

ΜΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ
ΤΟΥ ΤΑΝΥΣΤΗ ΤΩΝ ΤΕΚΤΟΝΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ
ΑΠΟ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΓΕΝΕΣΗΣ ΜΙΑΣ
ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΣ

Εφαρμογή της μεθόδου στους σεισμούς
της Θεσσαλονίκης του 1978

Ζ. ΚΑΡΟΤΣΙΕΡΗΣ

University of Athens, Department of Geology, Panepistimiopoli Zografou
GR-157B4, Athens.

ABSTRACT

The method described in this paper uses the nodal planes of the focal mechanisms and the depth of the corresponding seismic focus of an earthquake sequence.

At the beginning we define the fault planes from all the nodal planes, either by the method of Carey et al. [6], or by testing all the nodal planes with the deviatoric tensor computed from superficial seismic faults. Consequently we estimate the deviatoric tensor D by the numerical method of E. Carey, using the defined seismic fault planes. Any tensor that caused slipping at a fault is connected with the tensor D by the equation $T_{ab} = a \cdot D + b \cdot I$, where (a) is a real and positive number and (b) a real number. With the help of a shear strength model of discontinuities we define the probable values of the parameter (a) for any fault. For different values of this parameter and for any fault plane we determine the corresponding values of the parameter (b) , so that the tensor T_{ab} to give shear and normal stress on any fault plane defining a point of the shear strength curve. From any such tensor we define the corresponding tectonic stress tensor subtracting the gravity stress tensor, after a rotation of the orthogonal stress axes system of the tensor T_{ab} , so that an axe becomes vertical. From all the values of the six different components of the probable tectonic stress tensor we pick out the six best values (one for each component), that will constitute the best tectonic stress tensor. This optimization is succeeded by two criteria. Concretely we search for the tensor that (with the gravity stress tensors) will give such shear and normal stresses on the fault planes, so that the corresponding points to them will be nearest at the shear strength curve on a shear stress - normal stress diagramme. Furthermore, this tensor must give the least angular deviations on all fault planes between the shear stress vector $(\vec{\tau}_t)$ calculated from the tensor T and shear stress vector $(\vec{\tau}_d)$ determined from the deviatoric tensor D .

This method was applied to the Thessaloniki 1978 earthquake sequence with good results. The computed tectonic stress

tensor gives normal and shear stresses on the fault planes that agree satisfactorily with the shear strength model. Furthermore, the angular deviations between the shear stress vectors ($\vec{\tau}_1, \vec{\tau}_2$) are less than 24° .

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Βασιζόμενοι στους μηχανισμούς γένεσης των κύριων σεισμικών συμβάντων μιας σεισμικής ακολουθίας, προσδιορίζουμε το σύγχρονο τανυστή πραγματικών τεκτονικών τάσεων μιας περιοχής. Η μέθοδος, που εφαρμόζεται με μιά σειρά προγραμμάτων H/Y, εντοπίζει σε πρώτη φάση τα επίπεδα των σεισμικών ρηγμάτων και ακολούθως προσδιορίζει για κάθε ρήγμα τους πιθανούς τανυστές πραγματικών τάσεων, με βάση ένα μαθηματικό μοντέλο διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών. Στη συνέχεια εντοπίζονται οι πιθανοί τανυστές τεκτονικών τάσεων για κάθε ρήγμα, και τέλος προσδιορίζεται ο βέλτιστος τανυστής τεκτονικών τάσεων. Η μέθοδος εφαρμόζεται στη σεισμική ακολουθία της Θεσσαλονίκης του 1978 με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι οι τάσεις που ασκούνται σε κάθε σημείο του υπεδάφους μπορούν να εκφραστούν με ένα τανυστή (T), ο οποίος καθορίζεται από τη θέση του τρισσορθώνιου συστήματος αξόνων του και τον τετραγωνικό πίνακα (3X3) με τις εννέα συνιστώσες τάσεων αυτού:

$$T = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix}$$

Λόγω συμμετρίας των τάσεων αυτών, αφού $\sigma_{12} = \sigma_{21}$, $\sigma_{13} = \sigma_{31}$, και $\sigma_{23} = \sigma_{32}$, οι διαφορετικές τιμές τους περιορίζονται σε έξι, όπως στον παρακάτω πίνακα:

$$T = \begin{vmatrix} a & d & e \\ d & b & f \\ e & f & c \end{vmatrix}$$

Από ένα τέτοιο τανυστή τάσεων μπορούμε να υπολογίσουμε την τάση που ασκείται πάνω σε τυχόν επίπεδο και φυσικά την ορθή και διατμητική (ή κάθετη και εφαπτομενική) τάση πάνω σ' αυτό.

Εάν, τώρα, διαθέτουμε έναν αριθμό ρηγμάτων με γραμμές ολίσθησης, όπου για κάθε ρήγμα έχουμε προσδιορίσει τα ανύσματα:

v = η κάθετος στο επίπεδο του ρήγματος,
 s = το άνυσμα της γραμμής ολίσθησης που μετριέται πάνω στο ρήγμα, και

u = η κάθετος στο επίπεδο που ορίζουν τα δύο προηγούμενα ανύσματα,

και T είναι ο τανυστής των πραγματικών τάσεων, από την επίδραση του οποίου δημιουργήθηκαν οι γραμμές ολίσθησης σε όλα τα ρήγματα, μπορούμε να προσδιορίσουμε το άνυσμα της τάσης (σ) που εφαρμόζεται σε κάθε επίπεδο ρήγματος, και από αυτό τα ανύσματα της ορθής (n) και εφαπτομενικής (t) τάσης. Αποδεχόμενοι την υπόθεση ότι η διεύθυνση και η φορά των γραμμών ολίσθησης, που παρατηρούμε στην επιφάνεια του ρήγματος, δείχνουν τη διεύθυνση και τη φορά της εφαπτομενικής τάσης που εφαρμόζεται πάνω στο επίπεδο του ρήγματος κατά την ολίσθηση των δύο τεμαχών, τα ανύσματα s και t , για κάθε ρήγμα, πρέπει να είναι παράλληλα και της ίδιας φοράς. Επομένως, το εσωτερικό

γινόμενο των ανυσμάτων αυτών πρέπει να ισούται με μηδέν:

$$t \cdot u = 0 \quad (1)$$

Ετσι, λοιπόν, από ένα πλήθος N ρηγμάτων παίρνουμε ένα σύστημα N γραμμικών εξισώσεων με έξι αγνώστους, πράγμα που δεν μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε μία και μοναδική λύση του συστήματος.

Αν ένας τανυστής T_1 αποτελεί τη λύση ενός τέτοιου συστήματος, τότε και κάθε άλλος τανυστής $a \cdot T_1$, με (a) πραγματικό και θετικό αριθμό, αποτελεί λύση του συστήματος αυτού, καθώς επίσης και κάθε άλλος τανυστής $a \cdot T_1 + b \cdot I$, όπου I είναι ο μοναδιαίος τανυστής και (b) τυχών πραγματικός αριθμός.

Αν δεχθούμε ότι όλες οι ολισθήσεις πάνω στα ρήγματα οφείλονται στον ίδιο τανυστή τάσεων, τότε αυτός μπορεί να εκφραστεί με τη σχέση:

$$T_{ab} = a \cdot D + b \cdot I \quad (2)$$

όπου το $b \cdot I$ αποτελεί το ισότροπο μέρος του τανυστή. Όλοι οι τανυστές T_{ab} έχουν κοινές τις διευθύνσεις των αξόνων τους και τη σχέση:

$$R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1) \quad (3)$$

Με την υπολογιστική μέθοδο της CAREY μπορούμε να προσδιορίσουμε τον τανυστή D (deviatoric tensor) [4,5].

Ενας πολύ πρακτικός τρόπος που οδηγεί στην επίλυση του προβλήματος, αποβλέπει στην ελαχιστοποίηση της σχέσης:

$$F = \sum -\epsilon \cdot \sigma \cdot \sin^2(t, s) \quad (4)$$

όπου: $\epsilon = 1$ αν τα ανύσματα t και s έχουν την ίδια φορά και $\epsilon = -1$ αν έχουν αντίθετη φορά.

Αυτό επιτυγχάνεται με αλληπάλληλες επαναλήψεις ξεκινώντας από έναν αρχικό τανυστή T_0 , ο οποίος προσδιορίζεται σε πρώτη φάση (Programme "EXP", CAREY, 1976).

Είναι, λοιπόν, προφανές ότι από την ανάλυση των ρηγμάτων με γραμμές ολισθήσης δεν μπορούμε να υπολογίσουμε τον τανυστή των πραγματικών τάσεων, και πολύ περισσότερο δεν μπορούμε να υπολογίσουμε τον τανυστή των τεκτονικών τάσεων. Άκριβώς, η προσέγγιση του τανυστή των σύγχρονων τεκτονικών τάσεων μίας περιοχής επιτυγχάνεται με τη μέθοδο που περιγράφεται παρακάτω.

Η μέθοδος βασίζεται στον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών με τη χρησιμοποίηση ενός μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού αυτής.

Είναι γνωστό ότι η ολίσθηση κατά μήκος μίας ασυνέχειας εκδηλώνεται όταν η διατμητική τάση (t), που ασκείται πάνω σ' αυτή, υπερβεί τη μέγιστη διατμητική της αντοχή (t_{α}). Διάφοροι ερευνητές έχουν προτείνει κατά καιρούς διάφορα μαθηματικά μοντέλα για τον υπολογισμό της μέγιστης διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών, βασιζόμενοι σε διάφορα φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτών και στην ορθή τάση που ασκείται πάνω στην ασυνέχεια [1,2,7,9,10]. Πολλοί ερευνητές δέχονται ότι η μέγιστη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών αποτελεί συνάρτηση των:

n = ορθής τάσης

C = φαινόμενης συνοχής της ασυνέχειας, και

Φ = βασικής γωνίας τριβής

σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$t(\alpha) = n \cdot \epsilon \cdot \varphi(\Phi) \quad (5)$$

$$t(\alpha) = C + n \cdot \epsilon \cdot \varphi(\Phi) \quad (6)$$

Η σχέση (5) ισχύει για μικρές τιμές ορθής τάσης, όπου η ολίσθηση γίνεται με διαστολή και χωρίς θραύση των "δοντιών" (προεξοχών) της ασυνέχειας, ενώ η σχέση (6) ισχύει για υψηλές τάσεις όπου η ολίσθηση συνοδεύεται από τη θραύση των "δοντιών" της ασυνέχειας. Ο BYERLEE (1967) από ένα πλήθος

πειραματικών δεδομένων για τα περισσότερα πετρώματα καταλήγει στη διατύπωση των δύο παρακάτω γραμμικών σχέσεων:

$$\tau_{\alpha} = 0.85 \cdot \eta \quad \text{για } 3 < n < 200 \text{ Mpa} \quad (7)$$

$$\tau_{\alpha} = 0.6 \cdot \eta + 50 \quad \text{για } n > 200 \text{ Mpa} \quad (8)$$

που εκφράζουν τη μέγιστη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών συναρτήσει της ορθής τάσης.

Οι σχέσεις αυτές μπορούν να εφαρμοστούν για τα ανώτερα τμήματα της λιθόσφαιρας, όπου η συμπεριφορά των πετρωμάτων παραμένει εύθραυστη.

2. Π Ε Ρ Ι Γ Ρ Α Φ Η Τ Η Σ Μ Ε Θ Ο Δ Ο Υ

Η μέθοδος βασίζεται στα αποτελέσματα της ανάλυσης των μηχανισμών γένεσης των κύριων σεισμικών συμβάντων μιάς σεισμικής ακολουθίας. Από μία σειρά τέτοιων αναλύσεων λαμβάνονται για κάθε σεισμό τα δύο επίπεδα (ρηγματος και βοηθητικό), καθώς επίσης και το βάθος της σεισμικής εστίας. Παράλληλα χρησιμοποιείται ένα από τα δύο μαθηματικά μοντέλα, (7) ή (8) για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής των ρηγμάτων.

2.1 Καθορισμός των σεισμικών ρηγμάτων.

Για κάθε ζεύγος επιπέδων που καθορίζονται από την ανάλυση του μηχανισμού της σεισμικής εστίας, είναι άγνωστο ποίο από τα δύο επίπεδα αποτελεί το σεισμικό ρήγμα. Ο καθορισμός όμως όλων των σεισμικών ρηγμάτων αποτελεί βασική και πρωταρχική προϋπόθεση της μεθόδου. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με τη μέθοδο των CAREY et al. (1987), είτε με τη βοήθεια ρηγμάτων στα οποία παρατηρήθηκαν επιφανειακές μετακινήσεις κατά τη διάρκεια της σεισμικής δραστηριότητας. Στην τελευταία περίπτωση προσδιορίζουμε τον τανυστή D_{τ} (deviatoric tensor) από το σύνολο των ρηγμάτων αυτών, και στη συνέχεια ελέγχουμε με τον τανυστή αυτόν τη συμβατότητα όλων των επιπέδων (ρηγμάτων και βοηθητικών), που έχουν καθοριστεί από την ανάλυση μιάς σειράς μηχανισμών γένεσης κύριων σεισμικών συμβάντων. Από τις τιμές του συντελεστή αναλογίας R προσδιορίζουμε ποιά επίπεδα αποτελούν τα σεισμικά ρήγματα. Συγκεκριμένα, τα σεισμικά ρήγματα αντιστοιχούν σε κλίνα τα επίπεδα για τα οποία ο συντελεστής R παίρνει τιμές από 0 έως 1.

2.2 Υπολογισμός του τανυστή D από τα καθορισθέντα σεισμικά ρήγματα.

Ο υπολογισμός αυτός, όπως και του τανυστή D_{τ} , γίνεται με την υπολογιστική μέθοδο της CAREY (1976). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε τα ήδη καθορισθέντα επίπεδα των σεισμικών ρηγμάτων, ενώ οι γραμμές ολίσθησης αυτών αντιστοιχούν στους πόλους των βοηθητικών επιπέδων. Έτσι, στο στάδιο αυτό, καθορίζουμε τη θέση του συστήματος αξόνων και τις τρεις ειδικές τιμές ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) του τανυστή D (deviatoric tensor). Η θέση του ενός από τους τρεις αυτούς άξονες πλησιάζει προς την κατακόρυφο, ενώ οι άλλοι δύο πλησιάζουν στο οριζόντιο επίπεδο.

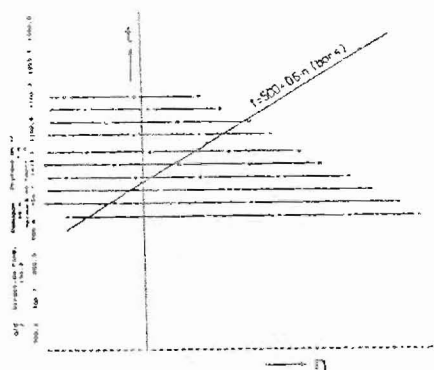
Παράλληλα, με βάση τον προσδιορισθέντα τανυστή D υπολογίζουμε τις πλαγιοβυθίσεις (pitch) των ανυσμάτων των εφαιπτομενικών τάσεων για κάθε ρήγμα.

2.3 Καθορισμός του πεδίου τιμών της παραμέτρου (a) της σχέσης $T_{\alpha\beta} = aD + bI$ για κάθε σεισμικό ρήγμα.

Δημοτική Βιβλιοθήκη Θεσσαλονίκης - Τμήμα Γεωλογίας (Α.Π.Θ.) (b)

προσπαθούμε, για κάθε ρήγμα, να εντοπίσουμε το πεδίο τιμών της παραμέτρου (a) χρησιμοποιώντας το κριτήριο της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών. Συγκεκριμένα, για κάθε πραγματική θετική τιμή της παραμέτρου (a) που παίρνουμε, διαλέγουμε ένα πλήθος τιμών της παραμέτρου (b), έτσι ώστε η ειδική τιμή τάσης του κάθε τανυστή T_{ab} , που αντιστοιχεί στον άξονα ο οποίος βρίσκεται κοντά στην κατακόρυφο, να παίρνει τιμές από $0.5(\rho \cdot g \cdot h)$ έως $1.5(\rho \cdot g \cdot h)$, όπου: ρ = η μέση πυκνότητα των πετρωμάτων από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το βάθος της σεισμικής εστίας g = η επιτάχυνση της βαρύτητας, και h = το βάθος της σεισμικής εστίας. Και τούτο, διότι θεωρείται πολύ δύσκολη η ύπαρξη ενός τανυστή τεκτονικών τάσεων, ο οποίος προστιθέμενος στον τανυστή των λιθοστατικών πιέσεων, να δίνει μία συνολική υποκατακόρυφη τάση έξω από το παραπάνω εύρος τιμών.

Στη συνέχεια, από κάθε τανυστή T_{ab} , που έχουμε πάρει για ένα συγκεκριμένο ρήγμα, υπολογίζουμε την ορθή και διατμητική τάση που ασκείται πάνω σ' αυτό και προσδιορίζουμε το ανάλογο σημείο στο διάγραμμα ορθής - διατμητικής τάσης. Από το σύνολο των σημείων αυτών καθορίζουμε ευθύγραμμα τμήματα παράλληλα προς τον άξονα των ορθών τάσεων, κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί και σε διαφορετική τιμή της παραμέτρου (a) (Εικ. 1).



Εικ.1 Διάγραμμα ορθής-διατμητικής τάσης. Κάθε ευθύγραμμο τμήμα αντιστοιχεί σε διαφορετική τιμή της παραμέτρου (a).

Από το διάγραμμα αυτό, στο οποίο έχουμε φέρει και την καμπύλη διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών (καμπύλη ολισθήσεως), μπορούμε να εντοπίσουμε το πεδίο τιμών της παραμέτρου (a). Η ανώτερη και κατώτερη τιμή του πεδίου αυτού ορίζεται από τις αντίστοιχες τιμές των ευθυγράμμων τμημάτων, που τα άκρα τους βρίσκονται πάνω στην καμπύλη διατμητικής αντοχής του διαγράμματος.

2.4 Καθορισμός των πιθανών τανυστών πραγματικών τάσεων για διάφορες τιμές της παραμέτρου (a).

Είναι προφανές ότι, όλες οι ενδιάμεσες τιμές της παραμέτρου (a) μεταξύ των δύο ακραίων που προσδιορίσαμε παραπάνω, αντιστοιχούν σε ευθύγραμμα τμήματα που τέμνουν την καμπύλη διατμητικής αντοχής του διαγράμματος. Έτσι, για κάθε τιμή της παραμέτρου (a) θα υπάρχει μία τιμή της παραμέτρου (b), που ο καθοριζόμενος από αυτές τανυστής T_{ab} , θα δίνει ορθή και διατμητική τάση σε συγκεκριμένο επίπεδο σεισμικού ρήγματος, οι οποίες θα προσδιορίζουν ένα σημείο της καμπύλης διατμητικής

αντοχής.

Ετσι, λοιπόν, παίρνοντας διάφορες τιμές της παραμέτρου (a) από το πεδίο τιμών της που καθορίσαμε παραπάνω, και δίνοντας διάφορες τιμές στην παράμετρο (b), αναζητούμε εκείνο τον ταυστή που θα μας δώσει ορθή και διατμητική τάση πάνω στο ρήγμα μας, οι οποίες αντιστοιχούν σ'ένα σημείο της καμπύλης διατμητικής αντοχής. Ο ταυστής αυτός μπορεί να είναι ο ταυστής των πραγματικών τάσεων στη θέση της σεισμικής εστίας που προκάλεσε την ολίσθηση κατά μήκος του σεισμικού ρήγματος.

2.5 Καθορισμός των πιθανών ταυστών τεκτονικών τάσεων για διάφορες τιμές της παραμέτρου (a).

Όλοι οι πιθανοί ταυστές πραγματικών, ολικών (τεκτονικών + λιθοστατικών) τάσεων από το προηγούμενο στάδιο αναφέρονται σ'ένα συγκεκριμένο σύστημα αξόνων, εκείνο του ταυστή D. Το σύστημα αυτό ενδέχεται να μην έχει τον ένα από τους τρεις του άξονες κατακόρυφο. Στην περίπτωση αυτή εκτελούμε μία περιστροφή του συστήματος αξόνων, έτσι ώστε ο άξονάς του που βρίσκεται πλησιέστερα στην κατακόρυφο, να έλθει σε κατακόρυφη θέση. Για το νέο αυτό σύστημα αξόνων υπολογίζουμε τον αντίστοιχο πίνακα πραγματικών ολικών τάσεων του κάθε πιθανού ταυστή που καθορίσαμε από το προηγούμενο στάδιο.

Κάθε ταυστής, τώρα, πραγματικών ολικών τάσεων T_{ab} προέρχεται από το άθροισμα δύο άλλων ταυστών του ταυστή των τεκτονικών τάσεων (T_t) και εκείνου των λιθοστατικών πιέσεων (T_σ). Ετσι λοιπόν:

$$T_{ab} = T_t + T_\sigma \quad (7)$$

Επειδή, τώρα, μετά δηλαδή την περιστροφή του συστήματος αξόνων των ταυστών των πραγματικών ολικών τάσεων, οι ταυστές αυτοί έχουν σύστημα αξόνων που έχει την ίδια θέση στο χώρο με εκείνο των ταυστών των λιθοστατικών πιέσεων, μπορούμε να αφαιρέσουμε κάθε ταυστή λιθοστατικών τάσεων από κάθε αντίστοιχο, πιθανό ταυστή πραγματικών ολικών τάσεων, και να καθορίσουμε έτσι ένα πιθανό ταυστή τεκτονικών τάσεων. Ετσι, λοιπόν, αν θεωρήσουμε ότι ο άξονας σ_1 είναι κατακόρυφος:

$$T_t = T_{ab} - T_\sigma \quad \text{ή} \quad (8)$$

$$\begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} \rho gh & 0 & 0 \\ 0 & c\rho gh & 0 \\ 0 & 0 & c\rho gh \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} \sigma_{11} - \rho gh & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} - c\rho gh & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} - c\rho gh \end{vmatrix} \quad (9)$$

όπου : $c = \nu / (1 - \nu)$, και $\nu =$ ο συντελεστής Poisson.

Τελικά, για κάθε τιμή της παραμέτρου a και για κάθε σεισμικό ρήγμα υπολογίζουμε τις έξι συνιστώσες κάθε πιθανού ταυστή τεκτονικών τάσεων. Ετσι, για κάθε συνιστώσα τεκτονικής τάσης σ_{1j} έχουμε ένα εύρος τιμών της, από τις οποίες θα πρέπει να διαλέξουμε έξι τιμές (μία για κάθε συνιστώσα), που θα καθορίσουν τον βέλτιστο ταυστή τεκτονικών τάσεων.

2.6 Καθορισμός του βέλτιστου ταυστή τεκτονικών τάσεων.

Για τον προσδιορισμό του βέλτιστου ταυστή τεκτονικών τάσεων αναζητούμε από τα πεδία τιμών των συνιστωσών του ταυ-

στή τεκτονικών τάσεων εκείνη την εξάδα τιμών, που ο καθορίζομενος από αυτές τανυστής να δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα ολίσθησης στο σύνολο των χρησιμοποιηθέντων σεισμικών ρηγμάτων. Η βελτιστοποίηση αυτή γίνεται με δύο παράλληλα κριτήρια. Συγκεκριμένα, για κάθε εξάδα τιμών που παίρνουμε, προσδιορίζουμε για κάθε ρήγμα, και ανάλογα με το βάθος της σεισμικής του εστίας, την ορθή και διατμητική τάση που ασκούνται στο επίπεδο του, καθώς επίσης και το *pitch* του ανύσματος της επαπτομενικής τάσης. Από το ζεύγος τιμών της ορθής και διατμητικής τάσης σε κάθε ρήγμα καθορίζουμε ένα σημείο στο αντίστοιχο διάγραμμα και προσδιορίζουμε την απόστασή του από την καμπύλη ολίσθησης. Το άθροισμα των τετραγώνων των αποστάσεων όλων αυτών των σημείων από την καμπύλη διατμητικής αντοχής καθορίζει το πρώτο κριτήριο.

Το δεύτερο κριτήριο αποτελεί το άθροισμα των τετραγώνων των γωνιακών αποκλίσεων (για όλα δηλαδή τα ρήγματα) μεταξύ του *pitch* του ανύσματος επαπτομενικής τάσης που προσδιορίσαμε από τον τανυστή D (στάδιο 2.2) και εκείνου που προσδιορίζουμε από τον τανυστή, που καθορίζει κάθε ελεγχόμενη εξάδα τιμών.

Ο βέλτιστος τανυστής καθορίζεται από εκείνη την εξάδα τιμών τεκτονικών τάσεων, που δίνει τις μικρότερες τιμές και στα δύο παραπάνω κριτήρια.

Του τεκτονικού αυτού τανυστή προσδιορίζουμε, τέλος, τις ειδικές τιμές του: σ_1 , σ_2 , σ_3 και τη θέση των αξόνων του.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η μέθοδος εφαρμόστηκε στην περιοχή Βόλβης - Λαγκαδά (Θεσσαλονίκη), όπου, ως γνωστό, την άνοιξη και το καλοκαίρι του 1978 εκδηλώθηκε μιά σημαντική σεισμική δραστηριότητα. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των τεκτονικών τάσεων ελήφθησαν από τις εργασίες [8,11,12].

Η μέθοδος εφαρμόστηκε με μια σειρά προγραμμάτων H/Y που συντάχτηκαν σε γλώσσα FORTRAN για το σκοπό αυτό.

Από την ανάλυση των μηχανισμών γένεσης κύριων σεισμικών συμβάντων προσδιορίζονται τα ζεύγη των επιπέδων των σεισμών αυτών [11,12], καθώς επίσης και τα βάθη των σεισμικών τους εστιών.

Στην εργασία [8] αναφέρονται τα στοιχεία ενός σημαντικού αριθμού ρηγμάτων που ανέδρασαν κατά την διάρκεια της παραπάνω σεισμικής δραστηριότητας. Από τα στοιχεία αυτά (ρήγματα και γραμμές ολίσθησης) προσδιορίστηκε με το πρόγραμμα FCALC; VERCION 3.0 E.C.G.-GEOLDYNSOFT-1986 του Laboratoire de Geologie Dynamique, Universite de Paris-Sud, ο παρακάτω τανυστής D_x (deviatoric tensor):

$$\begin{vmatrix} -0.6147087 & 0 & 0 \\ 0 & -0.2003809 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8150898 \end{vmatrix} \quad (10)$$

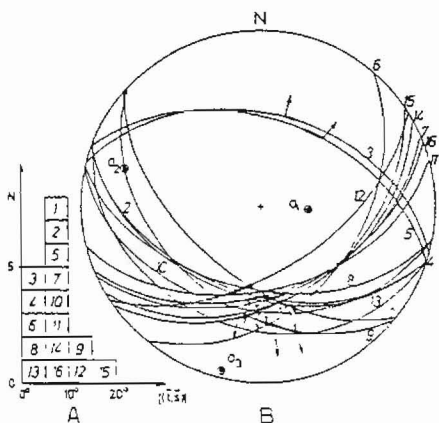
$$\begin{aligned} \text{με άξονες: } \sigma_1 & \text{ N } 122.6^\circ \text{ E, } 76.2^\circ \\ \sigma_2 & \text{ N } 258.4^\circ \text{ E, } 10.0^\circ \\ \sigma_3 & \text{ N } 350.0^\circ \text{ E, } 9.4^\circ \end{aligned} \quad \text{και } R = 0.29 \quad (11)$$

Με βάση αυτόν τον τανυστή D_x και με το ίδιο πρόγραμμα Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστοζϑμήμα Γεωλογίας. Α.Π.Θ.

έγινε ο έλεγχος 16 ζευζών επιπέδων από τις αναλύσεις μηχανισμών σεισμικών εστιών που αναφέρονται στις εργασίες [11,12]. Από τις τιμές του συντελεστή αναλογίας R προσδιορίστηκαν τα σεισμικά ρήγματα (Εικ. 2), από τα οποία στη συνέχεια υπολογίστηκε ο παρακάτω τανυστής D.

$$\begin{vmatrix} -.7398974 & 0 & 0 \\ 0 & -.0043029 & 0 \\ 0 & 0 & .7442005 \end{vmatrix} \quad (12)$$

με άξονες: σ_1 N 94.1° E, 68.4°
 σ_2 N 285.0° E, 21.3°
 σ_3 N 193.6° E, 3.7° και R = 0.496 (13)



Εικ. 2 Σεισμικά ρήγματα από τα οποία υπολογίστηκε ο τανυστής D. Οι αριθμοί δίπλα στις κυλιογραφικές προβολές των ρηγμάτων (B) αναφέρονται στους ο/α αυτών, που είναι ίσοι στο ισογράμμο γωνιακών αποκλίσεων (t.s.) (A), και στο διαγράμμο της εικ. 3. Τα βέλη δείχνουν τη φορά θύθισης των γραμμών αλλοίωσης, ενώ τα παχιά τμήματα των προβολών τις γωνιακές αποκλίσεις (t.s.).

Στη συνέχεια, με την όλη διαδικασία που περιγράψαμε παραπάνω, προσδιορίστηκε ο παρακάτω βέλτιστος τανυστής τεκτονικών τάσεων T_e :

$$\begin{vmatrix} -.4 & 0 & 0 \\ 0 & 98.6 & 0 \\ 0 & 0 & 426.8 \end{vmatrix} \quad (\text{οι τιμές σε bars, θετικές τιμές = εφελκυστικές τάσεις.})$$

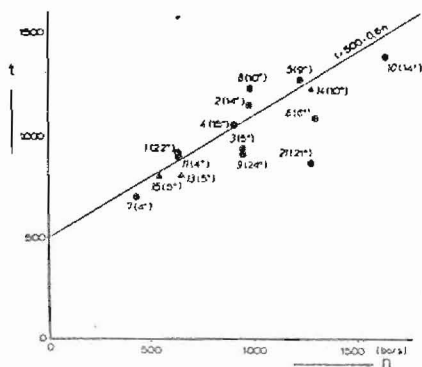
με άξονες: σ_1 N 164.3° E, 75.6°
 σ_2 N 273.2° E, 4.9°
 σ_3 N 4.4° E, 13.6°

Κατά τους υπολογισμούς ελήφθησαν: $g=9.81 \text{ m/sec}^2$,
 $\rho=2.7 \text{ ton/m}^3$ και $\nu=0.15$.

Από τη διερεύνηση που έγινε κατά τους υπολογισμούς, διαπιστώθηκε ότι η σχέση (8) δίνει καλύτερα αποτελέσματα και γι' αυτό χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής των ρηγμάτων.

Στον τεκτονικό αυτό τανυστή προστέθηκε για κάθε ρήγμα ο αντίστοιχος τανυστής λιθοστατικών τάσεων, ανάλογα με το

βάθος της σεισμικής εστίας, και από το συνολικό, κάθε φορά, τανυστή πραγματικών τάσεων υπολογίστηκαν η ορθή και διατμητική τάση σε κάθε επίπεδο ρήγματος και η πλαγιοβύθιση (pitch) του ανύσματος της εφαστομενικής τάσης. Τέλος, στο διάγραμμα ορθής - διατμητικής τάσης καθορίστηκαν από τα παραπάνω ζεύγη τιμών τα αντίστοιχα σημεία (Εικ.3).



Εικ.3 Διάγραμμα ορθής/διατμητικής τάσης στο οποίο διαπιστώνουμε ότι τα σημεία των 16 σεισμικών ρηγμάτων πέφτουν πολύ κοντά στην καμπύλη διατμητικής αντοχής. Οι οριζμοί μέσα στις παρενθέσεις αντιστοιχούν στις γωνιαίες αποκλίσεις των πλαγιοβύθισων των ανυσμάτων εφαστομενικών τάσεων που υπολογίστηκαν από τον τανυστή D αφενός, και τους τανυστές ολικών τάσεων αφετέρου.

Από τους παραπάνω υπολογισμούς διαπιστώθηκε ότι:

- Για όλα τα ρήγματα, οι αποκλίσεις των πλαγιοβύθισων των ανυσμάτων των εφαστομενικών τάσεων που υπολογίστηκαν από τον τανυστή D αφενός, και τους ανάλογους τανυστές πραγματικών ολικών τάσεων αφετέρου, κυμαίνονται μεταξύ 4° και 24° (Εικ.3)
- Τα σημεία που καθορίζονται από τις ορθές και διατμητικές τάσεις στο αντίστοιχο διάγραμμα, πέφτουν πολύ κοντά στην καμπύλη διατμητικής αντοχής (Εικ.3).

4. Σ Υ Ζ Η Τ Η Σ Η - Σ Υ Μ Π Ε Ρ Α Σ Μ Α Τ Α

Είναι προφανές ότι η μέθοδος βασίζεται σε μιά σειρά δεδομένων με σημαντική, πολλές φορές, αβεβαιότητα ως προς την ορθότητά τους. Πρώτιστη θέση σ' αυτό κατέχει ο προσδιορισμός των επιπέδων από τις αναλύσεις των εστιακών μηχανισμών, και κυρίως του βάθους των σεισμικών εστιών. Ακόμα, σημαντικό σφάλμα πιθανόν να υπεισέρχεται στους υπολογισμούς από την εκλογή του μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού της διατμητικής αντοχής, όπως επίσης και από την τιμή του συντελεστή Poisson.

Μεγάλη προσοχή απαιτείται κατά τον καθορισμό των επιπέδων των σεισμικών ρηγμάτων, κυρίως όταν η τιμή του συντελεστή R είναι πλησίον του 0 ή 1 και για τα δύο επίπεδα ενός ζεύγους. Και τούτο διότι, με μικρή αλλαγή του τανυστή D_x είναι πολύ εύκολο να αντιστραφούν τα αποτελέσματα. Σ' αυτές τις περιπτώσεις είναι προτιμότερο να μη λαμβάνονται υπόψη τα δεδομένα αυτών των εστιακών μηχανισμών.

Ένα άλλο σημείο που πρέπει να προσέξουμε είναι το εξής: Ο καθορισμός των τανυστών D_x και D βασίζεται στην παραδοχή ότι οι ολισθήσεις σε όλα τα ρήγματα οφείλονται στον ίδιο τανυστή ολικών τάσεων. Στην πραγματικότητα όμως αυτόν που θα μπορούσαμε να δεχθούμε σταθερό σε μιά περιοχή είναι ο τανυστής των τεκτονικών τάσεων. Ο τελευταίος προστιθέμενος στον εκάστοτε τανυστή λιθοστατικών πιέσεων, ανάλογα του βά-

θους, δίνει διαφορετικούς τανυστές ολικών τάσεων. Το σφάλμα αυτό αμβλύνεται αν κατά τους υπολογισμούς λαμβάνονται τα αποτελέσματα ανάλυσης εστιακών μηχανισμών με όσο το δυνατό παραπλήσια βάθη σεισμικών εστιών.

Όσο αφορά, τώρα, τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου στην περιοχή των σεισμών της Θεσσαλονίκης του 1978 κρίνονται αρκετά ικανοποιητικά, αφού και οι αποκλίσεις των *pitch* των ανυσμάτων των εφαπτομενικών τάσεων είναι σχετικά μικρές, αλλά και τα σημεία στο διάγραμμα ορθής - διατμητικής τάσης απέχουν μικρές σχετικά αποστάσεις από την καμπύλη διατμητικής αντοχής.

Παρ' ότι η ορθή τάση πάνω στα επίπεδα των ρηγμάτων δεν υπερέβη τα 200 Μπα, εντούτοις η σχέση (8) που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής, έδωσε καλύτερα αποτελέσματα, πράγμα που δείχνει ότι η ολίσθηση έγινε με θραύση "δοντιών" κατά μήκος της επιφάνειας κάθε ρήγματος.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο τανυστής των τεκτονικών τάσεων έχει τις τάσεις σ_3 (μέγιστη εφελκιστική συνιστώσα) και σ_2 σε διευθύνσεις που σχεδόν ταυτίζονται με εκείνες των αξόνων σ_3 και σ_2 αντίστοιχα, του τανυστή D.

B I B Λ Ι Ο Γ Ρ Α Φ Ι Α

1. BARTON N., 1973 : Review of a new shear - strength criterion for rock joints. *Engin. Geol.*, 7, 287-332.
2. BARTON N., 1976 : The shear strength of rock and rock joints. *Int. Jour. Rock. Mech. Min. Sci.*, 13, 255-279.
3. BYERLEE J.D., 1967 : Theory of friction based on brittle fracture. *J. Appl. Phys.*, 38, 2928-34.
4. CAREY E., 1976 : Analyse numerique d'un modele mecanique elementaire applique a l'etude d'une population de failles: calcul d'un tenseur moyen des contraintes a parti de stries de glissement. *These 3e cycle, Geol. Struct., Un. de Paris-Sud.*
5. CAREY E., 1979 : Recherche de directions principales de contraintes associees au jeu d'une population de failles. *Rev. Geol. Dyn. Geogr. Phys.*, 21 (1), 57-66.
6. CAREY-GAILHARDIS E., MERCIER J.L., 1987 : A numerical method for determining the state of stress using focal mechanisms of earthquake populations: application to Tibetan teleseisms and microseismicity of Southern Peru. *Earth Plan. Sc. Lett.*, 82, 165-179.
7. LANDANYI B., ARCHAMBAULT G., 1970 : Simulation of shear behaviour of a jointed rock mass. *Proc. 11th Symp. on Rock Mechanics, New York.*
8. MERCIER J.L., CAREY-GAILHARDIS E., MOUYARIS N., SIMEAKIS K., ROUNDYANNIS TH., ANGHELIDHIS C., 1983 : Structural analysis of recent and active faults and regional state of stress in the epicentral area of the 1978 Thessaloniki earthquakes (N. Greece). *Tectonics*, 2 (6), 577-600.
9. PATERSON M.S., 1978 : Experimental rock deformation. The brittle field. *Springer Verlag, Berlin.*
10. PATTON F.D., 1966 : Multiple modes of shear failure in rock. *Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon 1, 509-513.

11. SOUFLERIS C., STEWART G.S., 1981 : A source study of the Thessaloniki (N.Greece) 1978 earthquake sequence. *Geophys. J. Rev. Astron. Soc.*, **67**, 343-358.
12. SOUFLERIS C., JACKSON J.A., KING G.C.P., SCHOLZ C.H., SPENCER C.P., 1982 : The 1978 earthquake sequence near Thessaloniki (northern Greece). *Geoph. J. R. Astr. Soc.*, **68**, 429-458.