

## **ΜΟΡΦΟΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΛΕΥΚΟΧΩΡΙΟΥ – ΟΧΘΙΩΝ (ΚΕΝΤΡΟΔΥΤΙΚΗ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ)**

Φουντούλης Ι., Μαυρούλης Σ., Θεοχάρης Δ.

*Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Τομέας Δυναμικής Τεκτονικής Εφαρμοσμένης Γεωλογίας*

### **Περίληψη**

Μια τάση στις μορφοτεκτονικές αναλύσεις είναι η ποσοτικοποίηση των γεωμορφικών χαρακτηριστικών. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε μια τέτοια προσέγγιση κατά μήκος των ρηξιγενών ζωνών Λευκοχωρίου και Οχθίων, που βρίσκονται στο κεντροδυτικό τμήμα της Πελοποννήσου. Μελετήθηκε η γεωγραφική κατανομή των επιφανειών επιπέδωσης, που έδειξε απότομη μεταβολή των υψομέτρων τους εκατέρωθεν της ρηξιγενούς ζώνης Οχθίων. Κατασκευάστηκαν επιμήκεις τοπογραφικές τομές υδρορευμάτων από τη μορφή των οποίων έγιναν αντιληπτές απότομες αλλαγές στην κλίση των ρευμάτων που συνδέονται κυρίως με τεκτονικές δομές. Κατασκευάστηκαν εγκάρσιες τοπογραφικές τομές από τη μορφή των οποίων διαπιστώθηκαν κοιλάδες V μορφής στα ανερχόμενα τεμάχια και U μορφής στα κατερχόμενα. Εφαρμόστηκαν μορφομετρικοί δείκτες με σκοπό την εκτίμηση της ενεργότητας της περιοχής και ειδικότερα ο δείκτης εγκάρσιας διάβρωσης μετώπου όρους ( $S_{mf}$ ) και ο λόγος του πλάτους του πυθμένα της κοιλάδας προς το ύψος της ( $V_f$ ). Από τη σύνθεση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν συμπεραίνεται ότι οι ρηξιγενείς ζώνες Λευκοχωρίου και Οχθίων κατατάσσονται στην 1η τάξη ενεργού/πρόσφατου τεκτονισμού, επιβεβαιώνοντας και ενισχύοντας τα νεοτεκτονικά και γεωλογικά δεδομένα.

### **MORPHOTECTONIC STUDY AND APPLICATION OF MORPHOMETRIC INDICES IN LEFKOHORI - OHTHIA AREA (CENTRAL - WESTERN PELOPONNESE)**

Fountoulis I., Mavroulis S., Theocharis D.

*National and Kapodistrian University of Athens, Faculty of Geology and Geoenvironment, Department of Dynamic Tectonic Applied Geology*

### **Abstract**

A trend in morphotectonic analysis is the quantification of geomorphologic characteristics. In this study, we apply such an approach along the Lefkohori and Ohtia fault zones that are located in the central - western Peloponnese. The study on the spatial distribution of planation surfaces showed an abrupt change in the planation surfaces elevations from both sides of Ohtia fault zone. The construction of longitudinal river profiles showed abrupt changes of channel slope that could be correlated mainly with tectonic structures. The construction of transverse profiles showed the existence of V-shaped valleys in the footwall blocks and U-shaped valleys in the hanging wall blocks. Some morphometric indices were applied in order to estimate the tectonic activity of areas with intense tectonic deformation. These indices are the mountain front sinuosity ( $S_{mf}$ ) and the valley floor width - valley height ratio ( $V_f$ ). From the synthesis of the results Lefkohori and Ohtia fault zones are classified as active and recent structures, a classification that confirms and consolidates the neotectonic and geological data.

**Λέξεις κλειδιά:** μορφοτεκτονική ανάλυση, μορφομετρικοί δείκτες, επιμήκεις τομές, εγκάρσιες τομές.

**Key words:** morphotectonic analysis, morphometric indices, longitudinal profiles, transverse profiles.

## 1. Εισαγωγή

Η μορφοτεκτονική ασχολείται με την επίδραση της τεκτονικής στις γεωμορφές και πιο συγκεκριμένα με τη μορφή του αναγλύφου, το υδρογραφικό δίκτυο και τη μορφή του, την ένταση της κατά βάθος διάβρωσης, τις επιφάνειες επιπέδωσης και την κατανομή τους, τις σημερινές και παλαιότερες ακτές και αναβαθμιδές, τις ρηξιγενείς μορφολογικές ασυνέχειες, την κατανομή χαρακτηριστικών φάσεων τεκτονοϊζηματογενούς οργάνωσης (κώνιοι κορημάτων, αλλουβιακά ριπίδια, κλπ) και τη σχέση διάβρωσης - απόθεσης (Θεοχάρης και Φουντούλης, 2002).

Οι μορφομετρικοί δείκτες είναι τεχνικές ποσοτικοποίησης των γεωμορφικών χαρακτηριστικών για την μελέτη της διατάραξης τους. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε μια τέτοια προσέγγιση προκειμένου να προσδιοριστεί ο βαθμός ενεργότητας των ρηξιγενών ζωνών Λευκοχωρίου και Οχθίων, που βρίσκονται στο κεντροδυτικό τμήμα της Πελοποννήσου και ειδικότερα στα ανατολικά περιθώρια του βυθίσματος Πύργου - Ολυμπίας (Σχήμα 1). Οι μορφομετρικοί δείκτες, που μελετήθηκαν, είναι οι επιμήκεις και οι εγκάρσιες τομές των υδρορευμάτων, ο δείκτης εγκάρσιας διάβρωσης μετώπου όρους (Smf) και ο λόγος του πλάτους του πυθμένα της κοιλάδας προς το ύψος της (Vf). Αυτή η μεθοδολογία έχει πρόσφατα εξεταστεί ως χρήσιμο εργαλείο σε διάφορες τεκτονικά ενεργές περιοχές, όπως στις νοτιοδυτικές Η.Π.Α. (Bull and McFadden, 1977; Rockwell et al., 1984), την Ειρηνική ακτή της Κόστα Ρίκα (Wells et al., 1988) και τη μεσογειακή ακτή της Ισπανίας (Silva et al., 2003).

## 2. Γεωλογική – Νεοτεκτονική δομή

Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης απαντούν μεταλλικοί σχηματισμοί και αλπικοί σχηματισμοί των γεωτεκτονικών ενοτήτων Πίνδου και Τρίπολης και (Λαλεχός, 1974; Jacobshagen et al., 1978; Κατσιαβριάς, 1991; Λέκκας και συν., 1992; Φουντούλης, 1994; Fountoulis et al., 2007) (Σχήμα 1).

Η ενότητα Πίνδου αποτελεί κάλυμμα επωθημένο πάνω στην ενότητα Τρίπολης. Οι σχηματισμοί του καλύμματος της Πίνδου μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες, που είναι τα κλασικά ιζήματα Ανώτερου Τριαδικού, Κατώτερου Κρητιδικού και Τριτογενούς, οι πελαγικοί ασβεστόλιθοι Ανώτερου Τριαδικού - Ανώτερου Κρητιδικού και οι ραδιολαρίτες s.l. κυρίως Ιουρασικής ηλικίας. Όλη η ενότητα είναι έντονα πτυχωμένη και ρηγματωμένη σχηματίζοντας διαδοχικές επιπευσεις με φορά κίνησης από τα ανατολικά προς τα δυτικά.

Η ενότητα Τρίπολης εμφανίζεται με τη μορφή τεκτονικών παραθύρων κάτω από το κάλυμμα της Πίνδου στα Γορτυνιακά όρη. Η στρωματογραφική της στήλη χωρίζεται σε δύο ομάδες, τη νηρητική ανθρακική ακολουθία με τη συνεχή παρουσία νηρητικών ασβεστόλιθων Τριαδικού - Ηωκαίνου και ο φλύσχης στην κορυφή, η έναρξη ιζηματογένεσης του οποίου τοποθετείται στο Ανώτερο Ηώκαινο (Παπανικολάου, 1986).

Οι μεταλλικοί σχηματισμοί εμφανίζονται στο ευρύτερο δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Η ηλικία των μεταλλικών σχηματισμών είναι Πλειο-τεταρτογενής (Hagemann, 1977; Λέκκας και συν., 1992; Lekkas et al., 2000). Πιο συγκεκριμένα στην περιοχή απαντούν:

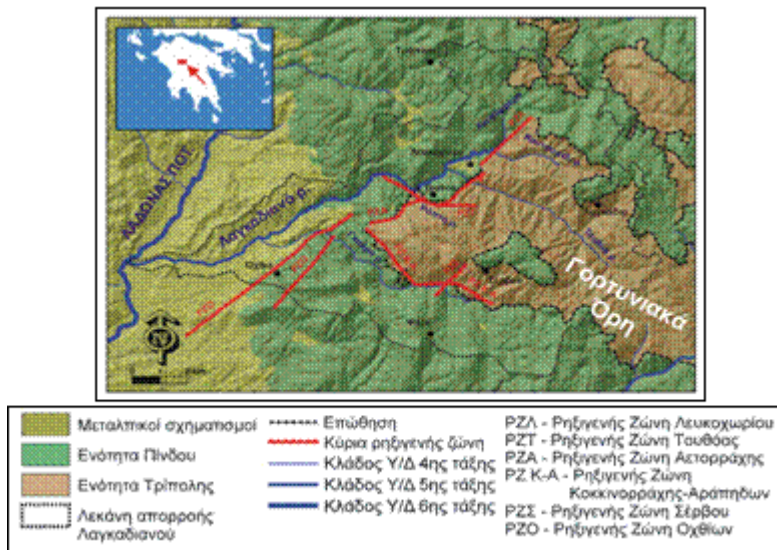
- Οι ολοκαινικές αποθέσεις περιλαμβάνουν σύγχρονες ποτάμιες αποθέσεις, κώνους κορημάτων, πλευρικά κορήματα και ερυθροχώματα με διαφόρων διαστάσεων λατύπες, κυρίως της ενότητας Πίνδου.
- Ο σχηματισμός Ερυμάνθου Πλειστοκαινικής ηλικίας αποτελείται κυρίως από πολυγενή κροκαλοπαγή χερσαίας προέλευσης τα οποία συνδέονται με ένα ερυθροπυριτικό χαλαρό λεπτομερή σχηματισμό και στο σύνολό τους αποτελούν έναν τεράστιο παλαιοκώνο.

- Οι κύριες νεοτεκτονικές μακροδομές στην περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη Πύργου - Ολυμπίας και το κέρας των Γορτυνιακών ορέων, το οποίο οριοθετείται από τις ρηξιγενείς ζώνες Λευκοχωρίου, Τουθόας, Αετορράχης, Κοκκινόρραχης - Αράπηδων, Σέρβου και Οχθίων (Fountoulis *et al.*, 2007).

### 3. Μορφοτεκτονικά χαρακτηριστικά

#### 3.1 Υδρογραφικό δίκτυο

Στην περιοχή μελέτης αναπτύσσεται η λεκάνη απορροής του Λαγκαδιανού ρέματος, που αποτελεί τμήμα του υδρογραφικού δικτύου του ποταμού Λάδωνα. Το Λαγκαδιανό ρέμα είναι κλάδος 5ης τάξης με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και δημιουργείται από τη συμβολή δύο 4ης τάξης κλάδων, που είναι τα ρέματα Λιαπόρρεμα και Κουτσομέλι. Στο Λαγκαδιανό συμβάλλουν τρεις ακόμη 4ης τάξης κλάδοι, τα ρέματα Τουθόα, Ράπητη και Γκούρα από τα βόρεια προς τα νότια αντίστοιχα. Σε ορισμένες θέσεις οι ανωτέρω κλάδοι αναπτύσσονται εγκάρσια σε ρηξιγενείς επιφάνειες, ενώ σε άλλες ακολουθούν παράλληλη προς ρηξιγενείς επιφάνειες διεύθυνση. Για παράδειγμα, το Λιαπόρρεμα έχει αρχική ΒΔ-ΝΑ διεύθυνση σχεδόν εγκάρσια στη ρηξιγενή ζώνη Λευκοχωρίου (PZΛ) (Σχήμα 1). Στη συνέχεια, ως Λαγκαδιανό, δημιουργεί ένα απότομο σημείο καμπής, αποκτά νέα ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση και ρέει παράλληλα με τη ρηξιγενή ζώνη Λευκοχωρίου λόγω της μεγάλης μορφολογικής ασυνέχειας που αυτή σχηματίζει. Οι επιλεκτικές διευθύνσεις, τα σημεία καμπής και οι απότομες αλλαγές της ροής αποκαλύπτουν την επίδραση της νεοτεκτονικής παραμόρφωσης στη διαμόρφωση της σημερινής εικόνας του υδρογραφικού δικτύου.



Σχήμα 1. Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης με τις κύριες ρηξιγενείς ζώνες και τους κύριους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης.

Οι ζώνες έντονης κατά βάθος διάβρωσης είναι άμεσα και δυναμικά συνδεδεμένες με το τεκτονικό καθεστώς της περιοχής και αναπτύσσονται κυρίως εγκάρσια στις ρηξιγενείς ζώνες (Σχήμα 2). Μια ζώνη έντονης κατά βάθος διάβρωσης εντοπίζεται στην περιοχή μεταξύ των οικισμών Λευκοχωρίου και Τουθόας και ειδικότερα στο ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης ρέμα Τουθόας. Η ζώνη αυτή είναι εγκάρσια στη ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης ρηξιγενή ζώνη Λευκοχωρίου και σχηματίζει εντυπωσιακό φαράγγι. Άλλη μια ενδιαφέρουσα ζώνη κατά βάθος διάβρωσης παρατηρήθηκε

στα ανατολικά και βορειοανατολικά των Οχθίων στο ρέμα Γκούρα που αναπτύσσεται εγκάρσια προς τη ρηξιγενή ζώνη Οχθίων. Αυτά τα γεωμορφολογικά στοιχεία είναι το αποτέλεσμα έντονων ανυψωτικών κινήσεων των τεμαχών που οριοθετούνται και ελέγχονται από τις ρηξιγενείς ζώνες της περιοχής.

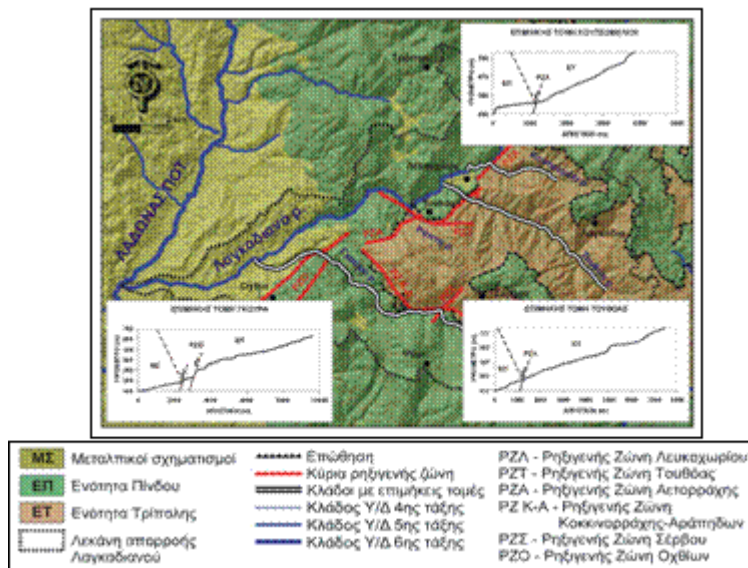
### 3.2 Επιφάνειες Επιπέδωσης

Στην περιοχή μελέτης, οι ενδογενείς τεκτονικές διεργασίες ελέγχουν τη χωρική κατανομή και το υψόμετρο των επιφανειών επιπέδωσης, που έχουν δημιουργηθεί στο αλπικό υπόβαθρο της περιοχής (Fountoulis et al., 2007). Οι επιφάνειες ισοπέδωσης αναπτύσσονται σε παράλληλες ζώνες με διεύθυνση περίπου Β-Ν με αύξηση του υψόμετρου από τα ΝΔ προς ΒΑ. Η ρηξιγενής ζώνη Οχθίων, όμως, διαταράσσει τη διαδοχική ανάπτυξη των γεωμορφολογικών αυτών δομών με την απότομη μετάβαση από την κλάση των 60-200 μέτρων στο κατερχόμενο τέμαχος στην κλάση των 600-800 μέτρων στο ανερχόμενο (Fountoulis et al., 2007).

## 4. Μορφομετρικοί δείκτες

### 4.1 Επιμήκεις και εγκάρσιες τοπογραφικές τομές

Πολλοί συγγραφείς έχουν παρουσιάσει τη χρησιμότητα των επιμήκων τομών των υδρορευμάτων στον προσδιορισμό πρόσφατης τοπικής τεκτονικής δραστηριότητας μέσω της παρατήρησης μικρής κλίμακας ανωμαλιών των επιμήκων τομών που σχετίζονται με σύγχρονες μετακινήσεις ρηξιτεμαχών (Rhea, 1989; Gomez et al., 1996). Οι επιμήκεις τομές των υδρορευμάτων είναι ευαίσθητες στις τεκτονικές ανυψωτικές κινήσεις και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση ενεργών τεκτονικών δομών (Seeber and Gornitz; 1983). Με σκοπό τη συσχέτιση του υδρογραφικού δικτύου και των επιμήκων τομών των υδρορευμάτων με το ρηξιγενή νεοτεκτονικό ιστό της περιοχής κατασκευάστηκαν επιμήκεις τομές με βάση τοπογραφικούς χάρτες κλίμακας 1:50.000 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού κατά μήκος τριών 4ης τάξης κλάδων, που διαρρέουν εγκάρσια τις ρηξιγενείς ζώνες Λευκοχωρίου και Οχθίων (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Χάρτης των επιμήκων τοπογραφικών τομών των ρεμάτων Κουτσομέλι, Τουθία και Γκούρα.

Η επιμήκης τοπογραφική τομή του ρέματος Κουτσομέλι έχει μήκος 3.861,1 m (Σχήμα 2). Αρχίζει στα 490 m βόρεια του Λευκοχωρίου και φτάνει μέχρι τα 810 m. Κατά μήκος της κοίτης του κλάδου γίνεται αντιληπτή η απότομη αλλαγή των κλίσεων στο σημεία τομής με το βόρειο τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης Λευκοχωρίου που φέρνει σε επαφή φλύσχη Τρίπολης με ασβεστόλιθους Πίνδου.

Η επιμήκης τοπογραφική τομή του ρέματος Τουθόα έχει μήκος 7.471,6 m (Σχήμα 2). Αρχίζει στα 417m από το σημείο συμβολής του εν λόγω κλάδου με το 4ης τάξης Λιαπόρρεμα και δημιουργίας του 5ης τάξης κύριου κλάδου του Λαγκαδιανού και φτάνει μέχρι τα 810 m. Κατά μήκος της κοίτης του κλάδου γίνεται αντιληπτή απότομη αλλαγή των κλίσεων που συνδέεται κυρίως με τη ρηξιγενή ζώνη Λευκοχωρίου και τοπικές ανωμαλίες που συνδέονται με λιθολογικές εναλλαγές φλύσχη και ασβεστόλιθων Τρίπολης.

Η επιμήκης τοπογραφική τομή του ρέματος Γκούρα έχει μήκος 9.655,1 m (Σχήμα 2).

Αρχίζει στα 178 m από το σημείο συμβολής του Γκούρα με τον 5ης τάξης κύριο κλάδο του Λαγκαδιανού και φτάνει μέχρι τα 710 m. Κατά μήκος της κοίτης του κλάδου είναι εμφανής η απότομη αλλαγή των κλίσεων στα σημεία τομής με το δυτικό και ανατολικό τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης Οχθίων.

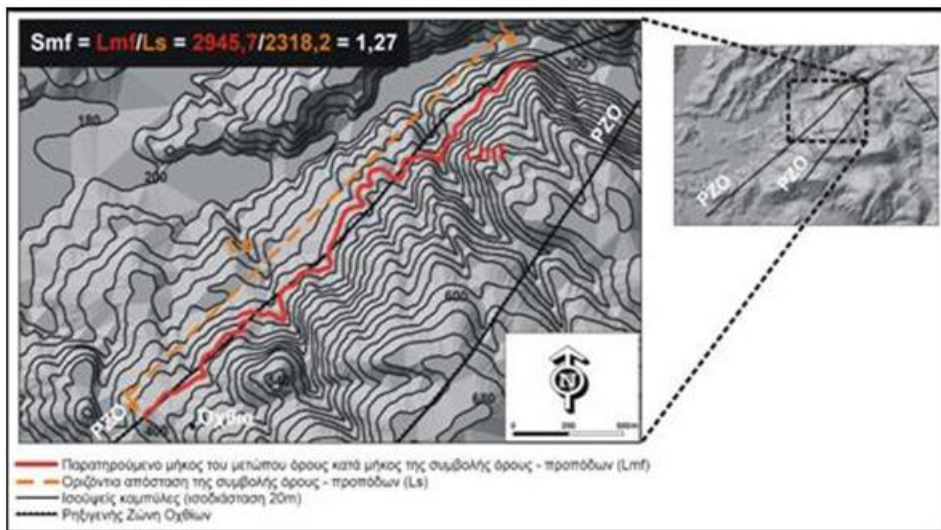
Κατασκευάστηκαν, επίσης, (α) τέσσερις εγκάρσιες τομές στο ρέμα Κουτσομέλι και ειδικότερα μία σε απόσταση 1km κατάντη και τρεις ανάντη με έναρξη από τη ρηξιγενή ζώνη Λευκοχωρίου, (β) επτά εγκάρσιες τοπογραφικές τομές στο ρέμα Τουθόας και ειδικότερα μία σε απόσταση 1km κατάντη και έξι ανάντη με έναρξη από τη ρηξιγενή ζώνη Λευκοχωρίου και (γ) έξι εγκάρσιες τοπογραφικές τομές στο ρέμα Γκούρα και ειδικότερα δύο σε απόσταση 1km κατάντη και πέντε ανάντη με έναρξη από το δυτικό τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης Οχθίων (Σχήμα 5). Από τη μορφή των εγκάρσιων τοπογραφικών τομών, διαπιστώθηκαν κοιλάδες V μορφής με ρέματα που διαβρώνουν κατά βάθος λόγω έντονης τεκτονικής ανύψωσης στα ανερχόμενα τεμάχια και U μορφής στα κατερχόμενα (Σχήμα 5).

#### 4.2 Εφαρμογή του μορφομετρικού δείκτη εγκάρσιας διάβρωσης μετώπου όρους

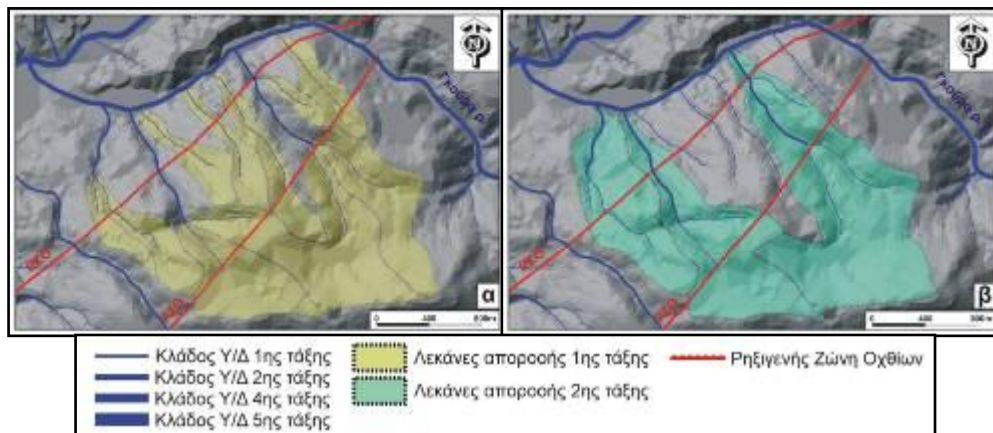
Ο δείκτης εγκάρσιας διάβρωσης μετώπου όρους ορίζεται ως ο λόγος του παρατηρούμενου μήκους του μετώπου όρους κατά μήκος της συμβολής όρους - προπόδων,  $L_{mf}$ , προς την οριζόντια απόσταση της συμβολής όρους - προπόδων,  $L_s$ , και περιγράφεται από την εξίσωση  $S_{mf} = L_{mf} / L_s$  (Bull and McFadden, 1977; Θεοχάρης και Φουντούλης, 2002). Η προσέγγιση του δείκτη  $S_{mf}$  στη μονάδα αντανακλά αυξημένη ευθύτητα του μετώπου, η οποία είναι ένδειξη ενεργότητας, αντίθετα η αυξημένη καμπυλότητα αντανακλά την επίδραση της διάβρωσης των χειμάρρων, οι οποίοι διατρέχουν το μέτωπο.

Η εφαρμογή της μεθόδου εντοπίζεται στην μέτρηση αποστάσεων στο ίχνος του όρους με τους πρόποδες του κατά μήκος της ισουΐσους όπου αλλάζουν οι μορφολογικές κλίσεις. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3, όπου ο δείκτης  $S_{mf}$  για το δυτικό τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης Οχθίων ισούται με 1,27. Σύμφωνα με την ταξινόμηση των Bull and McFadden (1977), Rockwell et al. (1984), Keller (1986) και Silva et al. (2003) και τους παραπάνω υπολογισμούς, το δυτικό τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης Οχθίων κατατάσσεται στην 1η τάξη ενεργού/πρόσφατου τεκτονισμού.

Ένα κριτήριο για τη διάκριση της σχετικής ενεργότητας περιθωριακών κανονικών ρηγμάτων είναι η εξέταση του μεγέθους και του απόκρημνου των λεκανών απορροής που γεινιάζουν με τις περιθωριακές δομές. Τα πιο ενεργά ρήγματα παρουσιάζουν την τάση για σχηματισμό μικρών, επιμηκυσμένων και απότομων λεκανών απορροής (Leeder and Jackson, 1993). Στην περιοχή μελέτης, τη ρηξιγενή ζώνη Οχθίων τέμνουν λεκάνες απορροής 7 κλάδων 1<sup>ης</sup> τάξης και 3 κλάδων 2<sup>ης</sup> τάξης, οι οποίες είναι στενές και επιμηκυσμένες (Σχήμα 4).



Σχήμα 3. Υπολογισμός του δείκτη  $S_{mf}$  στο δυτικό τμήμα της ρηξιγενοῦς ζώνης Οχθίων.



Σχήμα 4. Οι λεκάνες απορροής των κλάδων (α) 1ης και (β) 2ης τάξης που διαρρέουν τη ρηξιγενή ζώνη Οχθίων.

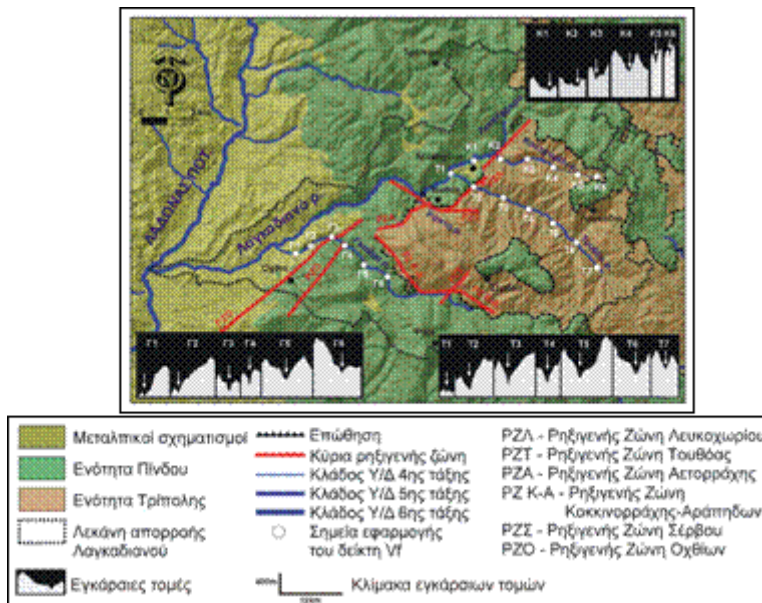
4.3. Εφαρμογή του λόγου του πλάτους του πυθμένα της κοιλάδας προς το ύψος της

Σύμφωνα με τους Bull and McFadden (1977) για ορισμένη απόσταση ανάντη του μετώπου του όρους, η σύγκριση του πλάτους του πυθμένα της κοιλάδας με το μέσο ύψος της κοιλάδας δίνουν ένα λόγο ο οποίος είναι ενδεικτικός για το κατά πόσο το ρεύμα διαβρώνει κατά βάθος ή κυρίως διαβρώνει πλευρικά τις κλιτείες. Ο λόγος του πλάτους του πυθμένα της κοιλάδας προς το ύψος της ορίζεται ως:  $V_f = 2 \cdot V_{fw} / [(E_{ld} - E_{sc}) + (E_{rd} - E_{sc})]$ , όπου  $V_{fw}$  το πλάτος της κοίτης,  $E_{ld}$  και  $E_{rd}$  τα υψόμετρα του αριστερού και του δεξιού υδροκρίτη αντίστοιχα προς τα κατάντη και  $E_{sc}$  το υψόμετρο της κοίτης (Bull, 1977a; Bull and McFadden, 1977; Bull, 1978).

Ο δείκτης Vf αντανακλά τη διαφορά μεταξύ V - μορφής κοιλάδων που διαβρώνουν κατά βάθος λόγω τεκτονικής ανύψωσης (χαμηλές τιμές Vf < 0,1) και U - μορφής κοιλάδων με κυρίαρχη την πλευρική διάβρωση ως αποτέλεσμα της σχετικής σταθερότητας του βασικού επιπέδου ή λόγω τεκτονικής ηρεμίας (χαμηλές τιμές Vf < 1,0) (Keller 1986; Silva et al., 2003).

Ο υπολογισμός του Vf εφαρμόστηκε στην παρούσα μελέτη για τον προσδιορισμό του βαθμού τεκτονικής δραστηριότητας όχι μόνο της περιθωριακής ρηξιγενούς ζώνης Οχθίων αλλά και στη ρηξιγενή ζώνη Λευκοχωρίου, που παρουσιάζει σημαντική μορφολογική ασυνέχεια (. Πραγματοποιήθηκε με την κατασκευή τοπογραφικών τομών εγκάρσιων σε τρεις 4ης τάξης κλάδους του υδρογραφικού δικτύου Λαγκαδιανού, που διαρρέουν τις μορφολογικές ασυνέχειες των εν λόγω ρηξιγενών ζωνών και ειδικότερα στα ρέματα Κουτσομέλι, Τουθόα και Γκούρα από βόρεια προς νότια αντίστοιχα (Σχήμα 5 - Πίνακας 1).

Επειδή απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα έως ότου οι διεργασίες μορφολογικής ταπεινώσης επεκταθούν ανάντη στο τέμαχος που ανυψώνεται, οι μετρήσεις για τον προσδιορισμό του δείκτη Vf γίνονται συνήθως κοντά στο μέτωπο όρους, για παράδειγμα ανάντη του μετώπου σε απόσταση ενός χιλιομέτρου (Bull and McFadden, 1977) ή 250 μέτρων (Silva et al., 2003). Στην παρούσα εργασία, οι μετρήσεις για τον υπολογισμό του Vf κάλυψαν έκταση μεγαλύτερη του ενός χιλιομέτρου στα ανερχόμενα ρηξιτεμάχη και επεκτάθηκαν και κατάντη των μορφολογικών ασυνεχειών σε τεμάχη με παρόμοια γεωλογικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά με σκοπό να διαπιστωθεί αν ο δείκτης παρουσιάζει μόνο υψηλές τιμές ανεξάρτητα από τη λιθολογία και την ενέργεια του χειμάρρου (Σχήμα 5 - Πίνακας 1).



Σχήμα 5. Χάρτης των εγκάρσιων τομών των ρεμάτων Κουτσομέλι, Τουθόα και Γκούρα.

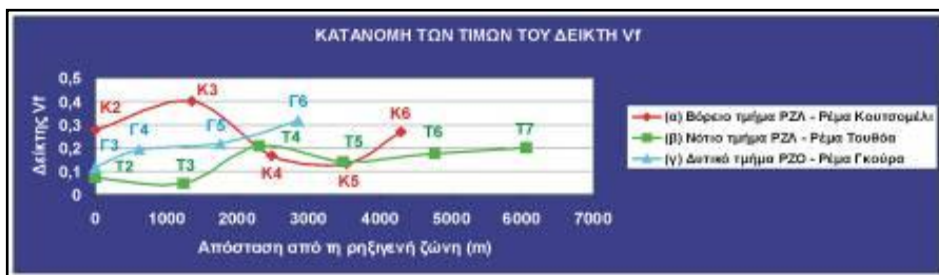
Οι τιμές του Vf για την περιθωριακή ρηξιγενή ζώνη Οχθίων κυμαίνονται από 0,116 έως 0,317 στο ανερχόμενο τέμαχος και από 0,161 έως 0,416 στο κατερχόμενο. Οι τιμές του Vf για την περιθωριακή ρηξιγενή ζώνη Λευκοχωρίου κυμαίνονται από 0,046 έως 0,400 στο ανερχόμενο τέμαχος και από 0,256 έως 1,875 στο κατερχόμενο. Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης υπολογίστηκε και η μέση τιμή του δείκτη Vf για κάθε κοιλάδα. Πιο συγκεκριμένα, οι μέσες τιμές του δείκτη Vf για τις κοιλάδες Κουτσομελίου, Τουθόας και

Γκούρα είναι 0, 25, 0, 140 και 0, 215 αντίστοιχα.

Πίνακας 1. Οι τιμές των παραμέτρων  $V_{fw}$ ,  $E_{ld}$ ,  $E_{rd}$  και  $E_{sc}$  και του δείκτη  $V_f$ .

Εγκάρσια Τομή	$V_{fw}$ (m)	$E_{ld}$ (m)	$E_{rd}$ (m)	$E_{sc}$ (m)	$V_f$
<b>K1</b> <b>PZΛ</b>	50	560	810	490	0,256
<b>K2</b>	25	680	600	550	0,277
<b>K3</b>	50	720	840	655	0,400
<b>K4</b>	50	1060	1080	770	0,167
<b>K5</b>	40	1145	1250	900	0,134
<b>K6</b>	60	1220	1340	1058	0,270
<b>T1</b> <b>PZΛ</b>	75	500	500	460	1,875
<b>T2</b>	25	960	680	480	0,073
<b>T3</b>	25	1240	924	550	0,046
<b>T4</b>	50	860	820	600	0,208
<b>T5</b>	75	1281	1080	645	0,140
<b>T6</b>	50	920	1120	735	0,175
<b>T7</b>	50	1000	1080	790	0,200
<b>Γ1</b>	100	640	240	200	0,416
<b>Γ2</b> <b>PZO</b>	50	780	320	240	0,161
<b>Γ3</b> <b>PZO</b>	25	460	530	280	0,116
<b>Γ4</b>	25	600	540	340	0,192
<b>Γ5</b>	75	810	760	440	0,217
<b>Γ6</b>	100	650	1060	540	0,317

Από τις παραπάνω τιμές του δείκτη  $V_f$  προκύπτουν τα εξής: (i) ο δείκτης  $V_f$  πλησίον των τεκτονικών δομών δίνει χαμηλές τιμές, ενώ μακριά από αυτές οι τιμές αυξάνονται, (ii) στα ανατολικά των ρηξιγενών ζωνών επικρατεί υψηλός βαθμός τεκτονικής ανύψωσης σε αντίθεση με τα δυτικά όπου λαμβάνει χώρα βύθιση, (iii) οι ρηξιγενείς ζώνες Οχθίων και Λευκοχωρίου κατατάσσονται στην 1η τάξη ενεργού/πρόσφατου τεκτονισμού σύμφωνα με την ταξινόμηση των Bull and McFadden (1977) και Silva et al. (2003), (iv) το νότιο τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης Λευκοχωρίου παρουσιάζει τη χαμηλότερη από τις μέσες τιμές  $V_f$ , γεγονός που υπογραμμίζει ότι η τεκτονική δραστηριότητα στο νότιο τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης Λευκοχωρίου είναι εντονότερη από τις άλλες δομές.



Διάγραμμα 1. Διάγραμμα κατανομής των τιμών του δείκτη  $V_f$  σε σχέση με την απόσταση από: (α) το βόρειο τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης Λευκοχωρίου, (β) το νότιο τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης Λευκοχωρίου και (γ) το δυτικό τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης Οχθίων.

Με σκοπό την παρακολούθηση της κατανομής των τιμών του δείκτη  $V_f$  κατά μήκος των ρεμάτων που διαρρέουν τις μορφολογικές ασυνέχειες των ρηξιγενών ζωνών, κατασκευάστηκε διάγραμμα στον οριζόντιο άξονα του οποίου προβάλλεται η απόσταση από το ρήγμα και στον κατακόρυφο άξονα οι τιμές του  $V_f$  (Διάγραμμα 1). Οι ανωμαλίες στην κατανομή των τιμών



του δείκτη  $V_f$  οφείλονται στην παρουσία ρηγμάτων και σε λιθολογικές εναλλαγές των γεωλογικών σχηματισμών στα ανερχόμενα τεμάχια.

## 5. Εκτίμηση σεισμικού κινδύνου

Η σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή μελέτης δεν είναι τόσο έντονη όσο στο δυτικό τμήμα της λεκάνης Πύργου - Ολυμπίας. Σύμφωνα με το μικροσεισμικό πείραμα των Hatzfeld et al. (1990) και τον κατάλογο επιφανειακών σεισμών για το χρονικό διάστημα 1973-2007 (USGS) διαπιστώθηκε η παρουσία επικέντρων σεισμών με μέγεθος από 3,6 έως 4,0, που θα μπορούσαν να συσχετιστούν με τη ρηξιγενή ζώνη Οχθίων (Fountoulis et al., 2007). Είναι εμφανές, όμως, ότι δεν υπάρχουν ενόργανα σεισμικά δεδομένα, που αποδεικνύουν επαναδραστηριοποίηση των ρηγμάτων.

Με βάση εξισώσεις που συσχετίζουν το μήκος ρήγματος με το μέγεθος σεισμού (Matsuda and Kinugasa, 1991; Wells and Coppersmith, 1994; Papazachos and Papazachou, 1997; Pavlides and Caputo, 2004) τα εν λόγω ρήγματα μπορούν να δώσουν σεισμικά γεγονότα των οποίων το μέγεθος κυμαίνεται από 4,3 έως 6,6 (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Τα υπό μελέτη ρήγματα μπορούν να δώσουν σεισμούς με μέγεθος που κυμαίνεται από 4,3 έως 6,6.

	Μήκος ρηγμάτων (m)	Μέγεθος σεισμού				Εξισώσεις συσχετισμού του μήκους ρήγματος με το μέγεθος σεισμού
		(1)	(2)	(3)	(4)	
Βόρειο τμήμα PZL	2.608	5,2	5,3	4,4	5,6	(1) Matsuda and Kinugasa (1991) $M = (\log L + 2,9) / 0,6$ (2) Wells and Coppersmith (1994) $M_w = (\log L + 3,22) / 0,69$ (3) Papazachos and Papazachou (1997) $M = (\log L + 1,85) / 0,51$ (4) Pavlides and Caputo (2004) $M_s = (\log L + 3,93) / 0,78$
Νότιο τμήμα PZL	2.151	5,4	5,2	4,3	5,5	
Βόρειο & νότιο τμήμα PZL	4.759	6	5,7	5	5,9	
Ανατολικό τμήμα PZO	3.485	5,7	5,5	4,7	5,7	
Δυτικό τμήμα PZO	7.720	6,3	6	5,4	6,2	
Ανατολικό & δυτικό τμήμα PZO	11.205	6,6	6,2	5,9	6,4	

## 6. Συμπεράσματα

Η μορφοτεκτονική ανάλυση περιελάμβανε: (α) αξιοποίηση των υπάρχοντων νεοτεκτονικών και γεωλογικών δεδομένων, (β) μελέτη της χωρικής κατανομής των επιφανειών επιπέδωσης, (γ) μελέτη της γεωμετρίας και της κατά βάθος διάβρωσης του υδρογραφικού δικτύου, (δ) κατασκευή επιμήκων και εγκάρσιων τοπογραφικών τμών, (ε) εφαρμογή μορφομετρικών δεικτών και (στ) μελέτη της σεισμικότητας της περιοχής.

Η γεωμετρία και η κατά βάθος διάβρωση του υδρογραφικού δικτύου είναι αποτέλεσμα έντονων ανυψωτικών κινήσεων των τεμαχίων που οριοθετούνται και ελέγχονται από τις ρηξιγενείς ζώνες της περιοχής. Ειδικότερα, οι ζώνες έντονης κατά βάθος διάβρωσης είναι άμεσα και δυναμικά συνδεδεμένες με το τεκτονικό καθεστώς της περιοχής και αναπτύσσονται κυρίως κάθετα στις ρηξιγενείς ζώνες. Οι επιλεκτικές διευθύνσεις, τα απότομα σημεία καμψής και οι απότομες αλλαγές της ροής αποκαλύπτουν την επίδραση της νεοτεκτονικής παραμόρφωσης στη διαμόρφωση της σημερινής εικόνας του υδρογραφικού δικτύου. Επιπλέον, οι ενδογενείς τεκτονικές διεργασίες ελέγχουν τη χωρική κατανομή και το υψόμετρο των επιφανειών επιπέδωσης που έχουν δημιουργηθεί στο αλπικό υπόβαθρο της περιοχής.

Από τη μορφή των επιμήκων τοπογραφικών τομών των υδρορευμάτων που διαρρέουν εγκάρσια τις μορφολογικές ασυνέχειες των ρηξιγενών ζωνών γίνονται αντιληπτές απότομες αλλαγές των κλίσεων κατά μήκος της κοίτης του κλάδου που συνδέονται κυρίως με τεκτονικές δομές.

Από τη μορφή των εγκαρσίων τοπογραφικών τομών διαπιστώθηκαν κοιλάδες V μορφής με ρέματα που διαβρώνουν κατά βάθος λόγω έντονης τεκτονικής ανύψωσης στα ανερχόμενα και U μορφής στα κατερχόμενα τεμάχια.

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς των δεικτών Smf και Vf και την ταξινόμηση των Bull and McFadden (1977), Rockwell et al. (1984), Keller (1986) και Silva et al. (2003), οι ρηξιγενείς ζώνες Λευκοχωρίου και Οχθίων κατατάσσονται στην 1η τάξη ενεργού / πρόσφατου τεκτονισμού με το νότιο τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης Λευκοχωρίου να παρουσιάζει εντονότερη τεκτονική δραστηριότητα.

Τα μορφομετρικά δεδομένα συμπεριλαμβανομένων των μορφομετρικών δεικτών και των επιμήκων και εγκαρσίων τομών ενισχύουν την άποψη των Fountoulis et al. (2007) υπέρ της ενεργότητας των ρηξιγενών ζωνών Λευκοχωρίου και Οχθίων.

## Βιβλιογραφία

Θεοχάρης, Δ. & Φουντούλης, Ι. 2002. Μορφομετρικοί δείκτες και ενεργές τεκτονικές δομές. Η περίπτωση της Σαλαμίνας. Πρακτικά 6ου πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρείας, τομ. Ι σελ. 97-106.

Κατσιαβριάς, Ν., 1991. Γεωλογική δομή της περιοχής Λευκοχωρίου - Μύλων Κεντροδυτικής Πελοποννήσου. Διδ. Διατριβή, σ. 172, Ε.Μ.Π.

Λαλεχός, Ν., 1974. Η γεωλογική δομή της Κεντροδυτικής Πελοποννήσου. Διατριβή επί διδακτορία, 94 σελ., Πανεπιστήμιο Πατρών.

Λέκκας, Ε., Παπανικολάου, Δ. & Φουντούλης, Ι., 1992. Νεοτεκτονικός χάρτης της Ελλάδας, Φύλλο Πύργος - Τρόπαια (κλίμακα 1/100.000). Πρόγραμμα, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τομέας Δυναμικής Τεκτονικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.

Παπανικολάου, Δ., 1986. Γεωλογία της Ελλάδας. 240 σελ. Αθήνα.

Φουντούλης, Ι., 1994. Νεοτεκτονική εξέλιξη της Κεντροδυτικής Πελοποννήσου. Διδακτορική διατριβή, Τομέας Δυναμικής Τεκτονικής Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Αθηνών, ΓΑΙΑ 7, 386 σ.

Bull, W., 1977a. Tectonic geomorphology of the Mojave Desert. U.S. Geol. Surv. Contact Rep. 14-08-001-G-394, Office of Earthquakes, Volcanoes and Engineering, Menlo Park, Calif., 188.

Bull, W., 1978. Geomorphic tectonic activity classes of the south front of the San Gabriel Mountains, California. U. S. Geol. Surv. Contact Rep. 14-08-001-G-394, Office of Earthquakes, Volcanoes and Engineering, Menlo Park, Calif., 59.

Bull, W. & McFadden, L., 1977. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock Fault, California, Geomorphology in Arid regions, D. O. Doehring, ed., Publications in Geomorphology, State University of New York at Binghamton, 115 - 138.

Fountoulis, I., Mavroulis, S. & Theocharis, D. 2007. The morphotectonic structure of the transitional zone between the Gortynia Mt. horst and the Pyrgos-Olympia basin (Central - Western Peloponnese, Greece). Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXVII, 2007, Proceedings of the 11th International Congress, Athens, May, 2007.

Gomez, F., Barazangi, M. & Bensaid, M., 1996. Active tectonism in the intracontinental

Middle Atlas Mountains of Morocco: synchronous crustal shortening and extension. *J. Geol. Soc. London* 153, 389–402.

Hagemann, J., 1977. Stratigraphy and sedimentary history of the Upper Cenozoic of the **Pyrgos area (W. Peloponnesus, Greece)**. *Ann. Géol. Pays Hellén.*, 30/2, 441-454. XXVIII, 299-333.

Hatzfeld, D., Pedotti, G., Hatzidimitriou, P. & Makropoulos, K., 1990. The strain pattern in the western Hellenic arc deduced from a microearthquake survey. *Gophys. J. Int.*, 101, 181-202.

**Jacobshagen, V., Dürr, S., Kockel, F., Kopp, K.O., Kowalczyk, G., Berckhemer, H. & Büttner, D.**, 1978. Structure and geodynamic evolution of the Aegean region. In: H. Closs, D. Roeder and K. Schmidt, Editors, *Alps, Apennines, Hellenides*. - Inter. Union Comm. Geodynamics Sci. Rep. Stuttgart. vol. 38 (1978), pp. 537-564.

Keller E., 1986. Investigation of active tectonics: use of surficial earth processes. In: Wallace, R. E. (eds), *Active Tectonics studies in Geophysics*. Nat. Acad. Press, Washington, Dc, 136 – 147.

Lekkas, E., Fountoulis, I. & Papanikolaou, D., 2000. Intensity Distribution and Neotectonic Macrostructure Pyrgos earthquake data (26 March 1993, Greece). *Natural Hazards*, 21: 19-33.

Matsuda, T. and Kinugasa, Y. 1991. Active faults in Japan. *Episodes*, V14, No3, 199-204.

Papazachos, B.C. and Papazachou, C. 1997. *The Earthquakes of Greece*. Editions ZITI, Thessaloniki. 304 pp.

**Pavlidis and Caputo. 2004. Magnitude versus faults' surface parameters: quantitative relationships from the Aegean Region.** *Tectonophysics* 380 (2004) 159– 188

Rhea, S., 1989. Evidence of uplift near Charleston, South Carolina. *Geology* 17, 311-315.

Rockwell, T.K., Keller, E.A. and Johnson, D.L. 1984. Tectonic geomorphology of alluvial fans and mountain fronts near Ventura, California. In: Morisawa, M., Hack, T.J. (Eds.), *Tectonic Geomorphology*. Publ. in *Geomorphology*, State University of New York, Binghamton, pp. 183– 207.

Seeber, L. & Gornitz, V.M., 1983. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. *Tectonophysics* 92, 335-367.

Silva, P., Goy, J., Zazo, C. & Bardaji, T., 2003. Fault - generated mountain fronts in southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and seismic activity. *Geomorphology* 50, 203 – 225.

Wells S. G., Bullard T. F., Menges C. M., Drake P.G., Karas P. A., Kelson K. I., Ritter J. B., Wesling J. R. 1988. Regional variations in tectonic geomorphology along a segmented convergent plate boundary, Pacific coast of Costa Rica. *Geomorphology* 1, 239 – 265.

Wells, D.L. and Coppersmith, K.J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 84, 974– 1002.

USGS National Earthquake Information Center - NEIC: <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>