

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΟ ΚΟΛΠΟ

Ζυγούρη Β.¹, Βέρροιος Σ.¹, Κοκκάλας Σ.¹, Ξυπολιάς Π.¹, Κουκουβέλας Ι.¹, και Παπαδόπουλος Γ.²

¹ Τομέας Γενικής Θαλάσσιας Γεωλογίας και Γεωδυναμικής, Τμήμα Γεωλογίας, Π.Π. 265 00 Πάτρα, iannis@upatras.gr

² Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Λόφος Νυμφών, Θησείο, 118 10 Αθήνα, papadop@gein.noa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η περιοχή της Κορινθίας αποτελεί μια ταχύτατα αναπτυσσόμενη περιοχή φιλοξενώντας σημαντικότερες υποδομές που διευκολύνουν τόσο τον σύγχρονο κάτοικο της όσο και τους κατοίκους γειτονικών περιοχών. Οι νέες δυνατότητες επέφεραν ακόμα μεγαλύτερη οικιστική και εμπορική ανάπτυξη η οποία φαίνεται να έχει ανοδική πορεία. Η ανάπτυξη αυτής της περιοχής μπορεί να απειληθεί από την εξίσου σημαντική σεισμική δραστηριότητα που εμφανίζει και είχε ως αποτέλεσμα σε προηγούμενους ιστορικούς χρόνους, εκτεταμένες καταρρεύσεις κτηρίων, θανάτους ή και την πλήρη καταστροφή της πόλης. Σήμερα, νέες επιστημονικές μέθοδοι οι οποίες υλοποιούνται στην περιοχή επικεντρώνονται στα εντυπωσιακά ρηξιγενή πρηνή που διατρέχουν τη περιοχή. Εξαιρετικά αποδοτικές είναι οι μελέτες που αφορούν τις κλασματικές κατανομές δύο διαφορετικών κατά βάση πληθυσμών ρηγμάτων στον Κορινθιακό κόλπο, όπως είναι ο χερσαίος και ο υποθαλάσσιος και οι οποίες υποδηλώνουν τη συνένωση ρηγμάτων ως κύρια διαδικασία ανάπτυξης. Αντίστοιχα, η γεωμορφολογική αποτύπωση των μεταβολών στις οποίες υπόκειται το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής εξαιτίας της δράσης των ενεργών ρηγμάτων, αναδεικνύει τον πρωτεύοντα ρόλο των ρηγμάτων στην απόθεση στο εσωτερικό του Κορινθιακού κόλπου.

GROWTH OF FAULTS WITHIN THE GULF OF CORINTH

Zygouri V.¹, Verroios S.¹, Kokkalas S.¹, Xypolias P.¹, Koukouvelas I.¹, and Papadopoulos G.²

¹ Division of Physical Geology, Marine Geology and Geodynamics, Department of Geology, University of Patras, 265 00, Patras, iannis@upatras.gr,

² Geodynamic Institute, National Observatory of Athens, Lofos Nymfon, Thissio, 118 10, Athens papadop@gein.noa.gr

ABSTRACT

The area of Corinthos constitutes a strongly developing region hosting significant infrastructure that facilitates the residents' daily routine. However, the fast development of this area can be threatened by the significant seismic risk that affects the whole area and during the last 2000 years had as a consequence, the extensive collapses, death casualties or even the total demolition of cities. Today, new scientific methods that have already been undertaken in the area, focus on the spectacular fault scarps that dissect the Gulf of Corinth. The studies, concerning the fractal analysis of two different fault populations, lying offshore and onshore within the gulf, can be extremely productive by underlying the coalescence between faults as the main growth process. In correspondence, the geomorphological analysis of the deflections of the drainage pattern of the area due to the activity of the faults, consider active faults as particular key markers controlling the deposition within the inner part of the Gulf of Corinth.

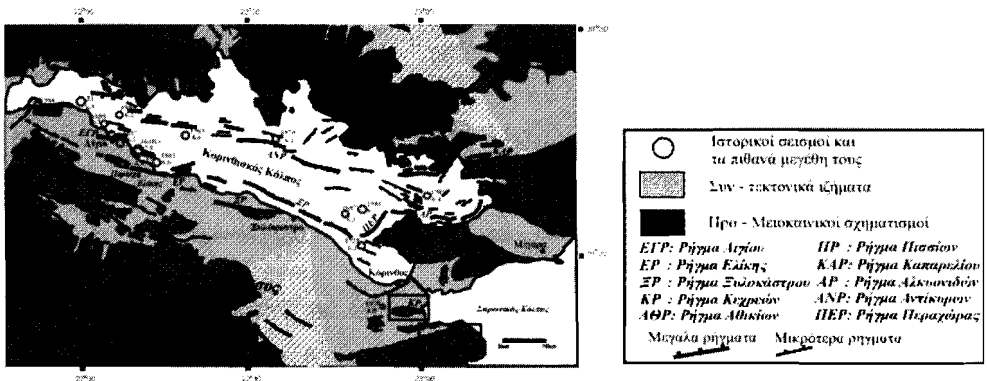
Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η σεισμικότητα του Κορινθιακού αποτελεί αντικείμενο έρευνας από την αρχαιότητα, καθώς οι ισχυροί σεισμοί που φιλοξένησε η περιοχή είχαν σαν αποτέλεσμα την απώλεια πολλών ανθρώπινων ζωών ή ακόμα και την καταστροφή ολόκληρων πόλεων. Ήδη ο Στράβων (64-24 π.Χ.) στα «Γεωγραφικά» και ο Πλουταρχός (110-170 μ.Χ.) στις «Περιηγήσεις» περιέγραψαν την ολική καταστροφή αρχαίων πόλεων όπως της Εφύρας (αρχαία Κόρινθος), που οφείλονται στη δράση καταστρεπτικών σεισμών. Αλλά και η σημερινή ενόργανα καταγεγραμμένη σεισμικότητα είναι εξίσου βίαιη και καταστρεπτική.

Είναι αξιοσημείωτο ότι πέντε γεγονότα με μέγιστο σεισμικό μέγεθος μεγαλύτερο από 5.8 έχουν παρατηρηθεί στην ευρύτερη περιοχή κατά τη διάρκεια των τελευταίων 150 χρόνων (Ambraseys & Jackson 1990, Papazachos & Papazachou, 1997, Papadopoulos et al., 2000). Τα επίκεντρα των σεισμών τα οποία συνδέονται με τη σχεδόν Β – Ν διαστολή του Κορινθιακού κόλπου συγκεντρώνονται σε διακριτές ομάδες όπως είναι αυτές των περιοχών μεταξύ Αιγίου – Ακράτας και της Κορίνθου (Σχ. 1). Αυτή η χωρική κατανομή συμπίπτει με την ανατολική (περιοχή Κορίνθου) και τη δυτική (περιοχή Αιγίου – Ακράτας) απόληξη της Κορινθιακής τάφρου (Κουκουvelas & Doutsos, 1996).

Ο σκοπός αυτής της εργασίας έχει ως αντικείμενο τη μελέτη των κατανομών δύο πληθυσμών ενεργών ρηγμάτων στον Κορινθιακό κόλπο, που τοποθετούνται στη ξηρά και στη θάλασσα. Οι τεκτονικές διαδικασίες είναι αποδεδειγμένο ότι εμφανίζουν κλασματικές ιδιότητες τόσο στο χρόνο όσο και στον τόπο. Ιδιαίτερα τα ενεργά ρήγματα μπορούν να εμφανίζονται σε κλασματικά μοτίβα από τα οποία προκύπτουν κλασματικά μοντέλα τα οποία μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια την εξέλιξη της κίνησης κατά μήκος μιας κύριας ζώνης ρηγμάτων (Turcotte, 1992). Τα ρήγματα αυτά θεωρούνται υπεύθυνα για τη σεισμική και τεκτονική εξέλιξη του Κορινθιακού κόλπου και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, όπως είναι το μήκος και το άλμα τους, μπορούν να αποδοθούν από εκθετικές μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε ασφαλή συμπεράσματα για την τεκτονική συμπεριφορά των ρηγμάτων κατά μήκος του κόλπου. Επιπλέον, η εξέλιξη του αναγλύφου μιας περιοχής μπορεί να αποτυπωθεί μέσα από τη μορφοτεκτονική, που αποτελεί μια ποσοτική προσέγγιση της ενεργούς τεκτονικής της θέσης. Η μεταβολή στην απορροή ενός ποταμίου συστήματος συγκροτεί κυρίαρχη συνιστώσα σε μια μορφοτεκτονική ανάλυση αφού σχετίζεται άμεσα με τη δράση και την επανάρθρωση ενεργών ρηγμάτων και με τον τρόπο εξέλιξής τους. Η εκτίμηση μορφομετρικών δεικτών με τους οποίους μπορεί να γίνει η ποσοτικοποίηση των ρυθμών εξέλιξης ενός ρήγματος, δύναται να χρησιμοποιηθεί στην αποσαφήνιση της ενεργούς τεκτονικής μιας περιοχής δηλαδή αν μια περιοχή είναι περισσότερο ή λιγότερο ενεργή από μια παρακείμενη της.



Σχήμα 1. Χάρτης στον οποίο αποτυπώνονται τα κυριότερα ενεργά ρήγματα του Κορινθιακού κόλπου και η γεωγραφική κατανομή των κυριότερων σεισμικών γεγονότων και των πιθανών μεγεθών καθώς και οι περιοχές μελέτης που περιγράφονται στην ενότητα 3.2 εντός των πλαισίων.

2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο πρώτο στάδιο της παρούσας εργασίας η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, βασίστηκε στη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων η οποία περιλάμβανε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ενεργών ρηγμάτων της περιοχής του Κορινθιακού κόλπου, όπως είναι το μήκος και το άλμα τους. Η χρήση του άλματος των ρηγμάτων ως μια προσέγγιση της μετατόπισης κατέστη αναγκαία, καθώς ο προσδιορισμός της μετατόπισης τουλάχιστον στα υποθαλάσσια ρήγματα δεν είναι πάντοτε σαφής εξαιτίας είτε κακής καταγραφής, είτε της ύπαρξης θορύβου κατά την καταγραφή. Επομένως για λόγους ομογενοποίησης των δεδομένων τόσο στη ξηρά όσο και στη θάλασσα, προσδιορίστηκε το άλμα των ρηγμάτων. Στη συνέχεια βασιζόμενοι σε αυτή τη βάση δεδομένων και την κατασκευή θεματικών χαρτών όπου αποτυπώθηκαν οι χαρακτηριστικές μορφολογικές αλλαγές που προέκυψαν από την εξέλιξη των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ρηγμάτων, ώστε να διαπιστωθεί αν εμφανίζουν κλασματικές κατανομές. Οι

κλασματικές αυτές κατανομές αποδόθηκαν μέσω του προγράμματος Origin και απέδειξαν την ύπαρξη κλασματικών εκθετικών σχέσεων μεταξύ των δύο πληθυσμών ρηγμάτων κατά μήκος του Κορινθιακού. Η ακρίβεια της ανάλυσης εξαρτάται κάθε φορά από τη κλίμακα του χρησιμοποιούμενου χάρτη για τον προσδιορισμό κάθε ρήγματος. Το επιτρεπτό λάθος στην ακρίβεια προσδιορισμού των μηκών των υποθαλασσιών ρηγμάτων είναι μικρότερο από 5-7% ενώ το αντίστοιχο επιτρεπτό λάθος για τα ρήγματα στα ηξρά δεν ξεπερνά το 5%. Γενικά, θεωρούμε ότι βασίζομενοι στη βαθυμετρία του κόλπου, τα υποθαλασσια ρήγματα έχουν αποδοθεί πολύ ικανοποιητικά, καθώς βασιστήκαμε σε τουλάχιστον τρία σεισμικά προφίλ για κάθε ρήγμα. Επίσης τα ρήγματα στη ξηρά σε περιοχές πολύ καλής ανάλυσης όπου τα δεδομένα παρουσιάστηκαν σε χάρτες κλίμακας 1:5000, το λάθος στον προσδιορισμό δεν μπορεί παρά να είναι ελάχιστο, περίπου $\pm 10\text{m}$ στις απολήξεις κάθε ρήγματος. Αντίστοιχα το άμα των ρηγμάτων είναι μικρότερο από 2% τόσο στο θαλάσσιο χώρο όσο και στο χερσαίο.

Το δεύτερο στάδιο της εργασίας περιλαμβάνει τη μορφοτεκτονική ανάλυση επιλεγμένων ρηγμάτων της περιοχής της Κορινθίας όπως είναι το ρήγμα των Κεχρεών και τα ρήγματα στην περιοχή του Σοφικού (Σχ. 1). Η μορφοτεκτονική ανάλυση βασίζεται στην ανάγκη αναγνώρισης των μεταβολών στις οποίες υπόκειται το υδρογραφικό δίκτυο αλλά και στην ποσοτικοποίηση κυρίως του πρόποδα των ρηγμάτων και της ανάλυσης των κλιτύων των διαβρωσιγενών ρεμάτων πίσω από τον ενεργό πρόποδα, με τη χρήση δύο χαρακτηριστικών μορφομετρικών δεικτών.

Ο πρώτος δείκτης (S_{mf}) ο οποίος αναφέρεται στην ιδιότητα ευθυγράμμισης του πρόποδα μιας τεκτονικά ελεγχόμενης λοφοσειράς (Bull & McFadden, 1977), υπολογίζεται από τη μαθηματική σχέση:

$$S_{mf} = L_{mf}/L_s \quad (1)$$

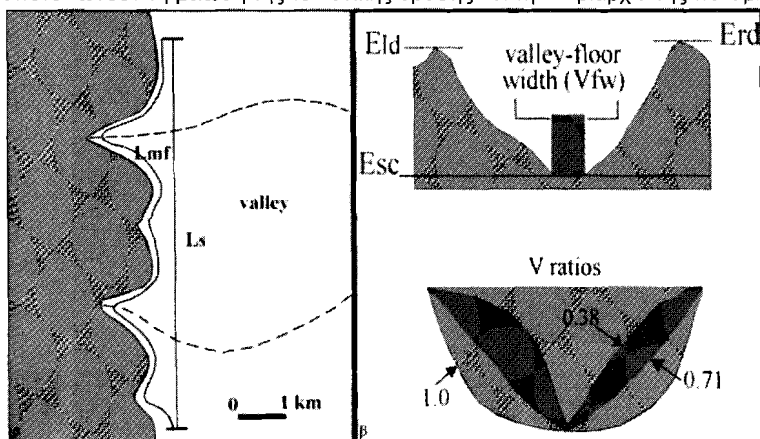
όπου L_{mf} είναι το μήκος του σημερινού πρόποδα του ρήγματος και L_s είναι το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος που συνδέει τα δύο άκρα του πρόποδα (Σχ. 2α). Ο δείκτης αντιπροσωπεύει την ισορροπία μεταξύ των διαβρωσιγενών και των τεκτονικών διαδικασιών. Η ελάχιστη τιμή του είναι η μονάδα η οποία χαρακτηρίζει την έντονη τεκτονική δραστηριότητα, ενώ όσο αυτή η τιμή αυξάνει και προσεγγίζει την τιμή 2 τόσο αυξάνει και η επίδραση της διάβρωσης στο τεκτονικό πραινές. Επομένως είναι σαφές ότι η ακρίβεια τόσο της χαρτογράφησης, δηλαδή της εργασίας πεδίου, όσο και η κλίμακα στην οποία αυτή πραγματοποιείται επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων και κατ' επέκταση τον υπολογισμό του δείκτη.

Ο δεύτερος δείκτης που εφαρμόστηκε είναι η αναλογία της κατά πλάτος και κατά βάθος διάβρωσης χειμάρρων (V_f) ο οποίος εξετάζει την αποτύπωση των ανοδικών ή καθοδικών κινήσεων στις κοίτες των ποτάμιων συστημάτων (Burbank & Anderson, 2001). Η μαθηματική σχέση που την εκφράζει είναι:

$$V_f = 2V_{fw}/[(E_{ld}-E_{sc})+(E_{rd}-E_{sc})] \quad (2)$$

όπου V_{fw} είναι το εύρος της ποτάμιας κοιλάδας στη θέση υπολογισμού του δείκτη, E_{sc} είναι το υψόμετρο της ποτάμιας κοίτης και E_{ld} και E_{rd} είναι το αριστερό και το δεξί υψομετρικό όριο της υδρολογικής λεκάνης αντίστοιχα (Σχ. 2β).

Το σχήμα της διατομής μιας κοιλάδας εξαρτάται από τους επικρατούντες κλιματικούς παράγοντες, από τη λιθολογία, από τη διαβρωτική δράση των ποτάμιων συστημάτων και από τη τεκτονική δράση. Η συνδυασμένη δράση όλων αυτών των παραγόντων έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία οξυληκτων ή παραβολικών κοιλάδων. Συνήθως οι οξυληκτες κοιλάδες εκφράζουν την έντονη τεκτονική δράση, ενώ οι παραβολικού σχήματος κοιλάδες επισημαίνουν την επικράτηση της διάβρωσης έναντι της τεκτονικής. Αν και δεν είναι σαφές, ωστόσο είναι εμπειρικά αποδεκτό ότι το όριο μιας τεκτονικά ενεργής περιοχής αποτυπώνεται στην τιμή 1 για τον δείκτη V_f μιας εξεταζόμενης κοιλάδας. Επομένως τιμές του δείκτη μικρότερες της μονάδας προσδιορίζουν τεκτονικά ενεργές περιοχές, ενώ τιμές μεγαλύτερες της μονάδας αποτυπώνουν τη μείωση της τεκτονικής δράσης και την κυριαρχία της ποτάμιας διάβρωσης.



Σχήμα 2. α) Απλοποιημένο γράφημα που δείχνει τον τρόπο υπολογισμού του δείκτη ευθυγράμμισης του πρόποδα S_{mf} (τροποποιημένο από Burbank & Anderson, 2001). β) Τμήμα της εικόνας που δείχνει τον τρόπο υπολογισμού του δείκτη κατά βάθους και κατά πλάτους διάβρωσης χειμάρρων V_f (τροποποιημένο από Burbank & Anderson, 2001).

3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1 Αναγνώριση ενεργών ρηγμάτων του Κορινθιακού κόλπου

Η διαστολή στον Κορινθιακό κόλπο πιστεύεται ότι άρχισε στο Πλειόκαινο (Ori, 1989; Doutsos & Piper, 1990; Roberts, 1996; Briole et al., 2000; Doutsos & Kokkalas, 2001), ενώ στο νοτιότερο χερσαίο τμήμα του κόλπου ξεκίνησε στις αρχές του Πλειστοκαινού (Doutsos & Piper, 1990). Πολλοί συγγραφείς θεωρούν τον κόλπο ως μια ασύμμετρη τάφρο με ρήγματα που κλίνουν προς τον βορρά συγκεντρωμένα στο νότιο τμήμα του κόλπου (Keraudren & Sorel, 1987; Ori, 1989; Sorel, 2000), αλλά αυτή η άποψη έχει τεθεί πλέον υπό αμφισβήτηση μετά την αναγνώριση καλά ανεπτυγμένων συζυγών ρηγμάτων που κλίνουν είτε προς βορρά είτε προς νότο στον υποθαλάσσιο χώρο του Κορινθιακού (Stefatos et al., 2002; Moretti et al., 2003; Paratheodorou et al., 2003; McNeill et al., 2005, 2007). Επιπλέον τα ενεργά ρήγματα που έχουν αναγνωριστεί στη βόρεια ακτή του Κορινθιακού και κλίνουν προς νότο όπως είναι το ρήγμα των Δελφών και του Μαραθιά (Gallousi & Koukouvelas, 2007) συνηγορούν υπέρ αυτής της θεωρίας.

3.1.1 Κριτήρια ενεργότητας ρηγμάτων

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζουμε στοιχεία για 136 ενεργά ρήγματα. Ως ενεργό υποθαλάσσιο ρήγμα θεωρείται οποιοδήποτε ρήγμα το οποίο κόβει και μετατοπίζει τεταρτογενή ιζήματα δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο ένα υποθαλάσσιο πρανές. Αντίστοιχα τα ενεργά ρήγματα στη ξηρά αναγνωρίζονται από μια πληθώρα χαρακτηριστικών. Αυτά είναι:

- α) η γωνία κλίσης του πρανούς να ξεπερνά τις 25° μοίρες,
- β) η μετατόπιση Πλειστοκαινικών ιζημάτων, πρόσφατων θαλάσσιων αναβαθμιδών και πρόσφατων αλλοβιακών ριπιδίων,
- γ) ο έλεγχος σε ευστατικές κινήσεις της στάθμης της θάλασσας,
- δ) ο έλεγχος της απορροής του υδρογραφικού δικτύου,
- ε) ο σχηματισμός ή η μετατόπιση κολλουβιακών πρισμάτων και
- στ) η αναγνώριση φρέσκων γραμμών ολίσθησης στη βάση ενός ασβεστολιθικού πρανούς.

Η ενεργότητα των ρηγμάτων επίσης αποδίδεται σε ιστορικές επιφανειακές διαρρήξεις που συσχετίζονται με την επαναληπτική δραστηριότητα των ρηγμάτων (π.χ. οι διαρρήξεις που συσχετίζονται με τα ρήγματα του Καταρελίου, των Πισίων, της Ελίκης και του Αιγίου).

Από τα 136 ενεργά ρήγματα που μελετήθηκαν τα 76 είναι υποθαλάσσια και τα 60 βρίσκονται στη ξηρά (Σχ. 3). Αποφύγαμε να επεκτείνουμε την ανάλυσή μας στις βόρειες ακτές του Κορινθιακού κόλπου καθώς παρά το γεγονός ότι ορισμένα ρήγματα είναι πολύ καλά προσδιορισμένα (π.χ. το ρήγμα του Μαραθιά), τα νέα ιζήματα στην περιοχή είναι σπάνια κι έτσι ο ηλικιακός προσδιορισμός των ρηγμάτων της περιοχής καθίσταται αβέβαιος. Επίσης τα περισσότερα από τα ρήγματα της περιοχής φαίνεται να είναι κληρονομημένες δομές (Skourlis & Doutsos, 2003). Για αυτούς τους λόγους ο καθορισμός των κλασματικών χαρακτηριστικών αυτών των ρηγμάτων θεωρήθηκε ότι περιλαμβάνει υψηλή αβεβαιότητα και αποκλείστηκε από την παρακάτω μελέτη.



Σχήμα 3 Χάρτης που απεικονίζει τα ενεργά ρήγματα της περιοχής που μελετήθηκαν, τους ρυθμούς ολίσθησης (mm/yr) του Κορινθιακού Κόλπου (Θεόφραστους, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.) και τις θέσεις διάτρησης στο εσωτερικό του κόλπου.

3.1.2 Μήκος ρηγμάτων

Τα ιστογράμματα του σχήματος 4 (α, β) δείχνουν ότι η πλειοψηφία των ρηγμάτων εμφανίζουν μικρές τιμές μήκους, μικρότερες από 5km. Η συστηματική μείωση του αριθμού των ρηγμάτων με το μήκος υποδηλώνει εκθετικές κατανομές για τα μήκη των δύο πληθυσμών. Το μήκος των ρηγμάτων και η αθροιστική συχνότητα στη συνέχεια προβλήθηκαν σε λογαριθμικά διαγράμματα (Σχ. 4γ, δ) ώστε να διαπιστωθούν προβλήματα κατά τη δειγματοληψία. Και στα δύο διαγράμματα οι κατανομές είναι δι-κλασματικές και αυτές οι ευθείες περιγράφονται από τις παρακάτω μαθηματικές σχέσεις:

για τα υποθαλάσσια ρήγματα

$$\log(N) = -0.98\log(L)+5.16 \quad (3)$$

για τιμές του μήκους (L) που κυμαίνονται από 2 ως 5 km.

$$\log(N) = -1.94\log(L)+8.70 \quad (4)$$

για τιμές του μήκους (L) που κυμαίνονται από 5 ως 9 km.

Για τα ρήγματα στη ξηρά

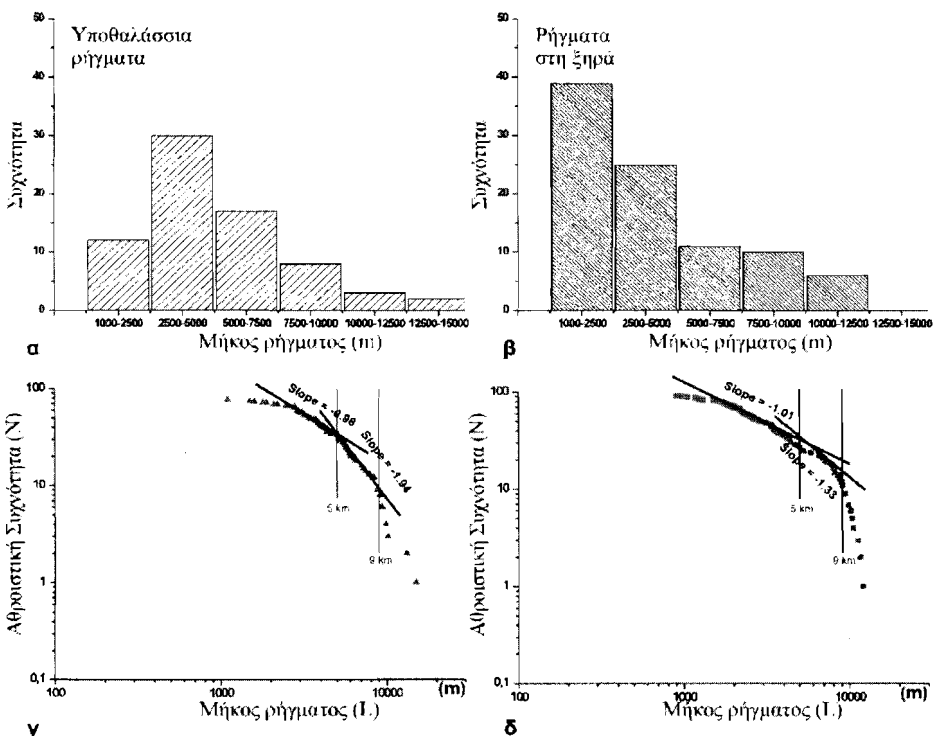
$$\log(N) = -1.01\log(L)+5.18 \quad (5)$$

για τιμές του μήκους (L) που κυμαίνονται από 2 ως 5 km.

$$\log(N) = -1.33\log(L)+6.38 \quad (6)$$

για τιμές του μήκους (L) που κυμαίνονται από 5 ως 9 km.

Οι παραπάνω συχνοτικές κατανομές περιλαμβάνουν το φαινόμενο της αποκοπής (truncation effect και finite range effect) των πολύ μικρών και πολύ μεγάλων τιμών του μήκους και για αυτό το λόγο οι τιμές αυτές δεν ελήφθησαν υπόψη κατά την ανάλυση. Το κλασματικό μέγεθος D και στα δύο διαγράμματα είναι περίπου ίσο (0.98 και 1.01) για μήκη μικρότερα από 5km, ενώ ουσιαστική διαφορά εμφανίζει για μήκη ρηγμάτων μεγαλύτερα από 5 km (1.94 και 1.33). Τέτοιες διαφορές στο κλασματικό μέγεθος D μαρτυρούν μια αύξηση της σημαντικότητας των ρηγμάτων στη ξηρά όσον αφορά τη συγκέντρωση των τάσεων. Οι απότομες αλλαγές στις ευθείες που περιγράφουν τους δύο πληθυσμούς (Σχ. 4γ, δ) υποδεικνύουν ότι μεταξύ των δύο πληθυσμών υπάρχουν απότομες αυξομειώσεις του αριθμού των ρηγμάτων σε συγκεκριμένα μήκη ρηγμάτων. Τα δύο τμήματα για κάθε πληθυσμό είναι ενδεικτικά των διαφορετικών σταδίων εξέλιξης μεταξύ διαφορετικών ρηξιγενών τεμαχών. Επομένως μπορούν να αντανακλούν τη διαδικασία συνένωσης των τεμαχών ενός ρήγματος μέσω της οποίας αντικαθίστανται δύο ρηξιγενή τεμάχια από ένα μεγαλύτερο ρήγμα (Mansfield & Cartwright, 2001).



Σχήμα 4. Ιστογράμματα συχνότητας – μήκους ρήγματος των υποθαλασσίων (α) και στην ξηρά (β) ρηγμάτων. (γ), (δ): Διαγράμματα αθροιστική συχνότητας – μήκους ρηγμάτων για τον υποθαλάσσιο και το χερσαίο τμήμα του Κορινθιακού, αντίστοιχα.

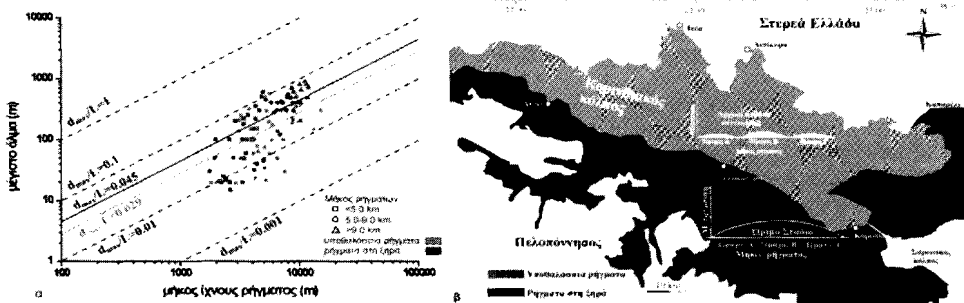
3.1.3 Σχέση άλματος και μήκους ρηγμάτων

Η προβολή σε διάγραμμα του άλματος και του συνολικού μήκους των ρηγμάτων δείχνει ότι οι τιμές τους περιορίζονται από μια ομάδα ευθειών (Σχ. 5α), που αντιπροσωπεύουν το λόγο του άλματος d ως προς το μήκος ενός ρήγματος (Cowie & Scholz, 1992). Παρά το γεγονός ότι περιορισμοί από τη λιθολογία και τη σεισμική ιστορία δεν πρέπει να παρακάμπτονται, γενικά και οι δύο πληθυσμοί φαίνεται να έχουν όμοια συστηματική αύξηση του άλματος με την αύξηση του μήκους. Ωστόσο για ρήγματα μήκους μικρότερα των 5km οι τιμές του άλματος εμφανίζουν μεγάλο εύρος διασποράς το οποίο μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του μήκους (Σχ. 5α). Για λόγους άμεσης σύγκρισης λάβαμε τους μέσους όρους των λόγων για κάθε πληθυσμό ρηγμάτων οι οποίοι εκφράζονται από τις σχέσεις:

$$d_{\max} = 0.029L \text{ για τα υποθαλάσσια ρήγματα} \quad (7)$$

$$d_{\max} = 0.045L \text{ για τα ρήγματα στη ξηρά} \quad (8)$$

Αρα και οι δύο πληθυσμοί εμφανίζουν λόγους που κείτονται κάτω από τη γραμμή ανάπτυξης (Σχ. 5α) με στάδια ανάπτυξης που αντικατοπτρίζουν τη δική τους ιστορία ανάπτυξης και φανερώνουν ότι η πλευρική ανάπτυξη των υποθαλασσίων ρηγμάτων ήταν πιο έντονη σε σχέση με αυτή των ρηγμάτων στη ξηρά όπου η αύξηση του μήκους και του άλματος των ρηγμάτων έλαβε χώρα ταυτόχρονα. Επομένως υποθέτουμε ότι η εξέλιξη των ρηγμάτων στο υποθαλάσσιο και στο χερσαίο τμήμα του κόλπου είναι διαφορετική. Η ανάπτυξη των ρηγμάτων μέσα από την πλευρική εξάπλωση μικροδιαρρήξεων καταλαμβάνει μεγαλύτερη αναλογία στα υποθαλάσσια ρήγματα μήκους <5 km (Σχ. 5β). Η συνένωση και η αλληλεπίδραση των ρηγμάτων ξεκινά σε ένα νεότερο στάδιο στα ρήγματα της ξηράς σε σχέση με την υποθαλάσσια περιοχή όπου μικρά σε μήκος ρήγματα διαθέτουν μικρό άλμα. Επιπλέον, τα συμπεράσματα από την κατανομή του άλματος και του μήκους επιβεβαιώνουν ότι και οι δύο πληθυσμοί ακολουθούν παρόμοια στάδια εξέλιξης για ρήγματα >9 km μήκους.



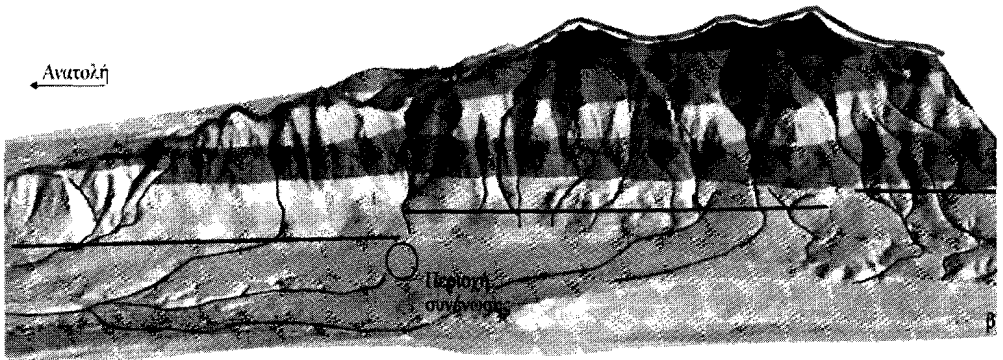
Σχήμα 5. α) Λογαριθμικό διάγραμμα του μέγιστου άλματος – μήκους των ρηγμάτων του υποθαλάσσιου πληθυσμού και του αντίστοιχου στην ξηρά. β) Απλοποιημένος χάρτης που δείχνει τον τρόπο ανάπτυξης των ρηγμάτων στη ξηρά και στη θάλασσα.

3.2 Μεταβολές στο ποτάμιο υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής

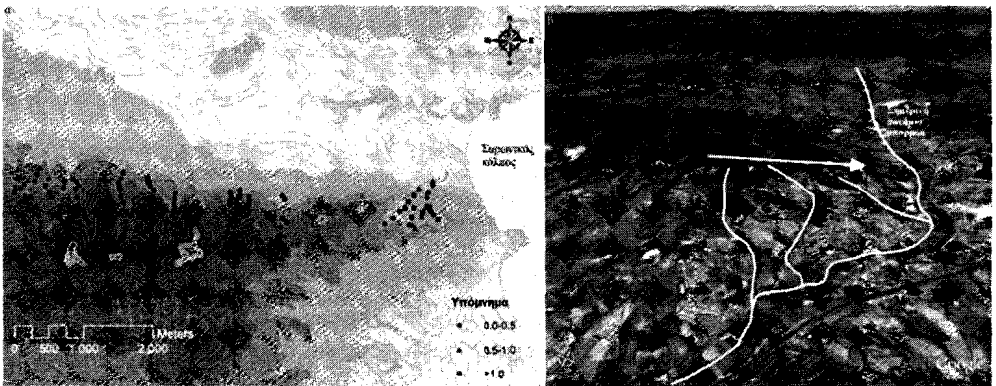
3.2.1 Ενεργός τεκτονική στο ρήγμα των Κεχρεών

Το ρήγμα των Κεχρεών βρίσκεται NA της πόλης της Κορίνθου και έχει δράσει κατά τους ιστορικούς χρόνους όπως μαρτυρά και η σημερινή βύθιση του αρχαίου λιμανιού του κατά 160 cm από το 80 μ.Χ. (Noller et al., 1997). Πρόκειται για ένα ρήγμα με μήκος 7800 m και άλμα που φτάνει τα 300 m (Σχ. 6). Ο δείκτης S_{mf} κατά μήκος των τριών κύριων τεμαχών στα οποία μπορεί να διαχωριστεί το ρήγμα, ανατολικό, κεντρικό και δυτικό, λαμβάνει τιμές 1.12, 1.22 και 1.56 αντίστοιχα. Επομένως η εντονότερη τεκτονική δράση εντοπίζεται στο ανατολικό τμήμα, όπου όπως φαίνεται και από την εικόνα του σχήματος 6 προς τα εκεί στρέφονται και τα ποτάμια συστήματα που διατρέχουν τον πρόποδα του ρήγματος μόλις εισέλθουν στην οροφή του ρήγματος, επισημαίνοντας ότι σε αυτή τη θέση πραγματοποιείται συνένωση μεταξύ των επιμέρους τεμαχών του. Αλλά και ο δείκτης V_f εφαρμοζόμενος για τα ρέματα τα οποία βρίσκονται πίσω από τον ενεργό πρόποδα και εκτείνονται ως και 1km πίσω από αυτόν φαίνεται να λαμβάνει τιμές μικρότερες της μονάδας υποδηλώνοντας και αυτός με τη σειρά του την ύπαρξη ενεργούς τεκτονικής κατά μήκος του ρήγματος (Σχ. 7α). Μάλιστα καθίσταται εμφανές ότι προσεγγίζοντας τις πηγές των ρεμάτων ο ρυθμός διάβρωσης μειώνεται καθώς δεν υπάρχει επαρκής τροφοδοσία ιζήματος ή αρκετή γωνία κλίσης πρανούς (Σχ. 7α).

Παράλληλα η ιστορία απορροής του Ξεριά, ο οποίος βρίσκεται στη δυτική απόληξη του ρήγματος, επιβεβαιώνει ότι η συνεχής ανύψωση και πλευρική εξάπλωση του ρήγματος λειτουργήσε ως φράγμα στη συνεχή και αμετάβλητη απορροή του Ξεριά, εξαναγκάζοντάς τον ουσιαστικά να εγκαταλείπει την παλαιά του κοίτη και να αναζητά θέσεις χαμηλότερου αναγλύφου δυτικότερα του άκρου του ρήγματος (Σχ. 7β). Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας. Α.Π.Θ.



Σχήμα 6. Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους του ρήγματος των Κεχρεών στο οποίο φαίνεται η αιχμαλώτιση της απορροής του υδρογραφικού δικτύου προς την ανατολή.



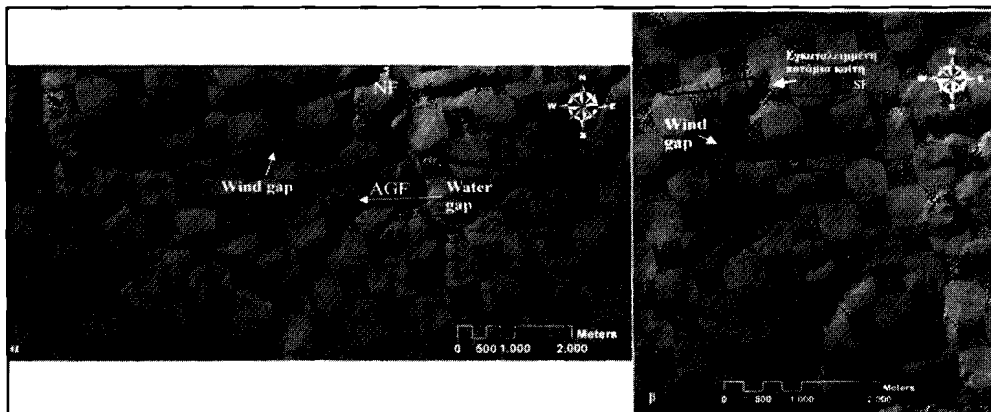
Σχήμα 7. α) Η κατανομή του δείκτη V_1 κάθετα στο μήκος του ρήγματος των Κεχρεών.

β) Η χρονική εξέλιξη της απορροής του Ξεριά εξαιτίας της πλευρικής εξάπλωσης του ρήγματος των Κεχρεών.

3.2.2 Ενεργός τεκτονική στα ρήγματα του Σοφικού

Η περιοχή του Σοφικού είναι μια περιοχή που παρουσιάζει μέτρια σεισμικότητα, αλλά η συστοιχία ενεργών ρηγμάτων που εμφανίζει, αντιπροσωπεύει σε μικροκλίμακα την συστοιχία ενεργών ρηγμάτων του Κορινθιακού. Τα ποτάμια συστήματα στο Σοφικό χαρακτηρίζονται από απότομα φαράγγια επισημαινόμενα με αυτό τον τρόπο ότι τα ποτάμια διέρχονται μέσα από ανυψωμένες βάσεις ρηγμάτων. Στην εικόνα του σχήματος 8α τα ρέματα δεν καταφέρνουν να ακολουθήσουν τον ρυθμό ανύψωσης του ρήγματος με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός wind gap και την μετατροπή της απορροής τους από εγκάρσια προς το ρήγμα σε παράλληλη προς αυτό.

Η παλαιά κοίτη του ποταμού εγκαταλείπεται και συλλαμβάνεται σε μια νέα θέση χαμηλότερου αναγλύφου κατά μήκος του ρήγματος του Ντέρια (NF). Ωστόσο το ρέμα που διασχίζει το ρήγμα του Αγίου Ιωάννη (AGF), εντοπίζει ένα νέο πέρασμα μέσα από τη λοφοσειρά διαβρώνοντας με τον ίδιο ρυθμό που ανυψώνεται ο πρόποδας του ρήγματος (Σχ. 8α) με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός water gap. Αντίστοιχα και στο ρήγμα του Σοφικού (SF) η δημιουργία ενός wind gap εξαναγκάζει σε εκτροπή προς τα ανατολικά τα ρέματα και στην εγκατάλειψη της προηγούμενης κοίτης τους (Σχ. 8β). Επειδή τα ρέματα συνήθως εκτρέπονται προς την κατεύθυνση ανάπτυξης του ρήγματος (Jackson et al., 1996; Burbank & Anderson, 2001) οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η εκτροπή των ρεμάτων που βρίσκονται στην οροφή του ρήγματος και ρέουν όλα πλέον προς την ανατολή, είναι το αποτέλεσμα της ανάπτυξης του ρήγματος προς τα ανατολικά.



Σχ. 8. α) Δημιουργία wind and water gaps κατά μήκος των ρηγμάτων Ντέρια (NF) και Αγίου Ιωάννης (AGF). β) Εκτροπή των ρεμάτων που βρίσκονται στην οροφή του ρήγματος εξαιτίας της προς τα ανατολικά εξάπλωσης του ρήγματος του Σοφικού (SF).

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διαστολή στον Κορινθιακό κόλπο επιτυγχάνεται από ένα πυκνό δίκτυο κανονικών ρηγμάτων που διαχωρίζονται σε επιμέρους τεμάχη. Οι κλασματικές κατανομές των ρηγμάτων αυτών μπορούν να αποκαλύψουν την εξέλιξη των ρηγμάτων και σε συνδυασμό με τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά τους να καταστήσουν δυνατό τον προσδιορισμό του σεισμικού κινδύνου στην επιρρεπή σε ισχυρά σεισμικά γεγονότα περιοχή του Κορινθιακού. Το αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας μπορεί να συνοψιστεί στα εξής:

1. Και οι δύο πληθυσμοί (υποθαλάσσιος και χερσαίος) εμφανίζουν κλασματικές κατανομές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους. Οι πολύ - κλασματικές αυτές κατανομές δείχνουν ότι η ανάπτυξη των ρηγμάτων μέσω συνένωσης μικρότερων ρηγμάτων επιτυγχάνεται κατά μήκος ολόκληρου του κόλπου.
2. Το διάγραμμα άλματος προς μήκος ρήγματος παρουσιάζει διασπορά στο εύρος τιμών του άλματος για ρήγματα με μήκος μικρότερο από 5km η οποία συνεχώς ελαττώνεται όσο το μήκος των ρηγμάτων αυξάνει. Αυτή η υποδιαίρεση υπό και άνω των 5km είναι δυνατό να αντιπροσωπεύει ένα ανώτερο όριο μεταξύ της μέτριας ή υψηλής σεισμικότητας που συσχετίζεται με το μήκος διάρρηξης ενός ρήγματος, ή να υποδηλώνει το στάδιο αρχικής συνένωσης και αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο τεμαχίων ρηγμάτων.
3. Σε όλες τις περιοχές μελέτης η ενεργός τεκτονική τείνει να δημιουργεί ένα ευθύ πρόποδα, ενώ το εγκάρσιο υδρογραφικό δίκτυο προσπαθεί να σχηματίσει ένα πιο κυματιστό πρόποδα μέσω της διάβρωσης. Η ενεργός ανύψωση μιας περιοχής φαίνεται να είναι υπεύθυνη για τις χαμηλές τιμές που λαμβάνει ο δείκτης V_r (ρήγμα Κεχρεών), την εκτροπή του υδρογραφικού δικτύου στις απολήξεις ενός ενεργού ρήγματος (ποτάμιο σύστημα Ξεριά), την αιχμαλώτιση της ποτάμιας απορροής στα πιο ενεργά τμήματα μιας ρηξιγενούς ζώνης (ανατολικές Κεχρεές, ρήγμα Σοφικού) και τη δημιουργία wind και water gaps (περιοχή Σοφικού).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τη ΓΓΕΤ για την οικονομική της υποστήριξη, μέσω του προγράμματος ΠΕΝΕΔ03 με κωδικό 03ΕΔ971.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Ambraseys N.N. & Jacson J., 1990. Seismicity and associated strain of central Greece between 1890 and 1988. *Geophys.J. int.*, 101, 663-708.
- Briole D., Rigo A., Lyon-Caen H., Ruegg J., Papazissi K., Mistakaki C., Balodimou A., Veis G., Hatzfeld D & Deschamps A., 2000. Active deformation of the gulf of Korinthos, Greece: results from repeated GPS surveys between 1990 and 1995. *JGR.*, 105, 25605-25625.
- Bull W.B. & McFadden L.D., 1977. Tectonic Geomorphology north and south of the Garlock fault, California. In: *Proceedings of 8th Annual Geomorphology Symposium, Geomorphology in Arid regions*, Doehring, D.O. ed, State University of New York, Binghamton, 115-138.
- Burbank D.W. & Anderson R.S., 2001. *Tectonic Geomorphology*. Blackwell Science, Massachusetts, 274 p.
- Cowie P.A. & Scholz C.H. 1992. Displacement - length scaling relationships for faults: data synthesis and discussion. *Journal of Geophysical Research*, 97, 1073-1088.

- Doutsos T. & Piper D.J.W., 1990. Listric faulting, sedimentation and morphological evolution of the quaternary eastern Corinth rift, Greece: final stages of continental rifting. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 102, 812-829.
- Doutsos T. & Kokkalas S. 2001. Stress and deformation patterns in the Aegean region. *Journal Struct. Geology*, 23, 455-472.
- Gallousi C. & Koukouvelas I.K., 2007. Quantifying geomorphic evolution of earthquake – triggered landslides and their relation to active normal faults. An example from the Gulf of Corinth, Greece. *Tectonophysics*, 440, 85-104.
- Jackson J., Norris R. & Youngson J., 1978. The structural evolution of active fault and fold systems in central Otago, New Zealand: evidence revealed by drainage patterns. *Journal Struct. Geology*, 18, 217-234.
- Keraudren B. & Sorel D., 1987. The terraces of Corinth (Greece) – a detailed record of eustatic sea level variations during the last 500000 years. *Mar. Geol.*, 77, 99-107.
- Koukouvelas I.K. & Doutsos T., 1996. The Implications of structural segmentation during earthquakes. *J. Struct. Geol.*, 18, 1381-1388.
- Mansfield C. & Cartwright J., 2001. Fault growth by linkage: observations and implications from analogue models. *J. Struct. Geol.*, 23, 745-763.
- McNeill L.C., Cotterill C.J., Henstock T.J., Bull J.M., Stefatos A., Collier R.E.L., Papatheodorou G., Ferentinos G. & Hicks S.E., 2005. Active faulting within the offshore western gulf of Corinth, Greece: implications for models of continental rift deformation. *Geology*, 33, 241-244.
- McNeill L.C., Cotterill C.J., Bull J.M., Henstock T.J., Bell R. & Stefatos A. 2007. Geometry and slip rate of the Aigion fault, a young normal fault system in the western Gulf of Corinth. *Geology*, 35, 355-358.
- Moretti I., Sakellariou D., Lykousis V. & Micarelli L. 2003. The gulf of Corinth: an active half graben?. *J. Geodyn.*, 36, 323-340.
- Noller J., Wells L., Reinhardt E. & Rothaus R. 1997. Subsidence of the harbor of Kenchreai, Saronic Gulf, Greece, during the earthquakes of AD400 and AD1928. *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, 78.
- Ori G. 1989. Geologic history of the extensional basin of the Gulf of Corinth (? Miocene – Pleistocene), Greece. *Geology*, 17, 701-707.
- Papadopoulos G., Vassilopoulou A. & Plessa A., 2000. A new catalogue of historical earthquakes in the Corinth rift, Central Greece: 480BC – AD1910. In: *Historical Earthquakes and Tsunamis in the Corinth rift, Central Greece*, Papadopoulos G. ed, National Observatory of Athens, Athens, Publication No 12, 9-119.
- Papatheodorou G., Stefatos A., Christodoulou D. & Ferentinos G., 2003. Small scale present day turbidity currents in a tectonically active submarine graben, the Gulf of Corinth (Greece): Their significance in dispersin mine tailings and their relevance to basin filling. In: *Submarine Mass Movements and their Consequences*, Locat J. & Mienert J. eds, Kluwer Academic Publishers, 459-468.
- Papazachos B.C. & Papazachou C., 1997. The earthquake of Greece. *Ziti, Thessaloniki*, 304 p.
- Παυσανίας. *Ελλάδος περιήγησις* II. Μετάφραση Π. Θεοχαρίδης, Κάκτος, 235 σ.
- Roberts G.P., 1996. Non – characteristic normal faulting surface ruptures from the Gulf of Corinth Greece. *J. Geophys. Res.*, 101, 255-267.
- Skourlis K. & Doutsos T., 2003. The The Pindos fold – and – thrust belt (Greece): inversion kinematics of a passive continental margin. *Int. J. Earth Sci.*, 92, 891-903.
- Sorel D., 2000. A Pleistocene and still – active detachment fault and the origin of the Corinth – Patras rift (Greece). *Geology*, 28, 83-86.
- Stefatos A., Papatheodorou G., Ferentinos G., Leeder M. & Collier R., 2002. Seismic reflection imaging of active offshore faults in the Gulf of Corinth: their seismotectonic significance. *Basin Res.*, 14, 487-502.
- Στράβωνας. *Γεωγραφικά Θ'.* Μετάφραση Φιλολογική Ομάδα Κάκτου, Κάκτος, 236 σ.
- Turcotte D.L., 1992. *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge University, Cambridge.