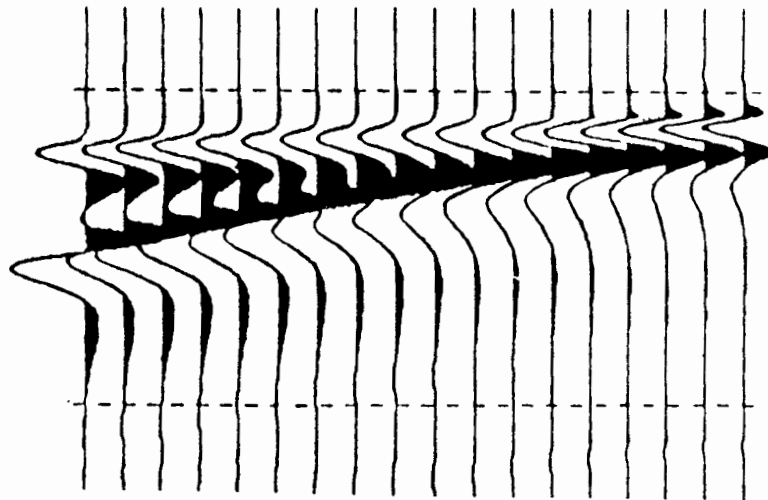




# Α' ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

Οργανωση: Συλλογος Γεωφυσικων Ελλαδας

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ – ΠΕΡΙΛΗΨΕΙΣ



# 1st HELLENIC GEOPHYSICAL CONGRESS

Organizer: Hellenic Geophysical Union

PROGRAMME – ABSTRACTS

ΑΘΗΝΑ  
19 - 21 Απριλίου 1989

ATHENS – GREECE  
19 - 21 APRIL 1989

Η ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΒΡΑΧΩΝ  
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ

Μ. Σακελλαρίου, Β. Νάκος και Χ. Μητσακίκη

Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Εξετάζεται, με σχέσεις της κλασματικής Γεωμετρίας, η δυνατότητα υπολογισμού της κλασματικής διάστασης των τυπικών προφίλ τραχύτητας των ασυνεχειών, που συνιστά η Διεθνής Ένωση Βραχομηχανικής (I.S.R.M.). Η κλασματική διάσταση προσδιορίζεται με δύο τρόπους, πρώτον σύμφωνα με τον ορισμό του Β. Mandelbrot και δεύτερον από την συνάρτηση της τυποποιημένης μεταβλητότητας. Γίνεται, ακόμη, εφαρμογή για τον προσδιορισμό της κλασματικής διάστασης των επιφανειών θραύσης δύο δειγμάτων βράχου, από το λόγο περιμέτρου προς εμβαδόν των ισαριθμικών καμπύλων του αναγλύφου. Διαπιστώνεται, εν γένει, ο κλασματικός χαρακτήρας των εξεταζομένων δειγμάτων. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα ήδη δημοσιευμένα στη διεθνή βιβλιογραφία και εξάγονται συμπεράσματα.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρουσία ασυνεχειών έχει αποφασιστική επιρροή στις μηχανικές και υδραυλικές ιδιότητες της βραχώμαζας, καθώς η αντοχή της καθορίζεται από το βαθμό αλληλοεμπλοκής των μοναδιαίων μπλοκ και η διαπερατότητα της εξαρτάται από την κατανομή των ασυνεχειών στον όγκο της /1/.

Η πυκνότητα, το μήκος τους και ο αριθμός των οικογενειών των ασυνεχειών, επηρεάζουν το βαθμό απόκλισης της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας από αυτήν ενός συνεχούς μέσου.

Η αποτύπωση του δικτύου των ασυνεχειών και η εξέταση της τραχύτητας, του βαθμού δηλαδή απόκλισης μιάς επιφάνειας ή ενός προφίλ (μηκοτομή) βράχου από το επίπεδο ή την ευθεία γραμμή, αντίστοιχα, είναι από τις βασικές παραμέτρους που καταγράφει ο Γεωλόγος ή ο Μηχανικός στην αναγνώριση πεδίου,

προκειμένου να εκτιμήσει την αναμενόμενη συμπεριφορά του βράχου.

Οι Lama και Nutukuri /2/ αναφέρουν τις μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί για την αποτίμηση των ασυνεχειών ενώ η Διεθνής Ένωση Βραχομηχανικής (I.S.R.M.) έχει εκδόσει συστάσεις για την ποσοτική περιγραφή τους /3/.

Τα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα, επί τόπου δοκιμών και εργαστηριακών, δείχνουν ότι η τραχύτητα των τοιχωμάτων των ασυνεχειών επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη γεωμετρική εμπλοκή δύο επιφανειών βράχου που ολισθαίνουν η μια ως προς την άλλη. Η τραχύτητα επομένως συμβάλλει στην αύξηση της διατμητικής αντοχής.

Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται η σχετικά νέα θεωρία της Κλασματικής Διάστασης /4/ για την εκτίμηση της τραχύτητας του αναγλύφου βράχων. Σύμφωνα με την θεωρία αυτή προσδιορίζεται ένας αριθμός, η κλασματική διάσταση, που εκφράζει ποσοτικά σε τι βαθμό μιά γραμμή ή επιφάνεια γεμίζει τον αντιστοιχο Ευκλείδιο χώρο.

Σε μια σειρά άρθρων /5-10/ έχει εφαρμοστεί η θεωρία αυτή σε προβλήματα σχετικά με το αντικείμενο της Βραχομηχανικής και Γεωφυσικής.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι ο προσδιορισμός της κλασματικής διάστασης των τυπικών προφίλ της I.S.R.M., καθώς και αναγλύφων επιφανειών από επί τόπου μετρήσεις, και η διερεύνηση των δυνατοτήτων εφαρμογής αυτής της μεθόδου.

## 2. Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

Ο Patton /11/ και ο Jaeger /12/ προτείνουν την εισαγωγή της φαινόμενης γωνίας τριβής "i" η οποία προστιθέμενη στην γωνία τριβής "φ" δίνει το μέτρο της διατμητικής αντοχής των βραχωδών επιφανειών :

$$\tau = \sigma \cdot \tan(\varphi + i) \quad (1)$$

όπου  $\tau$  είναι η διατμητική αντοχή και  $\sigma$  η ορθή τάση στο επίπεδο της ασυνέχειας.

Γεννάται όμως το ερώτημα, πώς θα εκτιμηθεί η φαινόμενη γωνία τριβής  $i$  έτσι, ώστε να είναι αντιπροσωπευτική για την συγκεκριμένη επιφάνεια.

Οι Fecker και Rengers /13/ πρότειναν μία μέθοδο μέτρησης της τραχύτητας, χρησιμοποιώντας προφίλογράφο και γεωλογική πυξίδα. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο η τραχύτητα προσεγγίζεται από τη γωνία κλίσης μιάς επιφάνειας ορισμένου μήκους. Μικρά μήκη μετρήσεως δίνουν μεγάλες κλίσεις ενώ μεγάλα μήκη δίνουν μικρότερες τιμές. Σύμφωνα με τον Patton /11/ οι κλίσεις που μετρούνται σε μεγάλα μήκη είναι αυτές που αντιπροσωπεύουν την τραχύτητα και όχι οι, ενδεχόμενα, μεγάλες κλίσεις που μπορεί να μετρηθούν σε μικρά μήκη και έχουν τοπικό χαρακτήρα.

Οι Barton /14/, Bandis, Lumsden και Barton /15/ και Barton, Bandis και Bakhtar /16/ εισήγαγαν ένα νέο μοντέλο της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών, που βασίζεται σε μία

σειρά από πρότυπα προφίλ, στα οποία αντιστοιχεί μια φαινόμενη γωνία τριβής. Μετά από σειρά μεγάλου αριθμού επί τόπου δοκιμών κατέταξαν τις πιθανές μορφές μιά επιφάνειας βράχου σε 10 προφίλ /3/.

Οι προηγούμενες προσεγγίσεις της συμβολής της τραχύτητας στη γωνία τριβής αγνοούν παραμέτρους όπως η ταχύτητα ολίσθησης και το μήκος μετατόπισης, που είναι σημαντικές για την ερμηνεία της συμπεριφοράς των τεκτονικών ρηγμάτων και φαινομένων όπως το stick-slip.

Ο Dieterich /17/ εισήγαγε έναν εμπειρικό νόμο, βασισμένος σε πειραματικές μετρήσεις, από τον οποίο φαίνεται η εξάρτηση του συντελεστού τριβής από την ταχύτητα ολίσθησης :

$$\mu = \mu_0 + A \cdot \log(B \cdot (d_c/v) + 1) \quad (2)$$

όπου :

$\mu_0$  ο συντελεστής τριβής

$\mu_0$ , A και B συντελεστές

v η ταχύτητα ολίσθησης και

$d_c$  η πειραματική παράμετρος μετατόπισης.

Η παρουσία της παραμέτρου  $d_c$  οφείλεται στις πειραματικές ενδείξεις ότι η τριβή μεταβάλλεται με την μετατόπιση και σταθεροποιείται σε μία χαμηλότερη τιμή μόνο μετά από μια χαρακτηριστική τιμή μετατόπισης  $d_c$ . Είναι σημαντικό το γεγονός ότι το μέγεθος της  $d_c$  φαίνεται να είναι ανεξάρτητο της μεταβολής της ταχύτητας αλλά εξαρτάται από την τραχύτητα των επιφανειών. Η εξάρτησή της από την τραχύτητα δείχνει ότι είναι η απαιτούμενη μετατόπιση για να καταστραφεί ένας συγκεκριμένος πληθυσμός σημείων επαφής δύο επιφανειών, και να αντικατασταθεί από ένα νέο και ασθενέστερο πληθυσμό με μικρότερο συντελεστή τριβής.

Η εμφάνιση μήκους στην καταστατική εξίσωση (2) και η εξάρτησή του από την τραχύτητα των επιφανειών, οδήγησε τον Tullis /18/ να προτείνει την χρησιμοποίηση της τραχύτητας, εκφρασμένης σαν μήκος, για να είναι δυνατή η υπό κλίμακα μελέτη, στο εργαστήριο σε μέγεθος δείγματος, φαινομένων μεγάλου μεγέθους.

Η σημασία της τραχύτητας, όπως προκύπτει από τις προηγούμενες αναφορές, σε μεγάλο εύρος προβλημάτων, μας οδήγησε στην εξέταση της κλάσματικής διάστασης των προφίλ.

### 3. ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗ

Ο B. Mandelbrot /4/, μελέτησε ομάδες μαθηματικών συναρτήσεων στοχαστικού χαρακτήρα τις οποίες ονόμασε "κλάσματικές" ομάδες (fractal sets). Ο ίδιος έδειξε ποιοτικά, με γραφήματα σε H/Y ότι τέτοιες κλάσματικές συναρτήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν στατιστικά μοντέλα για να αποδόσουν μιά σειρά φαινομένων της φύσης, από την μελέτη του τοπογραφικού ανάγλυφου μέχρι τυρβώδη φαινόμενα. Η βασική ιδιότητα αυτών των συναρτήσεων είναι ότι, παρ'όλο που είναι συνεχείς δεν είναι πουθενά

διαφορισίμες, δηλαδή δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη μοναδική παράγωγος της συνάρτησης, τουλάχιστον για κάποιο συγκεκριμένο εύρος μεταβολών της κλίμακας. (Τυπική μορφή τέτοιων συνάρτησης είναι η κίνηση Brown).

Αυτές οι κλασματικές συναρτήσεις χαρακτηρίζονται από την κλασματική διάσταση  $D$ . Ο Mandelbrot ορίζει σαν κλασματική ομάδα αυτήν της οποίας η κλασματική διάσταση  $D$  κυμαίνεται μεταξύ της Τοπολογικής  $D_T$  και της Ευκλείδειας  $D_E$  ( $D_T < D < D_E$ ) /4/. Η κλασματική διάσταση περιγράφει την τραχύτητα ενός φαινομένου ή, ανάλογα, σε τι βαθμό η απεικόνισή του γεμίζει τον Ευκλείδειο χώρο  $R^E$ . Ένα προφίλ (όπου το υψόμετρο είναι συνάρτηση της θέσης κατά μήκος του άξονα των μηκών  $X$ ) έχει κλασματική διάσταση μεταξύ των τιμών 1 και 2. Το προφίλ τοπολογικά ορίζεται σαν γραμμή ( $D_T=1$ ), αλλά για τον Ευκλείδειο χώρο ορίζεται στο επίπεδο ( $D_E=2$ ), αφού απαιτούνται δύο παράμετροι για να περιγράψουν πλήρως τη θέση κάθε σημείου του προφίλ. Όσο η  $D$  προσεγγίζει την  $D_T$ , τόσο μεγαλύτερη είναι η στατιστική συσχέτιση μεταξύ γειτονικών θέσεων και τόσο πιο λεία είναι η γραμμή του προφίλ, άρα τείνει να γίνει διαφορισίμη. Αντιθέτα, όσο η  $D$  τείνει στην τιμή 2, τόσο περισσότερο τα υψόμετρα γειτονικών σημείων είναι στατιστικά ανεξάρτητα και τόσο η γραμμή του προφίλ γίνεται πιο τραχεία, με συνέπεια να τείνει να καλύψει το επίπεδο.

Ανάλογα η κλασματική διάσταση μιάς επιφάνειας κυμαίνεται μεταξύ  $D_T=2$  και  $D_E=3$ . Πρόσφατες μετρήσεις επιφανειών αλλά και προφίλ για την μελέτη διαφόρων φαινομένων έδειξαν ότι οι κλασματικές διαστάσεις που υπολογίστηκαν καλύπτουν όλο το πιθανό εύρος τιμών. /5,6,8,9,19/.

Μιά σημαντική ιδιότητα των περισσοτέρων κλασματικών συνόλων είναι η αυτο-ομοιότητα, δηλαδή η αδράνεια που παρουσιάζουν όταν υπόκεινται σε μετασχηματισμούς ομοιότητας (μετασχηματισμούς μεταβολής της κλίμακας) (scaling fractal sets) /4/. Έτσι αν είναι γνωστή η κλασματική διάσταση ενός προφίλ, είναι δυνατό να μεταβάλλονται η οριζόντια και κατακόρυφη κλίμακα του προφίλ με τον κατάλληλο λόγο ομοιότητας (που είναι συνάρτηση του  $D$ ) ώστε το προφίλ να παρουσιάζεται πάντα στατιστικά όμοιο. Φαίνεται, λοιπόν, ότι η κλασματική διάσταση είναι μιά γεωμετρική παράμετρος που μπορεί να περιγράψει την "τραχύτητα" μιάς επιφάνειας ή μιάς γραμμής. Διαφέρει δε από τις συνήθεις που χρησιμοποιούνται (όπως το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, η μέση τιμή, ή μέση τιμή της κλίσης), γιατί αυτές οι ποσότητες περιγράφουν την "τραχύτητα" ενός συγκεκριμένου δείγματος. Το κλασματικό μοντέλο, όμως περιγράφει τον ρυθμό μεταβολής αυτών των παραμέτρων σε σχέση με το μέγεθος του δείγματος (επιφάνεια ή γραμμή), ακριβώς λόγω της ιδιότητας της αυτο-ομοιότητας που ισχύει /6/.

Ο βασικός ορισμός της κλασματικής διαστάσης συνδέεται με τον λόγο ομοιότητας  $r(N)$  και δίνεται από την σχέση :

$$D = \log(N)/\log(1/r) \quad (3)$$

Στα φυσικά φαινόμενα, όμως, η ιδιότητα αυτή δεν μπορεί να ισχύει απεριόριστα. Ο Mandelbrot /4/ σαφώς αναφέρει, και οι διαπιστώσεις, από πειραματικά δεδομένα επιβεβαιώνουν /5,6,8/, ότι υπάρχουν δύο κρίσιμες κλίμακες αποκοπής (inner and outer cutoff). Το σημαντικό είναι ότι, αφού αποκοπούν οι πολύ μικρές και οι πολύ μεγάλες λεπτομέρειες ενός κλασματικού φαινομένου, η τιμή του D που προκύπτει με τα ενδιάμεσα στοιχεία είναι η αντιπροσωπευτική κλασματική διάσταση του φαινομένου για το εύρος των λεπτομερειών που ενδιαφέρουν στο μελετούμενο πρόβλημα (effective dimension /4/).

#### 4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ

Το ανάγλυφο επιφανειών με τυχαίο χαρακτήρα, όπως είναι το ανάγλυφο διαφόρων φυσικών φαινομένων, μελετάται κυρίως με στατιστικές μεθόδους. Ανάμεσα στις γνωστότερες είναι η μέθοδος της φασματικής ανάλυσης και η μέθοδος του διαγράμματος μεταβλητότητας. Τα λογαριθμικά διαγράμματα της φασματικής ισχύος ως προς τις παρατηρούμενες συχνότητες έχουν χρησιμοποιηθεί ήδη ευρύτατα στη διεθνή βιβλιογραφία για να περιγράψουν την κλασματική συμπεριφορά προφίλ σε διάφορα φυσικά φαινόμενα. Η κλασματική διάσταση προκύπτει από την κλίση των λογαριθμικών διαγραμμάτων. Η μέθοδος του διαγράμματος μεταβλητότητας, η οποία ακολουθήθηκε, βασίζεται στον υπολογισμό της συνάρτησης μεταβλητότητας. Η συνάρτηση μεταβλητότητας των υψομέτρων Z ενός προφίλ δίνεται από την γνωστή σχέση της στατιστικής :

$$V_z = E((Z_i - Z_j)^2) \quad (4)$$

όπου, τα σημεία του προφίλ που ορίζονται από τους δείκτες i και j απέχουν μεταξύ τους συγκεκριμένο μήκος, γνωστό σαν μήκος συσχέτισης. Το μήκος συσχέτισης είναι υποπολλαπλάσιο του ολικού μήκους του δείγματος του προφίλ και είναι αδιάστατο μέγεθος. Το σύμβολο E ( ) δηλώνει την αναμενόμενη τιμή, της οποίας η εκτιμήτρια για τα διακριτά δεδομένα ενός δείγματος προκύπτει σαν ο μέσος όρος :

$$V_z = \frac{1}{n} \cdot \sum (Z_i - Z_j)^2 \quad (4')$$

Για διαφορετικά μήκη συσχέτισης προκύπτουν από την (4') αντίστοιχες τιμές της μεταβλητότητας. Αν το εξεταζόμενο φαινόμενο έχει κλασματική συμπεριφορά, η σχέση που συνδέει την μεταβλητότητα με το μήκος συσχέτισης r είναι εκθετικής μορφής και συγκεκριμένα :

$$V_z = \sigma_z^2 \cdot (r)^{4-2D} \quad (5)$$

όπου  $\sigma_z^2$  η μεταβλητότητα του εκάστοτε δείγματος των υψομέτρων Z. Η σχέση (5) λογαριθμίζεται και προκύπτει η

παρακάτω :

$$\frac{\log(V/\sigma^2)}{\log(r)} = 4 - 2 \cdot D \quad (5')$$

όπου,  $V/\sigma^2$  η τυποποιημένη μεταβλητότητα. Από την κλίση του λογαριθμικού διαγράμματος της (5') προκύπτει η κλασματική διάσταση του προφίλ.

Η συνάρτηση (4') παρουσιάζει μεγάλη αστάθεια για τις τιμές του μήκους συσχέτισης  $r$  που προσεγγίζουν το ολικό μήκος του προφίλ, γιατί η τιμή της μεταβλητότητας υπολογίζεται από μικρό αριθμό δείγματος  $n$  και έχει μεγάλη αβεβαιότητα. Εξ άλλου, είναι πιθανό για μεγάλες τιμές του μήκους συσχέτισης να υπάρχει στατιστική εξάρτηση (συσχέτιση) στις μεταβολές των υψομέτρων, δηλαδή να μην ισχύει η ιδιότητα της αυτο-ομοιότητας /4,5/. Θα πρέπει, λοιπόν, να αποκόπονται οι τιμές του διαγράμματος μεταβλητότητας που αντιστοιχούν σε σχετικά μεγάλες τιμές του μήκους συσχέτισης.

Μιά άλλη μέθοδος καθαρά γεωμετρικού χαρακτήρα είναι ο υπολογισμός της κλασματικής διάστασης από το λογαριθμικό διάγραμμα εμβαδού - περιμέτρου /4,19/. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή η κλασματική επιφάνεια δεν τέμνεται με κατακόρυφα επίπεδα για να προκύψουν προφίλ, όπως γίνεται στις στατιστικές μεθόδους που αναφέρθηκαν, αλλά με οριζόντια επίπεδα. Με την τομή δημιουργούνται ισαριθμικές καμπύλες με κλασματική διάσταση  $D$ , ενώ αυτή της αντίστοιχης επιφάνειας είναι  $D+1$ . Η θεωρία των κλασματικών συναρτήσεων προϋποθέτει ότι η περίμετρος και το εμβαδόν κάθε κλειστής ισαριθμικής καμπύλης μετρούνται με το ίδιο μέτρο /4,19/ και η σχέση αναλογίας είναι /4/ :

$$(Εμβαδόν)^{1/2} = C \cdot (Περίμετρο)^{1/D} \quad (6)$$

όπου  $C$  σταθερά, ή ισοδύναμα :

$$\log(E) = 2 \cdot \log C + [2/D] \cdot \log(\Pi) \quad (6')$$

Από την κλίση του λογαριθμικού διαγράμματος της (6') υπολογίζεται η κλασματική διάσταση  $D$  των ισαριθμικών καμπύλων του δείγματος, άρα και η  $D+1$  της επιφάνειας.

Η μέθοδος αυτή συχνά απαιτεί απλούστερη διαδικασία υπολογισμών. Εξ άλλου, φαίνεται ότι παρουσιάζει μεγαλύτερη σταθερότητα στον υπολογισμό της διάστασης της επιφάνειας από τις αντίστοιχες στατιστικές μεθόδους. Για να αντιμετωπιστεί πιθανό φαινόμενο ανισοτροπίας της επιφάνειας στην περίπτωση των στατιστικών μεθόδων πρέπει να γίνει προσεκτική επιλογή των καθέτων τομών και να συγκεντρωθεί ικανός αριθμός προφίλ για επεξεργασία. Είναι τότε δυνατόν να προσδιοριστεί αντιπροσωπευτική τιμή της κλασματικής διάστασης της επιφάνειας ( $D+1$ ), από την διάσταση  $D$  που προκύπτει από το συνθετικό λογαριθμικό διάγραμμα της φασματικής ισχύος ή της τυποποιημένης μεταβλητότητας. Το συνθετικό διάγραμμα προκύπτει σαν στατιστικός μέσος όρος των τιμών των

τεταγμένων από το σύνολο του δείγματος των προφίλ, σε συγκεκριμένες θέσεις (συχνότητες ή μήκη συσχέτισης) του άξονα των τετμημένων. Η τιμή, λοιπόν, της κλασματικής διάστασης της επιφάνειας είναι αντιπροσωπευτική μόνο όταν οι διασπορές των μέσων τιμών είναι μικρές, δηλαδή τα δείγματα των προφίλ ανήκουν στον ίδιο πληθυσμό. Το διάγραμμα εμβαδού - περιμέτρου, όμως, είναι λιγότερο ευαίσθητο στο πρόβλημα αυτό.

## 5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι εφαρμογές που έγιναν στην εργασία αυτή διακρίνονται ανάλογα με την μέθοδο προσδιορισμού της κλασματικής διάστασης αντίστοιχα σε τρεις ομάδες. Η πρώτη ομάδα εφαρμογών αναφέρεται στον προσδιορισμό της κλασματικής διάστασης των δέκα τυπικών προφίλ τραχύτητας των ασυνεχειών, που συνιστά η I.S.R.M. /3/, σύμφωνα με τον ορισμό του B. Mandelbrot (1η μέθοδος). Η δεύτερη ομάδα αναφέρεται στον προσδιορισμό της κλασματικής διάστασης των ίδιων τυπικών προφίλ από την συνάρτηση της τυποποιημένης μεταβλητότητας (2η μέθοδος). Τέλος η τρίτη ομάδα εφαρμογών αναφέρεται στον προσδιορισμό της κλασματικής συνάρτησης των επιφανειών θραύσης δύο δειγμάτων βράχων, από τον λόγο περιμέτρου προς εμβαδόν των ισαριθμικών καμπύλων του αναγλύφου (3η μέθοδος).

### 5.1 Πρώτη ομάδα εφαρμογών

Αρχικά ψηφιοποιήθηκαν οι εικόνες των δέκα τυπικών προφίλ τραχύτητας της I.S.R.M. /3/. Για την ψηφιοποίηση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα INMAP /20/ και ψηφιοποιήτης διακριτικής ικανότητας .025 mm. Η ψηφιοποίηση έγινε με μέσο βήμα .75 mm, ώστε να καταγραφούν με αντιπροσωπευτικό τρόπο οι λεπτομέρειες των τυπικών προφίλ. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στον πίνακα 1 που περιλαμβάνει για κάθε προφίλ :

- (α) το μήκος του σε  $\mu\text{m}$
- (β) το μήκος μεταξύ των άκρων σε  $\mu\text{m}$
- (γ) τον αριθμό των σημείων ψηφιοποίησης (δείγματα)
- (δ) την κλασματική διάσταση, σχέση (3)

Για να διερευνηθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων ψηφιοποιήθηκαν ενδεικτικά ορισμένα από τα προφίλ με μεγαλύτερο βήμα και επομένως μικρότερο αριθμό σημείων. Οι τιμές της κλασματικής διάστασης που προσδιορίστηκαν δεν διαφοροποιήθηκαν ουσιαστικά από αυτές του πίνακα 1.

### 5.2 Δεύτερη ομάδα εφαρμογών

Για να προσδιοριστεί η κλασματική διάσταση των τυπικών προφίλ τραχύτητας με την δεύτερη μέθοδο, της συνάρτησης της τυποποιημένης μεταβλητότητας, απαιτείται να έχει καταγραφεί το κάθε προφίλ σε κανονικές (ισαπέχουσες) θέσεις. Χρειάζεται δηλαδή να γίνει παρεμβολή των τιμών του προφίλ σε καθορισμένες κανονικές θέσεις. Η παρεμβολή έγινε με το

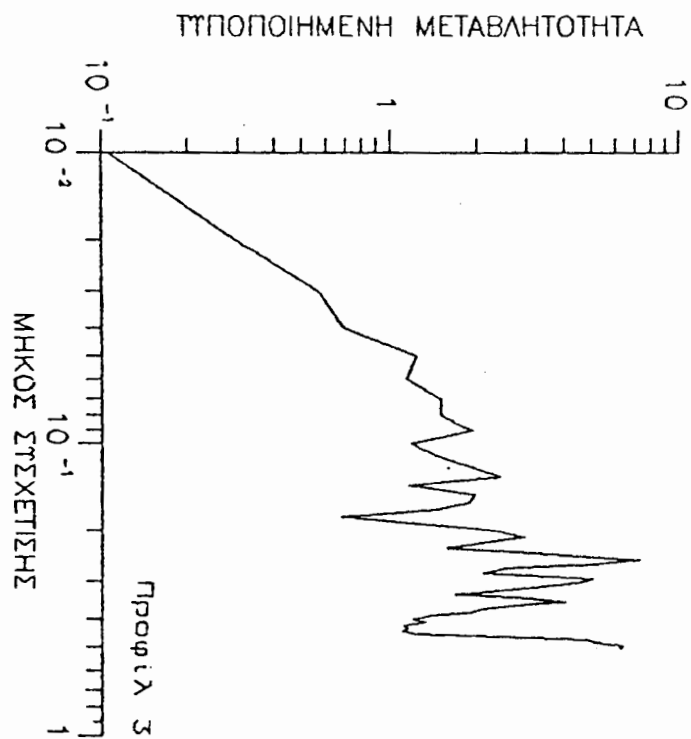
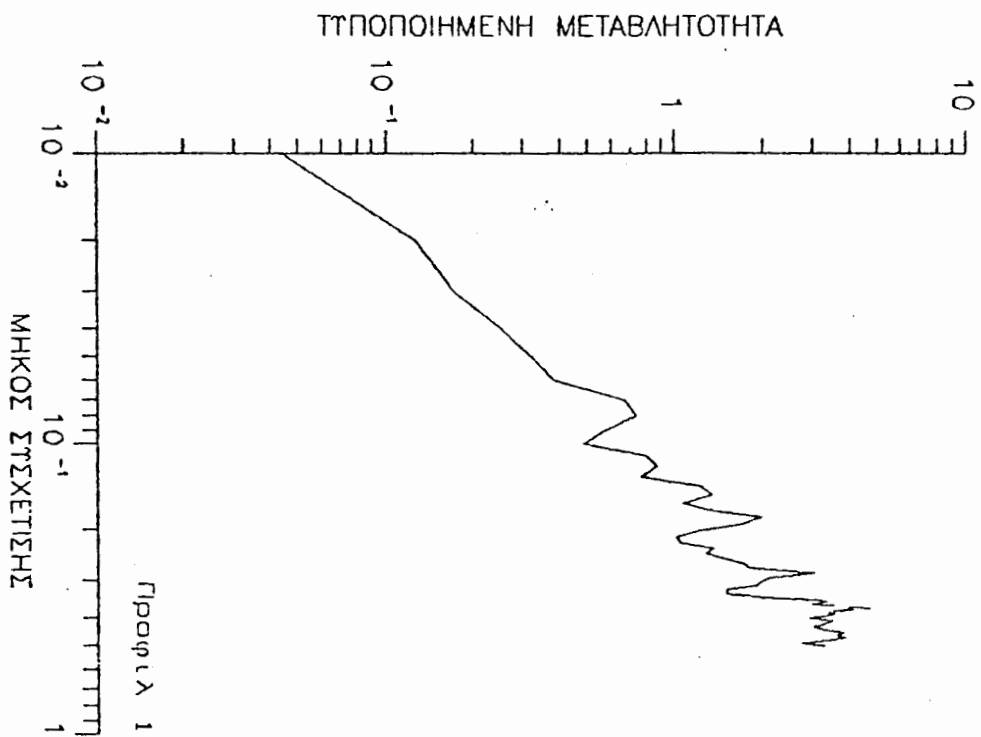


Προφιλ	Μήκος (μm) (α)	Μήκος (μm) (β)	Σημεία (γ)	D (δ)
1	97432	97282	144	1.0003
2	99854	99408	114	1.0009
3	100382	99789	108	1.0013
4	100097	98523	137	1.0032
5	99526	98013	127	1.0032
6	100218	98175	140	1.0042
7	97617	94847	139	1.0059
8	103249	99290	134	1.0081
9	101737	98089	148	1.0074
10	105135	98818	163	1.0123

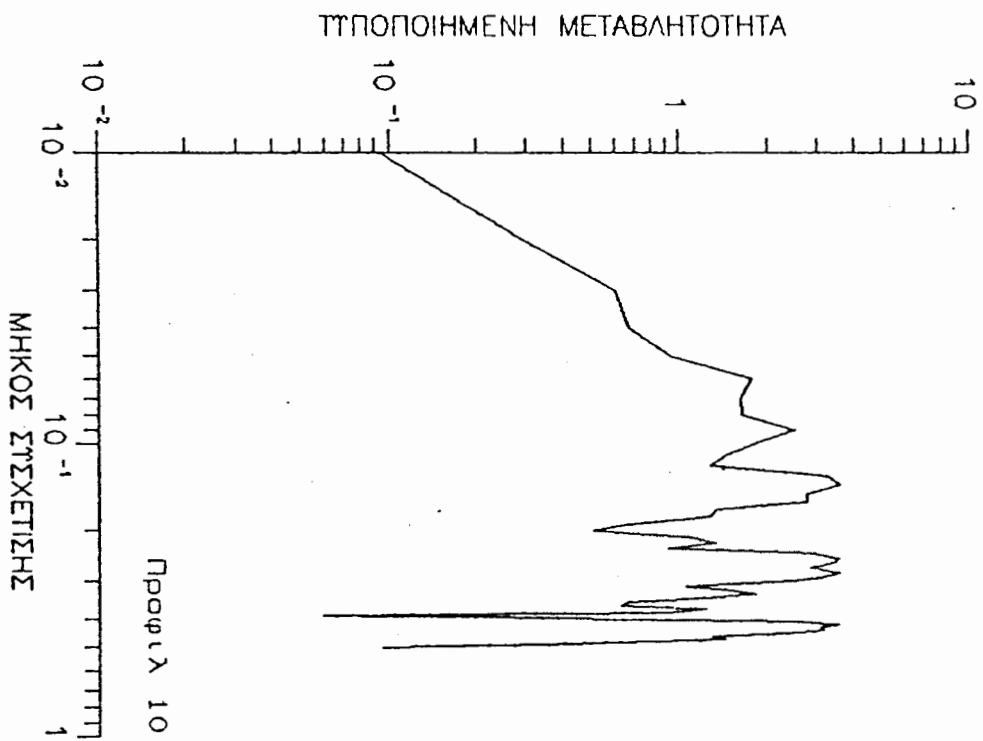
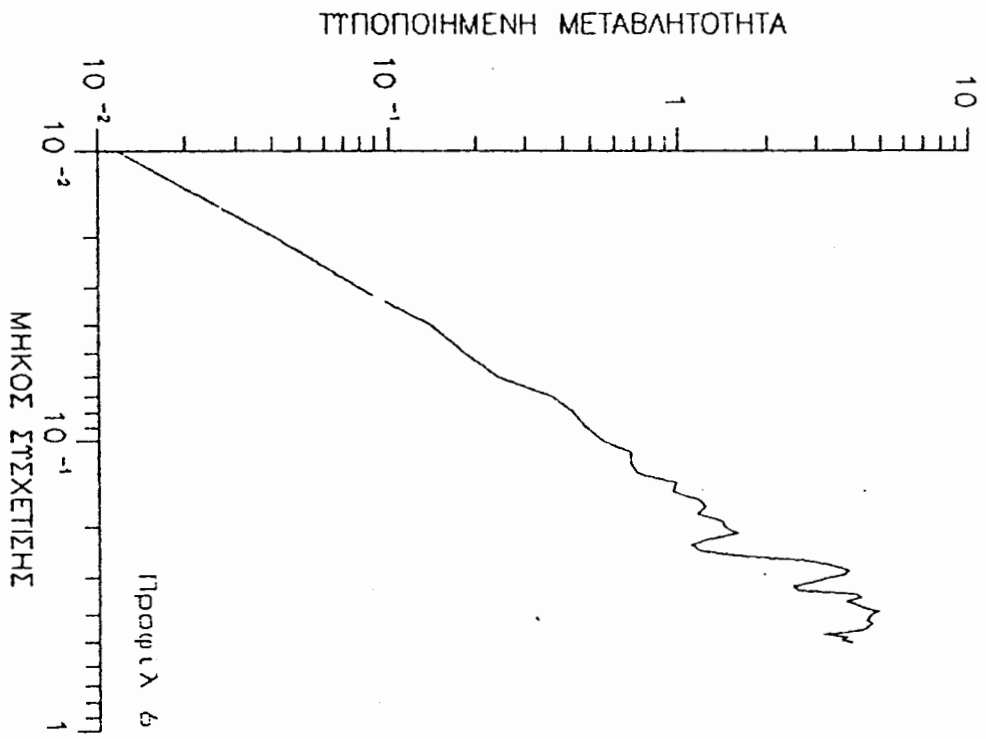
Πίνακας 1. Αποτελέσματα 1ης ομάδας εφαρμογών.

Προφιλ	πρώτο τμήμα		δεύτερο τμήμα	
	κλίση b	D	κλίση b	D
1	1.159 ±.10	1.42	—	—
2	1.230 ±.14	1.38	—	—
3	1.184 ±.11	1.41	—	—
4	.900 ±.10	1.55	—	—
5	1.344 ±.04	1.33	1.416 ±.10	1.29
6	1.683 ±.03	1.16	1.497 ±.08	1.25
7	1.447 ±.09	1.28	1.396 ±.18	1.30
8	1.698 ±.02	1.15	1.426 ±.16	1.29
9	1.431 ±.10	1.28	.956 ±.16	1.52
10	1.365 ±.09	1.32	—	—

Πίνακας 2. Αποτελέσματα 2ης ομάδας εφαρμογών.



Σχήμα 1. Διαγράμματα 2ης ομάδας εφαρμογών.



Σχήμα 2. Διαγράμματα 2ης ομάδας εφαρμογών.

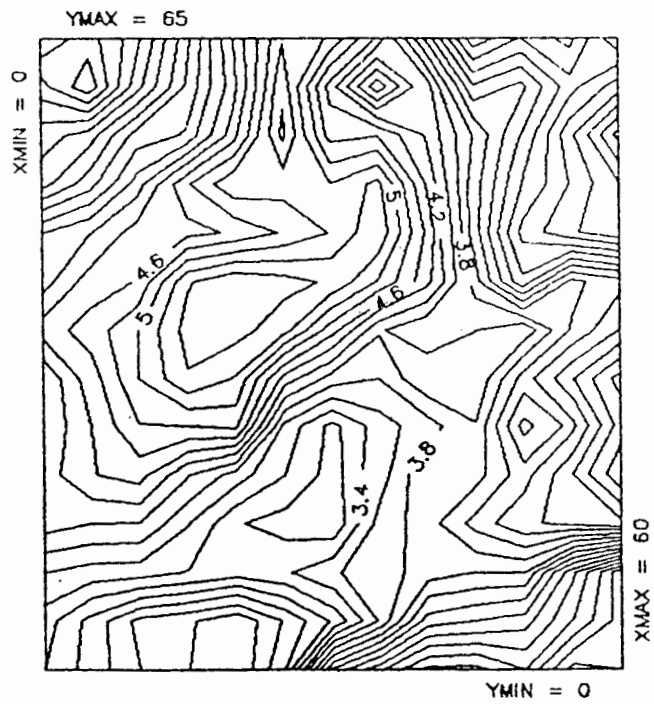
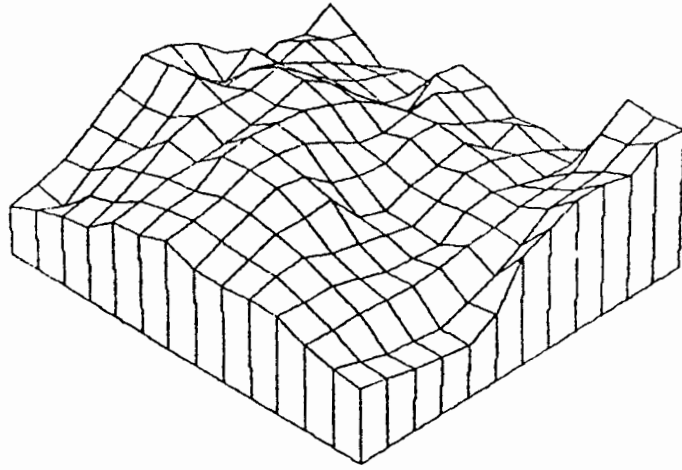
πρόγραμμα LINTER /21/, του οποίου ο αλγόριθμος στηρίζεται στην μέθοδο της κινούμενης επιφάνειας και χρησιμοποιεί σαν βάρος το αντίστροφο του τετραγώνου της απόστασης. Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για τα προφίλ ήταν τα αρχεία ψηφιοποίησης της πρώτης ομάδας εφαρμογών. Το διάστημα δειγματοληψίας καθορίστηκε στα 1000  $\mu\text{m}$  και δεδομένου ότι το μήκος των προφίλ είναι 10 cm, η παρεμβολή έγινε για 101 σημεία (θέσεις). Στην συνέχεια υπολογίστηκαν οι τιμές της συνάρτησης της τυποποιημένης μεταβλητότητας χρησιμοποιώντας την σχέση (4'). Οι τιμές της συνάρτησης τοποθετήθηκαν σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα ως προς το μήκος συσχέτισης. Στα σχήματα (1) και (2) απεικονίζονται ενδεικτικά τα αντίστοιχα διαγράμματα για τα προφίλ 1,3 και 6,10. Η κλασματική διάσταση προσδιορίζεται από την κλίση της ευθείας παλινδρόμησης της συνάρτησης της τυποποιημένης μεταβλητότητας από την σχέση (5'). Η ευθεία παλινδρόμησης υπολογίζεται για το αποκομμένο τμήμα του διαγράμματος σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, με την μέθοδο των ελαχιστων τετραγώνων. Τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης και οι τιμές της κλασματικής διάστασης για κάθε προφίλ συγκεντρώνονται στον πίνακα 2.

### 5.3 Τρίτη ομάδα εφαρμογών

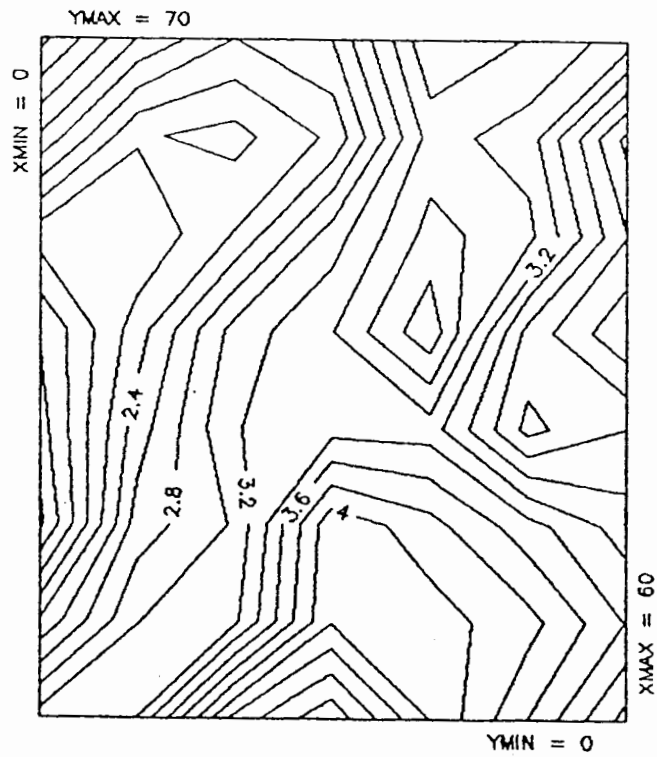
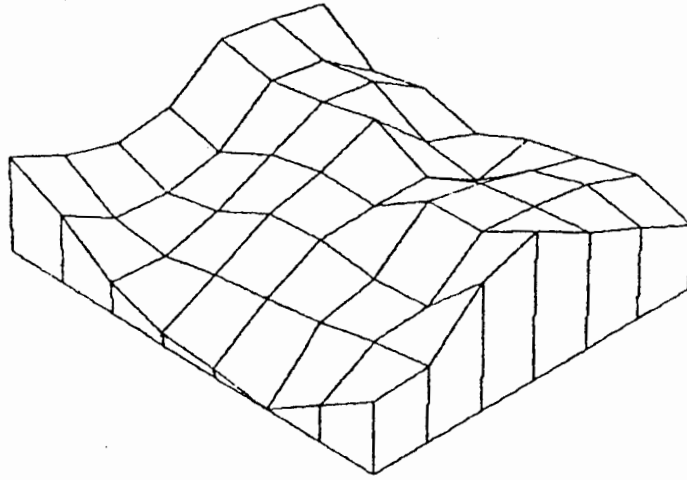
Οι δύο προηγούμενες ομάδες εφαρμογών αντιστοιχούν σε μονοδιάστατα δεδομένα (προφίλ). Το βασικό στοιχείο της τρίτης ομάδας είναι ότι προσδιορίζεται η κλασματική διάσταση και διδιάστατων δεδομένων. Υστερα από μετρήσεις υπαίθρου των επιφανειών θραύσης δύο βράχων, δημιουργήθηκαν δύο αρχεία δεδομένων. Τα αρχεία αυτά καταγράφουν το ανάγλυφο της επιφάνειας θραύσης σε κανονικές θέσεις διατεταγμένες σε τετραγωνικό κάναβο. Το διάστημα δειγματοληψίας (διάσταση κανάβου) ήταν 10 cm. Στα σχήματα (3) και (4) απεικονίζονται σε τριδιάστατη απεικόνιση και με ισαριθμικές καμπύλες το ανάγλυφο των δύο βράχων. Η ισοδιάσταση των ισαριθμικών καμπύλων είναι .2 cm. Με το πρόγραμμα INMAP ψηφιοποιούνται οι καμπύλες των δύο δειγμάτων και στην συνέχεια υπολογίζονται περίμετρος και εμβαδόν. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών τοποθετούνται σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα, σχήμα (5), και υπολογίζεται η ευθεία παλινδρόμησης. Η κλασματική διάσταση προσδιορίζεται από την κλίση της ευθείας παλινδρόμησης από την σχέση (6').

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

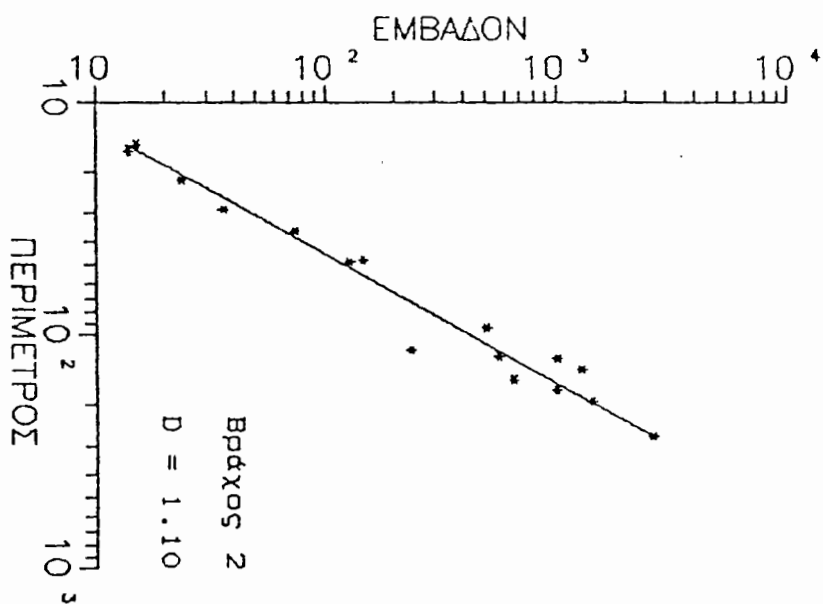
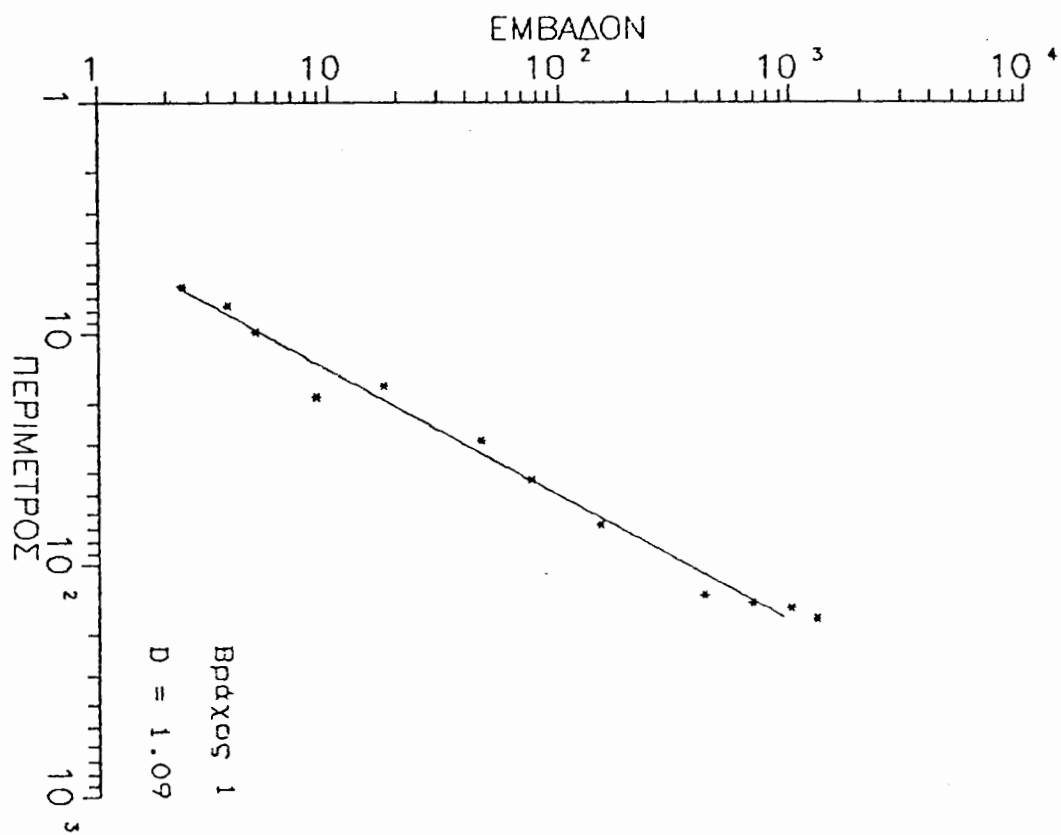
Από τις δοκιμές που έγιναν στα τυπικά προφίλ ασυνεχειών της I.S.R.M., διαπιστώνεται ότι, προκειμένου για μελέτη προσδιορισμού της κλασματικής διάστασης, απαιτείται η λήψη σημαντικού μήκους προφίλ στο πεδίο. Μόνο έτσι εξασφαλίζεται με μεγάλη πιθανότητα ο εντοπισμός, μέσα στο δείγμα, του πλήρους βασικού "μοτίβου" του αναγλύφου, που χαρακτηρίζει το εύρος των κλιμάκων για το οποίο ισχύει η αυτο-ομοιότητα, και



Σχήμα 3. Τριδιάστατη και ισ αριθμική απεικόνιση του ανάγλυφου για το δείγμα βράχου 1.



Σχήμα 4. Τριδιάστατη και ισαριθμική απεικόνιση του ανάγλυφου για το δείγμα βράχου 2.



Σχήμα 5. Διαγράμματα 3ης ομάδας εφαρμογών.

κατά συνέπεια και η κλασματική συμπεριφορά. Στην περίπτωση αυτή προκύπτει αξιόπιστη τιμή της  $D$ , αντιπροσωπευτική της τραχύτητας του αναγλύφου.

Από τις τρεις ομάδες εφαρμογών προέκυψαν τιμές της κλασματικής διάστασης που συγκλίνουν για την πρώτη και τρίτη ομέδα, ενώ οι τιμές που προήλθαν από το διάγραμμα της τυποποιημένης μεταβλητότητας διαφέρουν αρκετά. Ωστόσο, η τάξη μεγέθους και αυτών των τιμών συμβιβάζεται με τα αποτελέσματα που συναντώνται σε αντιστοιχη βιβλιογραφία /6/.

Οι τιμές της κλασματικής διάστασης των προφίλ 1-4 της δεύτερης ομάδας εφαρμογών (πίνακας 2) δεν συμβιβάζονται με την εικόνα της τραχύτητας που παρουσιάζουν τα προφίλ. Αυτό συμβαίνει γιατί η ψηφιοποίηση με ψηφιοποιητή, λόγω της διαχωριστικής ικανότητας του ματιού, δεν επιτρέπει την καταγραφή μιάς γραμμής με μικρότερο βήμα από αυτό των  $10^3$   $\mu\text{m}$  ιδιαίτερα στην περίπτωση λειών γραμμών.

Σε όλα τα διαγράμματα της τυποποιημένης μεταβλητότητας παρατηρείται σαφώς η ύπαρξη ευθυγράμμου τμήματος, αλλά τα διαγράμματα δεν φαίνεται να έχουν ενιαία κλίση για όλο το εύρος τιμών. Ανάλογες διαπιστώσεις έχουν γίνει στην /6/. Αυτό πιθανά οφείλεται στο ότι, για τα τμήματα όπου η κλίση αλλάζει, οι τιμές της τυποποιημένης μεταβλητότητας αναφέρονται σε μήκη συσχέτισης που προσεγγίζουν το ολικό μήκος του δειγματος, άρα δεν είναι στατιστικά αποδεκτές, γιατί προκύπτουν από μικρό αριθμό υψομετρικών διαφορών.

Η διαπιστωμένη, μέχρι σήμερα, εξάρτηση της τραχύτητας (φαινόμενη γωνία τριβής, σχέση (1)) /11-16/ από το μέγεθος του δειγματος δεν σημαίνει κατ'ανάγκην εξάρτηση από κλίμακα.

Αν ένα προφίλ χαρακτηρίζεται από μία συγκεκριμένη τιμή κλασματικής διάστασης  $D$ , τότε το προφίλ αυτό μπορεί να αναπαροχθεί σε διαφορετική κλίμακα (μεγέθυνση ή σμίκρυνση), γιατί υπακούει στον ακόλουθο νόμο παράλληλης ανεξαρτησίας κλίμακας (affine scaling law) /22/ :

$$(Z/Z_0) = (L/L_0)^{2-D} \quad (7)$$

όπου  $Z$  οι υψομετρικές διαφορές για κάποιο βήμα  $L$  κατά τον άξονα των μηκών και οι ποσότητες  $Z_0$ ,  $L_0$  αναφέρονται στην αρχική κατάσταση του προφίλ που μετασχηματίζεται.

Από τη σχέση (7) φαίνεται ότι η κλίμακα των μηκών είναι διαφορετική από αυτήν των υψομέτρων, ενώ ο λόγος ομοιότητας που ορίζεται μεταπίπτει στην οριακή περίπτωση  $D = D_T = 1$  στο γνωστό γεωμετρικό λόγο ομοιότητας.

Από την (7) προκύπτει η σχέση :

$$\tan i / \tan i_0 = (L/L_0)^{1-D} \quad (7')$$

όπου οι  $\tan i$  εκφράζουν τις επί μέρους κλίσεις του προφίλ ως προς τον άξονα των τετμημένων. Δεδομένου ότι, η κλασματική διάσταση κυμαίνεται μεταξύ  $1 < D < 2$ , ο εκθέτης της (7') είναι αρνητικός και κυμαίνεται από 0 έως -1.

Αν, δηλαδή, γίνει δεκτό σαν μέτρο τραχύτητας η  $\tan i$ , που δέχεται και ο Patton /11/, είναι δυνατό να προσδιοριστεί η απαιτούμενη τιμή της τραχύτητας που πρέπει να έχει ένα



δείγμα, ώστε να τηρείται ο λόγος ομοιότητας, σε σχέση με το προφίλ που έχει προκύψει από μετρήσεις πεδίου και το οποίο πρόκειται να προσομοιωθεί.

Από την σχέση (7) προκύπτει ότι όσο μειώνεται το μήκος  $L$  οι υψομετρικές διαφορές αυξάνουν, ενώ από την (7') αντιστοίχα, ότι οι επί μέρους κλίσεις αυξάνουν.

Οι Bandis, Barton, Bakhtar /16/ διαπίστωσαν ανάλογη συμπεριφορά, ερμηνεύοντας πειραματικά δεδομένα, και έκφρασαν την εξάρτηση της τραχύτητας υπό την γεωμετρική κλίμακα με την σχέση :

$$JRC/JRC_0 = (L/L_0)^{-\phi} \cdot JRC_0 \quad (8)$$

όπου  $JRC$  και  $JRC_0$  οι τραχύτητες των δύο συγκρινόμενων προφίλ.

Οι διαπιστώσεις που αφορούν τις ποσότητες  $\tan i$  και  $JRC$  /11,16/, έχουν μέχρι σήμερα ερμηνευθεί σαν απόκλιση από την γεωμετρική έννοια της ομοιότητας.

Φαίνεται, λοιπόν, ότι η εφαρμογή της κλασματικής γεωμετρίας μπορεί να συμβάλλει στη διερεύνηση προβλημάτων όπου η τραχύτητα έχει σημαντικό ρόλο. Σημαντικό είναι, όμως, να συγκριθούν όλες οι μέθοδοι που επιτρέπουν τον προσδιορισμό της κλασματικής διάστασης του αναγλύφου με εφαρμογή τους σε διδιάστατα πειραματικά δεδομένα προερχόμενα από αντιπροσωπευτικό πλήθος και μέγεθος δειγμάτων.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οφείλουμε να ευχαριστήσουμε τον Δρ. Μ. Ζάκα που παραχώρησε τις μετρήσεις πεδίου των δύο αναγλύφων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Müller L., Rock Mechanics, CISM, Udine 1974, Springer Verlag, Berlin, 1979.
2. Lama R.D., Vutukuri V. S., Handbook on Mechanical Properties of Rocks, Vol. IV, TTP, Clausthal, Germany, 1978.
3. Brown E. T.(ed.), Rock Characterization, Testing and Monitoring, I.S.R.M. suggested methods, Pergamon Press, Oxford, 1981.
4. Mandelbrot B.B., The Fractal Geometry of Nature, 468 p., W.H. Freeman, San Francisco, 1983.
5. Brown S. R., Scholz C. H., The closure of random elastic surfaces in contact, J. Geophys. Res., Vol. 90, 5531-5545 pp, 1985.
6. Brown S. R., Scholz C. H., Broad Bandwidth Study of the Topography of Natural Rock Surfaces, J.G.R., Vol.90, 12575-12582 pp, 1985.
7. Brown S.R., Fluid Flow Through Rock Joints : The Effect of Surface Roughness, J.G.R., Vol. 92, 1337-1347 pp, 1987.

8. Wang J.S.Y., Narashiman T.N., Scholz C.H., Aperture Correlation of a Fractal Fracture, *J.G.R.*, Vol. 93, 2216-2224 pp, 1988.
9. Takayuki H., Takashi S., Keisuke I., Fractal structure of spatial distribution of microfracturing in rock, *Geoph. J. R. Astr. Soc.*, Vol. 90, 369-374 pp, 1987.
10. La Pointe P.R., A Method to Characterize Fracture Density and Connectivity Through Fractal Geometry, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 25, No 5, 421-429 pp, 1988.
11. Patton F.D., Multiple modes of shear failure in rock, *Proc. 1st Congr. Inter. Soc. Rock Mech.* 1, 509-513 pp, 1966.
12. Jaeger J.C. Friction of Rocks and Stability of Rock Slopes, 11th Rankine Lecture, *Géotechnique* Vol. 21, 97-134 pp, 1971.
13. Fecker E., Rengers N., Measurement of large scale roughness of rock planes by means of profilograph and geological compass, *Proc. Symp. on Rock Fracture, Nancy, France*, paper 1-18, 1971.
14. Barton N. R., Review of a new shear strength criterion for rock joints, *Engng. Geology*, Vol.7, 287-332 pp, 1973.
15. Bandis S.C., Lumsden A.C., Barton N.R., Fundamentals of Rock Joint Deformation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 20, 249-268 pp, 1983.
16. Barton N., Bandis S., Rakhtar K., Strength, Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 22, 121-140 pp, 1985.
17. Dietrich J.H., Modeling of Rock Friction 1. Experimental Results and Constitutive Equations, *J.G.R.*, Vol. 84, 2161-2168 pp, 1979.
18. Tullis T.E. (ed.), Friction and Faulting, (reprint from *FAGEOPH*, Vol. 124(1986), No.3 ), Birkhäuser Verlag, 1987.
19. Mandelbrot B.B., Passoja D.E., Paullay A.J., The fractal character of fracture surfaces of metals, *Nature* 308, 721-722 pp, 1984.
20. Νάκος Β., Πρόγραμμα INMAP, Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισι-  
ας και Χαρτογραφίας, Ε.Μ.Π., 1988.
21. Νάκος Β., Πρόγραμμα LINTER, Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαι-  
σιας και Χαρτογραφίας, Ε.Μ.Π., 1988.
22. Berry M.V., Lewis Z.V., On the Weierstrass - Mandelbrot fractal function, *Proc. R. Soc. Lond. A* 370, 459-484 pp, 1980.