσης να συγκεντρώνονται στην ίδια περιοχή της εικόνας. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι ορίζοντες που έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά δημιουργούνται και από γεωλογικούς αχητισμούς με παρόμοια χαρακτηριστικά και εντοπίζονται στην ίδια περιοχή στο υπέδαφος. Ωστόσο, αυτή η συσσωμάτωση σε ενότητες δεν είναι πλήρης. Μόνο τα pixels που αντιστοιχούν στους σεισμικούς ορίζοντες έχουν ταξινομηθεί. Όλα τα άλλα pixels δεν έχουν συσσωματωθεί σε ενότητες. Τούτα θα μπορούσαν να εκχωρηθούν σε περιοχές ανάλογα με τη

Σε μετρική εγγύτητα τους στους οειομικούς ορίζοντες. Μια ανάλογη προσέγγιση θα μπορούσε να ακολουθηθεί όταν χρησιμοποιούνται περισσότερο από ένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα (π.χ. αναζητείται να προσδιοριστούν περιοχές που να έχουν κοινούς και δυνατούς ορίζοντες). Αν m χαρακτηριστικά γνωρίσματα χρησιμοποιούνται, τότε m -διάστατα ιστογράμματα πρέπει να υπολογιστούν. Επιλέγοντας κατάλληλα, μπορούμε πάλι να συζητήσουμε 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 οειομικής εικόνας και την ανάπτυξη περιοχών απαιτεί τα ακόλουθα βήματα:

1. περιγραφή των δομικών στοιχείων οειομικής υψής με όρους των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων ορίζοντων
2. ακολουθήση ορίζοντων
3. υπολογισμό ιστογραμμάτων μίας ή περισσότερων διαστάσεων
4. προσδιορισμό κατάλληλων στα ιστογράμματα ορίζοντων
5. συσσωμάτωση σε περιοχές των pixels ανάλογα με τη γεωμετρική εγγύτητα τους στους οειομικούς ορίζοντες.

Τα βήματα (1)-(4) βασίζονται κυρίως στην εμπειρία. Επομένως, εκτελούνται από τον "εμπνευτή "διαλογικά". Ο εμπνευτής διαλέγει μια περιοχή από το οειομικό τμήμα που είναι χαρακτηριστική της οειομικής υψής, και ζητά από το σύστημα να ακολουθήσει τους ορίζοντες και να υπολογίσει τα χαρακτηριστικά γνωρίσματά τους. Έπειτα επιλέγει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά γνωρίσματα και παραγγέλλει στο σύστημα να υπολογίσει τα μονοδιάστατα/πολυδιάστατα ιστογράμματα. Επιλέγει κατάλληλα στο οειομικό τμήμα και δημιουργεί τους κανόνες περιγραφής της οειομικής υψής. Ας υποθέσουμε ότι m χαρακτηριστικά γνωρίσματα a_1, \dots, a_m χρησιμοποιούνται στην περιγραφή της οειομικής υψής. Έστω επίσης X_1, \dots, X_n 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:

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

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

στην περιγραφή υψής. Το κριτήριο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται είναι η ελάχιστη εντροπία.

3. ΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΓΝΩΡΙΣΜΑΤΩΝ

Ένας οειομικός ορίζοντας περιγράφεται σαν λίστα της ακόλουθης μορφής:

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

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 ανάκλασεων, μεταβλητότητα έντασης ανάκλασεων, συνολική κλίση ορίζοντα) αποθηκεύονται στην κεφαλή της λίστας. Αυτόματη ακολουθήση ορίζοντων έχει επιχειρηθεί εκτεταμένα στη βιβλιογραφία [7,8,10]. Χρησιμοποιούμε μια μέθοδο ανάλογη μ' αυτήν που περιγράφεται στο [10]. Η ακολουθήση ορίζοντων θεωρείται ακολουθήση μεγίστων ανάκλασης, που υπερβαίνουν ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Η οειομική 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 οειομικού χνους (ορίζοντια χωρική μεταβλητή) και j συμβολίζει χρόνο διπλής διαδρομής (κατακόρυφη χωρική μεταβλητή). Η ένταση ανάκλασης έχει κωδικοποιηθεί σε 256 επίπεδα γκριζου. Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να ακολουθήσουμε έναν ορίζοντα και ότι βρισκόμαστε στο pixel (i,j) που είναι ένα τοπικό μέγιστο ανάκλασης στο i -στό χνος 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 τμή επιπέδου γκριζου από το επιλεγμένο κατώφλι κρατούνται. Εάν περισσότερα από ένα υποψήφια pixels προς επέκταση παραμένουν, τότε αποφασίζουμε επέκταση προς εκείνο το pixel που έχει τη μέγιστη τιμή. Εάν υπάρχει σσάφεια (π.χ. περισσότερο από ένα pixels-διάδοχοι που έχουν (ση μέγιστη ένταση) αποφασίζουμε επέκταση προς τον πιο ευθυγραμμισμένο υποψήφιο διάδοχο. Το κριτήριο της ευθυγράμμισης οφείζεται με τον υπολογισμό των προηγούμενων και όλων των δυνατών τρεχουσών κλίσεων επέκτασης κύδως και των απόλυτων διαφορών τους σε συνολική και τοπική έννοια. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για τις επόμενες επεκτάσεις

αρκαιριότητα" όλα τα pixels που συμμετέχουν στον ορίζοντα ή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για ένα νέο ορίζοντα. Μία ακριβής ακολουθία οριζόντων, που υλοποιήσαμε, λαμβάνει ό,τι μόνο τοπικά μέγιστα (χρυσός όχι μόνο όταν ένας ορίζοντας ξεκινά, αλλά και όταν επεκτείνεται. Επίσης υπήρξε περισσότερος υποψήφιος να εισέρχεται στη διαδικασία επέκτασης (τα pixels (s,t) όπου s=i+1, i+2 και j-2, ..., j+2). Παρόμοια κριτήρια χρησιμοποιούνται επίσης.

Μετά την ακολουθία οριζόντων, υπολογίζεται η τοπική και νολική πληροφορία, που αναφέρεται σε κάθε ορίζοντα. Ο ολογισμός των περισσότερων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων χ μήκος ορίζοντα, μέση ένταση ανάκλασης) είναι απλός και εύκολος. Η τοπική κλίση υπολογίζεται βρόχια στην ημερήσια προσέγγιση (linear piecewise approximation) του ορίζοντα. Ο υπολογισμός και η αναπαράσταση του χαρακτηριστικού άκλασης είναι πιο πολύπλοκοι. Χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο με 14 παραμέτρων που προτείνεται στο [8]. Αυτές οι παράμετροι υπολογίζονται και αποθηκεύονται σε κάθε κόμβο της στας. Επιπλέον μια μέση "signature" αποθηκεύεται στην φασή της λίστας. Βασισμένοι στο [11], υλοποιήσαμε μια χνική ακολουθία γενικευμένων ακολουθιών (generalized ns) που μας επιτρέπει να λάβουμε υπ' όψη μη οριζόντιους ακλόντες ορίζοντες, που είναι και η γενική περίπτωση. Γκεκριμένα, μετατρέπουμε το σεισμικό τμήμα σε δυαδικό κόντα, όπου κάθε pixel παίρνει την τιμή "ένα", όταν στην χική εικόνα είχε τιμή πάνω από ένα κατώφλι, αλλιώς παίρνει την τιμή "μηδέν". Δηλαδή, μετατρέπουμε τα σεισμικά (χρη σε λμοσειρές, οπότε το πρόβλημα της ακολουθίας της γενικευμένης ακολουθίας συνίσταται στο να εξακριβώσουμε αν φέρει επικάλυψη παλμών μεταξύ των ιχνών.

Εάν οι ορίζοντες έχουν ακολουθηθεί και τα χαρακτηριστικά υς γνωρίσματα υπολογιστεί, τότε η κατασκευή των μονο- δατων/πολυδιάστατων ιστογραμμάτων είναι μια απλή υπόδε- ληχθεί είτε από τον ερμηνευτή είτε από μια διαδικασία μάθησης [12]. Η ταξινόμηση των pixels που συμμετέχουν σε ορίζοντες (δηλαδή, η ταξινόμηση των οριζόντων) εκτελείται αρμόδιος τις σχέσεις (1) και (2). Υπολείπεται η ιδόση" αυτής της συσσωμάτωσης στην υπόλοιπη σεισμική κόντα.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Αυτό που μας εμποδίζει να εφαρμόσουμε τις κλασικές χνικές ανάπτυξης περιοχών [14,15] είναι ότι τα ρακτηριστικά γνωρίσματα που εξαγάγαμε αναφέρονται μόνο στα xels που συμμετέχουν στους ορίζοντες, ενώ στην κλασική τάρηση εικόνων χρώμα, γνωρίσματα υψής, επίπεδο γκριζού ο.κ χαρακτηρίζουν κάθε pixel στην εικόνα που πρόκειται να ταμηθεί. Η ανάπτυξη περιοχών εξαρτάται από την τάζη που ετίζουμε τα pixels για ομοιότητα και τους πυρήνες (seeds)

περιουσία μας πυρήνες δει των συνιστώσων περιοχών είναι προφανώς τα pixels πάνω στους ορίζοντες. Πρέπει, λοιπόν, να συνάγουμε τη 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 ο' όλα τα pixels κοντά σ' αυτό δηλαδή ο' 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 ο' 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 διάγκωση (conditional dilation) [18]. Έστω $X_k, k=1, \dots, K$ ότι είναι τα υποσύνολα του Z 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 βόκος. Ξαν τέτοιο χρησιμοποιήθηκε το δομικό στοιχείο CIRCLE. Η ανάπτυξη περιοχών στο βήμα (i) δίνεται από την ακόλουθη αναδρομική σχέση:

$$X_k(i) = [X_k(i-1) \oplus B \cap \bigcup_{i \in X_k(i-1)} X_k(i-1)] \quad (3)$$

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

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

υποέλασης 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 κλίμακες θορύβου μέσα σε μεγαλύτερες περιοχές. Το πρότυπο ακτινοβολίας περιγράφεται με όρους μιας συνάρτησης της μορφής:

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

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

$$x_k(i,j) = \sum_{i_k, j_k} \delta(i_k - i, j_k - j) \quad (i_k, j_k) \in X_k \quad (5)$$

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 απαιτείται 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 περισσότερες 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 ανιχνεύθηκαν δείχνεται στο σχήμα 1.β. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα που χρησιμοποιείται για κατάτμηση είναι ο τοπικός προσαρμοστικός. Μ' άλλα λόγια ενδυναμώσαμε τα προσδιορίσουμε περιοχές που περιέχουν οριζόντια τμήματα οριζόντων, εκείνες που περιέχουν τμήματα που παρουσιάζουν δετική κλίση και αντίστοιχες περιοχές που προκύπτουν από τμήματα με αρνητική κλίση. Το αποτέλεσμα της ανάπτυξης περιοχών με κυκλικό πρότυπο ακτινοβολίας (ακτίνα 10 μονάδες) δείχνεται

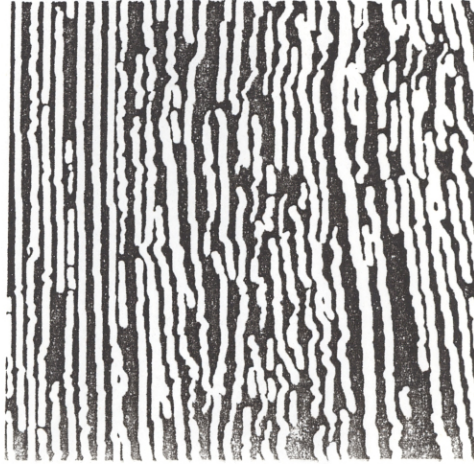
οριζόντια υφασμάτινα, με μέτρο χρώμα μια περιοχή τμημάτων με και +5 μοιρών), με μέτρο χρώμα μια περιοχή τμημάτων με αρνητική κλίση (μεγαλύτερη από -5 μοίρες απολύτως) και με άσπρο χρώμα μια περιοχή τμημάτων με θετική κλίση (μεγαλύτερη των +5 μοιρών). Διακρίνονται δύο κυρίαρχες περιοχές: μια με οριζόντιες 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. Silva, "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. Rokhsandic, "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.

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 ανιχνεύθηκαν 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).