

Ασθενείς ρηξιγενείς ζώνες του Αιγαίου για ένα σταθερό φλοιό

Weak fault zones in the Aegean for a stable crust

Σπύρος ΠΑΥΛΙΔΗΣ¹

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην εργασία αυτή ανασκόπησης παρουσιάζονται νέα κριτήρια προσδιορισμού και χαρτογράφησης ενεργών ρηγμάτων, ειδικά για την Ελλάδα, όπως διαμορφώθηκαν από την διεθνή και ελληνική επιστημονική εμπειρία των είκοσι τελευταίων χρόνων. Το αποτέλεσμα της επίδρασης στις κατασκευές εξαρτάται από πολλούς γεωλογικούς παράγοντες μεταξύ των οποίων είναι και τα γεωλογικά ρήγματα, ιδιαίτερα εκείνα που δεν έχουν δραστηριοποιηθεί σε ιστορικούς σεισμούς. Η προσέγγιση της χαρτογράφησης τους πρέπει να αλλάξει ριζικά και να γίνεται κυρίως με ποσοτικές γεωμορφολογικές (μορφοτεκτονικές), παλαιοσεισμολογικές, γεωδαιτικές μεθόδους.

ABSTRACT : In this review paper are presented recent criteria of identification and mapping of active faults especially in the Greek territory, arising from the international and Greek scientific experience of the last twenty years or so. The effects on structures and infrastructures, is a direct consequence of many factors, among them the proximity to any geological faults, even ones that have not been activated during historical earthquakes. Geomorphological features, such as fault scarps, drainage pattern, favourable morphotectonic indices and quantitative morphotectonic analysis, palaeoseismological. and geodetic evidence methods are under new consideration of mapping active structures.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

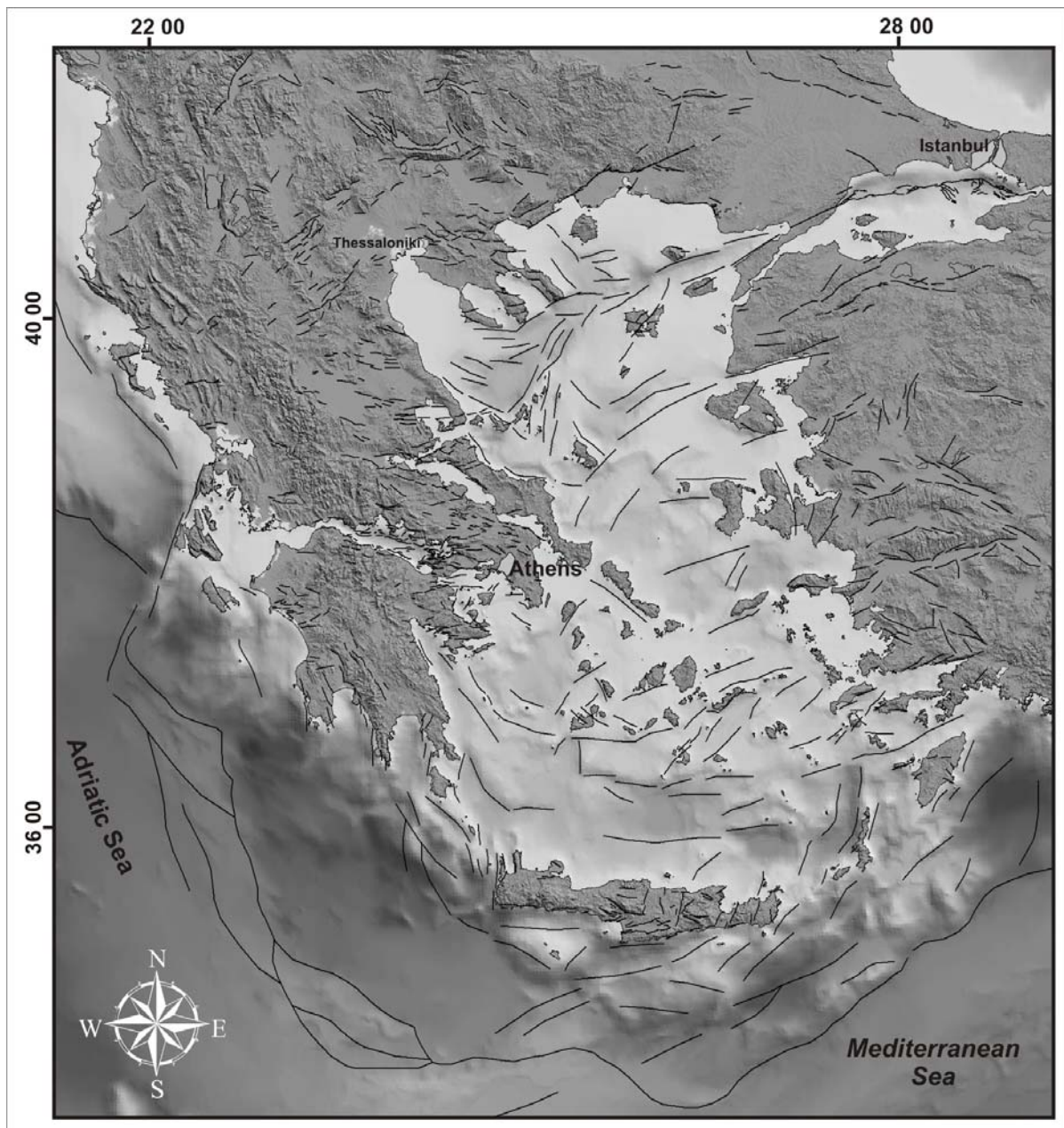
Οι επικίνδυνες γεωλογικές δομές, όπως είναι τα ρήγματα και τα χαλαρά εδάφη, δεν αποτελούν αποτρεπτικούς παράγοντες δόμησης. Απεναντίας η ασφαλής δόμηση συντελείται εκεί όπου είναι καλά γνωστές οι γεωλογικές συνθήκες θεμελίωσης και οι πιθανότητες εκδήλωσης ενός ακραίου φυσικού φαινομένου. Οι όροι «ενεργό ρήγμα» και «ενεργός τεκτονική» υποδηλώνουν πρόσφατες τεκτονικές δομές και διαδικασίες. Ο όρος όμως «πρόσφατα» είναι σχετικός και ιδιαίτερα ασαφής για ένα επιστημονικό ορισμό. Απαιτούνται πιο εξειδικευμένες γεωλογικές-εδαφοτεχνικές μελέτες με βάση τις προδιαγραφές που προκύπτουν από τη διεθνή και ελληνική εμπειρία. Ο παράγοντας έδαφος και ειδικότερα η ζώνη παραμόρφωσης του ρήγματος είναι σημαντικότερη στην αντισεισμική δόμηση, όμως τις περισσότερες φορές είναι άγνωστος. Πρωταρχική σημασία στον καθορισμό της πιθανής σεισμικής κίνησης σε μια περιοχή έχει η πρόβλεψη της επιρροής της εδαφικής απόκρισης στην ένταση και το φασματικό περιεχόμενο του σεισμικού κραδασμού.

¹ Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: pavlidis@geo.auth.gr

Τα ρήγματα και ειδικότερα τα ενεργά είναι ο πρώτος και καθοριστικός παράγοντας στην εκτίμηση της Σεισμικής Επικινδυνότητας μιας περιοχής και κυρίως μιας θέσης δόμησης, αλλά δυστυχώς μέχρι σήμερα δεν λαμβάνονται υπόψη στον αντισεισμικό κανονισμό. Η ανάγκη όμως για ασφάλεια των μεγάλων έργων, όπως είναι τα μεγάλα κτίρια, οι γέφυρες, τα φράγματα, οι σήραγγες, τα νοσοκομεία, τα σχολεία, ακόμη και οι κοινές κατοικίες και ιδιαίτερα οι σύγχρονες μεγαλουπόλεις (Jackson 2006), απαιτεί ιδιαίτερες και εξειδικευμένες γνώσεις των γεωλογικών συνθηκών θεμελίωσης, λεπτομέρεια στον καθορισμό των ενεργών δομών και περαιτέρω πολεοδομικές και κατασκευαστικές προσπάθειες για την ελαχιστοποίηση των συνεπειών από μελλοντική επαναδραστηριοποίησή τους (σεισμική ή ασεισμική). Τελευταία, η ασεισμική ολίσθηση κατά μήκος ρηγμάτων έχει επίσης σημαντικές συνέπειες σε οικοδομές (Πάτρα, Θεσσαλία, Περαία - Λαγυνά Θεσσαλονίκης, Φανός-Ανάργυροι, Ν. Φλώρινας κ.ά. Zouros et al. 2004, Zervoroulou et al. 2007). Στο παρελθόν έχουν συμβεί σοβαρά λάθη στην εκτίμηση των τεκτονικών κινήσεων του γήινου φλοιού, κυρίως από έλλειψη επιστημονικής γνώσης, με συνέπειες τις πρόσθετες οικονομικές δαπάνες μεγάλων έργων, την καθυστέρηση ή ματαίωση μεγάλων και σημαντικών από οικονομική πλευρά κατασκευών, τα νομικά προβλήματα και κυρίως τις μεγάλες απώλειες σε ανθρώπινες ζωές και κατασκευές.

Μέχρι πρόσφατα τα ρήγματα στους γεωλογικούς χάρτες παριστανόταν ως ευθείες γραμμές και θεωρούνταν ως απλοποιημένα επίπεδα, ενώ ως μόνα κριτήρια ενεργότητας θεωρούνταν η δράση τους σε ιστορικούς χρόνους με σαφείς και τεκμηριωμένες επιφανειακές συν-σεισμικές διαρρήξεις (Bonilla et al. 1984, Guidoboni et al. 1994, 2005, Barka & Kadinske-Cade 1988, Papazachos & Papazachou 1997, Ambraseys & Jackson 1998, Pavlides & Caputo 2004), με συνεπικουρία λίγων γεωμορφολογικών κριτηρίων. Λάθη κατά τη χαρτογράφηση ενός ρήγματος προέρχονταν από τις ασαφείς γεωλογικές παραμέτρους, από την κλίμακα ή από τις τεχνικές χαρτογράφησης. Σήμερα οι αντιλήψεις για τα ενεργά ρήγματα έχουν αλλάξει και η εκτίμηση αν ένα ρήγμα είναι ενεργό ή όχι απαιτεί πολύ εξειδικευμένες τεχνικές χαρτογράφησης. Η αλλαγή στον τρόπο χαρτογράφησης των ρηγμάτων και η εισαγωγή μιας μεγάλης σειράς κριτηρίων ενεργότητας (Yeats et al. 1995, Fraser 2001, McClymont 2001, Zygouri et al. 2008) βοήθησαν ώστε να είναι δυνατή η ακριβέστερη θεώρηση των ενεργών ρηγμάτων.

Παρά τη μεγάλη πρόοδο που σημειώθηκε και στη χώρα μας η αναγνώριση των ενεργών ρηγμάτων είναι συνήθως δύσκολη λόγω της τεκτονικής πολυπλοκότητας του Ελλαδικού χώρου (Pavlides 1993, 1996, Papanikolaou et al. 2006, Piccardi et al., 2007), με την ύπαρξη πολλών μικρών σε μήκος δομών και της πολυσχιδούς γεωμετρικής ανάπτυξής τους (**Σχήμα 1**).



Σχήμα 1. Χάρτης των κυριότερων βιβλιογραφικά τεκμηριωμένων ενεργών και πιθανά ενεργών ρηγμάτων (carable faults) του ευρύτερου χώρου του Αιγαίου (Ελλάδα και γύρω περιοχές) (Pavlidis et al. 2007). Ο χάρτης αυτός εμπλουτίζεται συνεχώς με μια βάση δεδομένων σε συνεργασία της ερευνητικής ομάδας μας με το INGV-Roma.

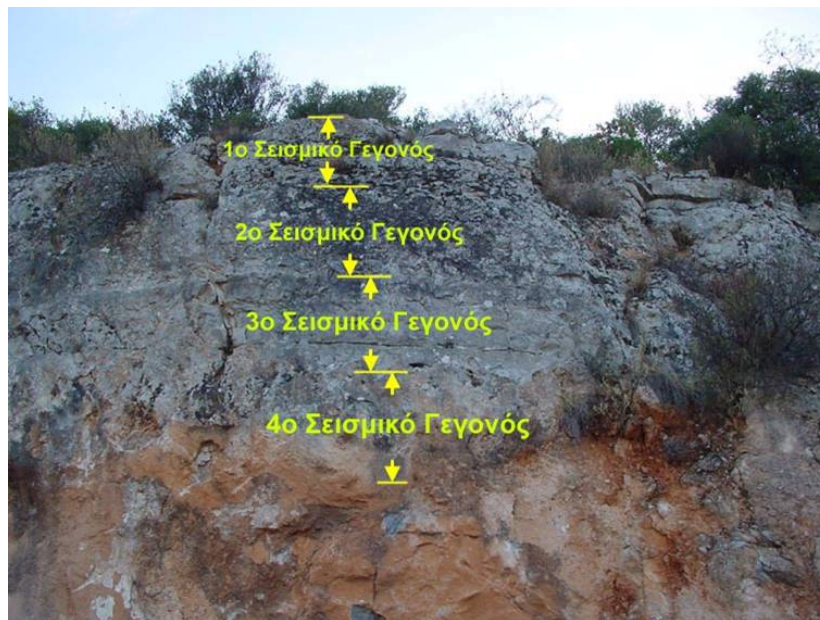
Τα ενεργά ρήγματα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη στον αντισεισμικό σχεδιασμό, κι αν ακόμη τα υπάρχοντα σεισμολογικά στοιχεία δείχνουν σαφώς χαμηλότερους δείκτες και συντελεστές - όπως στην περίπτωση της Κοζάνης - Γρεβενών (1995), της Αθήνας (1999) (Pavlidis & King 1998, Chatzipetros et al 1998, Pavlidis et al 2002), αλλά και της Θεσσαλονίκης - και το διάστημα επαναδραστηριοποίησης τους είναι μεγαλύτερο από την αναμενόμενη ζωή των κατασκευών. Η διεθνής επιστημονική κοινότητα μάλιστα, δέχεται σήμερα ότι είναι προτιμότερο και ασφαλέστερο να θεμελιώνουμε σωστά σε περιοχές που γνωρίζουμε την ύπαρξη, τη γεωμετρία και σεισμική ιστορία των ρηγμάτων, ενώ αντίθετα είναι περισσότερο επικίνδυνο να σχεδιάζουμε κατασκευές σε περιοχές με ελλιπή γεωλογική και

εδαφομηχανική γνώση ή σε θέσεις που θεωρούνται «ασφαλείς» από σεισμοτεκτονική άποψη.

Οι μεταβολές που έχουν παρατηρηθεί στα εδάφη των επικεντρικών περιοχών πολλών επιφανειακών σεισμών του Ελληνικού χώρου (συν-σεισμικές και «συμπαθητικές» επιφανειακές διαρρήξεις, ρευστοποιήσεις εδαφών, κατολισθήσεις κ.α.), αποτελούν επιπλέον στοιχεία που επηρεάζουν σημαντικά τη σεισμική επικινδυνότητα. Οι μεταβολές αυτές, κατά σειρά συχνότητας εμφάνισης, είναι: *εδαφικές ρωγμές* (πρωτογενείς ή δευτερογενείς), *καταπτώσεις βράχων*, *κατολισθήσεις* ή *καθιζήσεις εδαφών*, (Παυλίδης κ.α. “Επιφανειακές εκδηλώσεις του ισχυρού σεισμού της 8^{ης} Ιουνίου 2008 στη ΒΔ Πελοπόννησο”, βλέπε παρόντα τόμο), *ανυψώσεις* ή *καταβυθίσεις ακτών* και πολύ σημαντικές οι *ρευστοποιήσεις εδαφών*, (Paradopoulos & Lefkoroulos 1993, Parathanassiou et al. 2004, 2005) οι οποίες είναι εξαιρετικά επικίνδυνες για τις ανωδομές.

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΝ

Το σύνολο των τεχνικών ανάλυσης των ενεργών ρηγμάτων όταν εφαρμόζονται συνδυαστικά μπορούν με μεγάλη ακρίβεια να βοηθήσουν στην αναγνώριση αν ένα ρήγμα είναι ή όχι ενεργό, στον υπολογισμό του μήκους του και της μετατόπισή του ή το μοντέλο διάρρηξης. Σχετικά με το ρυθμό ολίσθησης, το χρόνο επανάληψης και τη συν-σεισμική μετατόπιση η *παλαιοσεισμολογική μέθοδος* παρέχει τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.



Σχήμα 2. Ρηξιγενής επιφάνεια του ρήγματος της Αταλάντης (περιοχή του Μαρτίνου) στην οποία είναι αποτυπωμένα τέσσερα διαφορετικά σεισμικά γεγονότα. (λωρίδες διαφορετικού βαθμού διάβρωσης), ίδιου άλματος (χαρακτηριστικός σεισμός) πριν από τον καλά μελετημένο σεισμό του 1894. (Παυλίδης κ.α. 2004).

Το άλμα (κατακόρυφη μετατόπιση) και το μήκος ενός ενεργού ρήγματος αυξάνονται με διαδοχικούς σεισμούς (**Σχήμα 2**) και η τάση αύξησης τους αποτυπώνεται επιφανειακά στο γεωμορφολογικό ανάγλυφο. Η χαρτογράφηση του μήκους βασίζεται στην επιφανειακή εκδήλωσή του, την αλλαγή των ιζηματογενών φάσεων ιζημάτων, τη διακοπή ή επανάληψη στρωματογραφικών ενοτήτων και τη χαρτογράφηση ρηξιγενών πρηνών. Το εύρος του ρήγματος καθορίζεται αφού καθορισθεί η ζώνη που έχει υποστεί ανύψωση-βύθιση ή διάρρηξη από τη δράση του ρήγματος, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις ανάλυσης κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων. Η αποτύπωσή του ρήγματος γίνεται με τη χαρτογράφηση φυσικών ή τεχνητών τομών, με στοιχεία γεωτρήσεων και γεωφυσικών διασκοπήσεων. Παρόλα αυτά η αποτύπωση ενός ρήγματος σε γεωλογικό χάρτη εμπεριέχει λάθη, λόγω της κλίμακας, της διάβρωσης, της απόθεσης ή της μη επιφανειακής εμφάνισης τμημάτων του ρήγματος.

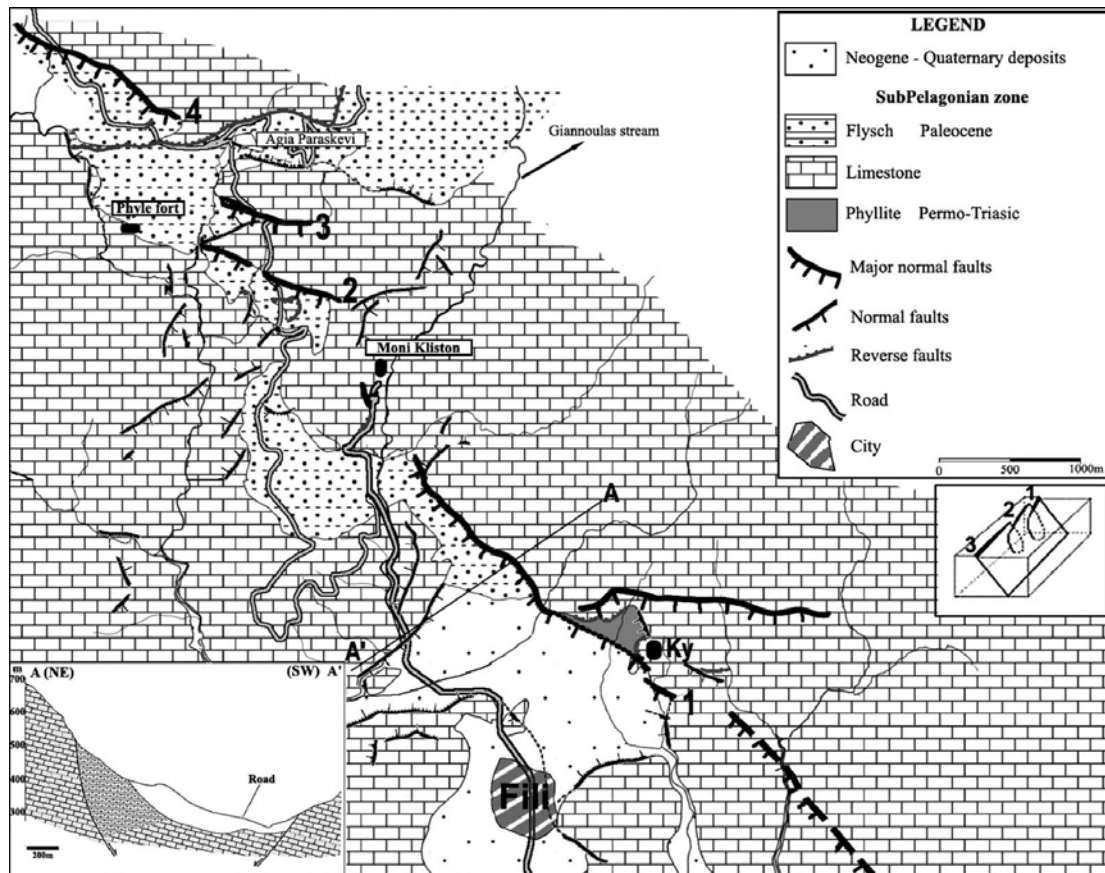
Η καλή γνώση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ρηγμάτων (επιφανειακών και βάθους) θεωρείται ότι απαντά με αξιόπιστα στα ερωτήματα που αφορούν το σεισμικό κίνδυνο (Barka et al., 1988, Marrett and Allmendinger, 1991, Yeats et al. 1996), και την εκτίμηση της εδαφικής παραμόρφωσης σε μια περιοχή (Cowie and Scholz, 1992, Walsh et al., 1991, Cladouhos and Marrett, 1996, Kim and Sanderson, 2005, Caputo et al. 2006).

Μερικές περιοχές είναι «περισσότερο ενεργές» σε σύγκριση με τις παρακείμενες τους. Τα ενεργά ρήγματα μιας περιοχής μπορεί να είναι πολλά ή λίγα και αντίστοιχα η παραμόρφωση μιας περιοχής να είναι εντοπισμένη σε ορισμένες ζώνες ή διάχυτη (π.χ. Μυγδονία - σεισμός Θεσσαλονίκης 1978). Όταν η τεκτονική είναι πολύπλοκη η μορφοτεκτονική ανάλυση μπορεί να αποσαφηνίσει αν ένα σύνολο ρηγμάτων που βρίσκονται στην ίδια γεωγραφική περιοχή και των οποίων ο προσανατολισμός είναι παρόμοιος ανήκουν στην ίδια δομή (Burbank & Anderson 2001, Keller & Pinter 1996/2000, Goldsworthy, et al. 2002, Kokkalas & Koukouvelas 2005, Tsodoulos et al., 2008)

Η εξέλιξη του ανάγλυφου μιας περιοχής ελέγχεται από τη γεωλογική δομή της, την ενεργό τεκτονική και τις κλιματικές ή βιολογικές παραμέτρους π.χ. τη φυτοκάλυψη, γι' αυτό η *μορφοτεκτονική ανάλυση* μιας περιοχής με ποσοτική έκφραση αποτελεί το κλειδί της ανάλυσης της ενεργού τεκτονικής. Η γεωμορφολογική έκφραση του ρήγματος κατά τεκμήριο καταδεικνύει μεγαλύτερο μήκος ρήγματος και μπορεί να δείχνει και διαδοχικές φάσεις της εξέλιξής του.

Οι επιφανειακοί σεισμοί μέχρι $M \sim 6.0$ δεν δίνουν κατά κανόνα επιφανειακές διαρρήξεις (Caputo 1993, Pavlides & Caputo 2004). Αντίθετα γεωλογικά και γεωμορφολογικά δεδομένα είναι δυνατόν να βοηθήσουν στον εντοπισμό ενεργών γεωλογικά ρηγμάτων, που δεν εμφανίζουν επιφανειακές συν-σεισμικές διαρρήξεις και σε συνδυασμό με σεισμολογικά δεδομένα (σεισμοτεκτονική) να εντοπίσουν μια σεισμογόνο δομή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο σεισμός της Αθήνας (7/9/99) όπου δεν εμφανίστηκαν σαφή στοιχεία (τυπικές επιφανειακές συν-σεισμικές διαρρήξεις) και δεν μπόρεσε να εντοπιστεί εξ αρχής το σεισμογενετικό ρήγμα (Pavlides et al., 2002). Η λεπτομερής επιφανειακή όμως γεωλογική χαρτογράφηση σε μεγάλη κλίμακα, σε συνδυασμό με μορφοτεκτονικές παρατηρήσεις και μετρήσεις, με ανάλυση δορυφορικών εικόνων LANDSAT μεγάλης διακριτικής ικανότητας, με ψηφιακά μοντέλα αναγλύφου (DEM), και με *συμβολομετρία* (*Dif. SAR Interferometry*)

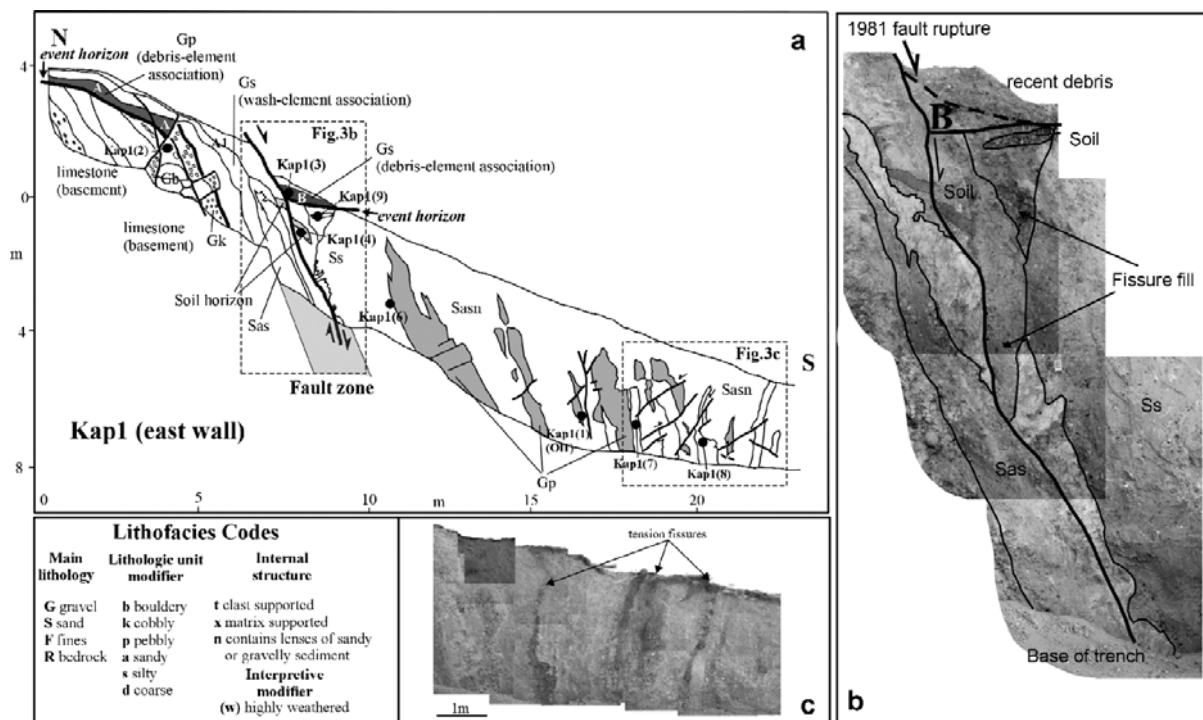
προσδιόρισε με ικανοποιητική ακρίβεια τη σεισμογόνο δομή (Ρήγμα Φυλής, Papadopoulos et al. 2002, Pavlides et al, 2002, Ganas et al 2004, **Σχήμα 3**).



Σχήμα 3. Γεωλογικός χάρτης της νότιας Πάρνηθας, όπου αποτυπώνονται σε λεπτομέρεια τα επί μέρους επιφανειακά τμήματα του σεισμογόνου (1999) ρήγματος της Φυλής συνολικού μήκους 10 km. (Ganas et al. 2004).

Το γεωλογικό ρήγμα ως πιθανή σεισμική πηγή με διαστάσεις (μήκος, βάθος) και μέσο ετήσιο ρυθμό ολίσθησης δεν υπεισέρχεται στους υπολογισμούς εκτίμησης σεισμικής επικινδυνότητας. Για καλύτερη προσέγγιση της Σεισμικής Επικινδυνότητας έχουν γίνει προσπάθειες υπολογισμού σχέσεων Μεγέθους σεισμού με το μήκος της επιφανειακής διάρρηξης, τη μετατόπιση κλπ. σε διεθνές επίπεδο (Bonilla et al 1984, Wells & Coppersmith 1997, Stroml Nikonov 1997), για το Μεσογειακό χώρο (Ambraseys & Jackson 1998) για τον ελλαδικό χώρο (Pavlides et al., 1999, Pavlides & Caputo 2004). Στα πλαίσια της Ντετερμινιστικής (Αιτιοκρατικής) Ανάλυσης (Deterministic Seismic Hazard Assessment) είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν τα γεωλογικά δεδομένα (διαστάσεις ρήγματος) για άμεση ποσοτική χρήση από μηχανικούς στον καθορισμό του «σεισμού σχεδιασμού» (Coppersmith & Youngs 2000, Kiratzi et al 1985, Kim & Sanderson 2005 κ.ά.). Δηλαδή καθορισμός μέγιστου αναμενόμενου μεγέθους σεισμού, εδαφικής ταχύτητας και σεισμικής επιτάχυνσης (M , u , g) μιας περιοχής ή θέσης.

Η αξία των γεωλογικών μεθόδων και τεχνικών, εντοπίζονται τα τελευταία 20 χρόνια στην *παλαιοσεισμολογική έρευνα*, δηλαδή στη μελέτη της πρόσφατης γεωλογικής ιστορίας των ενεργών ρηγμάτων, με γεωλογικά κριτήρια, ώστε να προκύπτουν ποσοτικά στοιχεία για σεισμικά γεγονότα που δεν είναι γνωστά, για την περίοδο επανάληψης μεγάλων σεισμών κ.α. Ένα από τα σημαντικά συμπεράσματα της παλαιοσεισμολογικής έρευνας παγκόσμια είναι και η διαπίστωση ότι τα ρήγματα δεν εμφανίζουν μια κανονική περιοδικότητα επανάληψης σεισμών, αλλά περιόδους υπερδραστηριότητας (αρκετοί ισχυροί σεισμοί σε μικρά χρονικά διαστήματα) που εναλλάσσονται με μεγάλες περιόδους αδράνειας (σεισμικής ησυχίας). Ο χρόνος αυτός αδράνειας ενός ρήγματος μπορεί να χαρακτηρίσει ένα ενεργό ρήγμα ως ασφαλές για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και για ένα ορισμένο είδος οικοδομής. Η Παλαιοσεισμολογία μπορεί να προσδιορίσει κρίσιμες παραμέτρους με μεγαλύτερη ακρίβεια όπως ο *ρυθμός ολίσθησης του ρήγματος*, ο *χρόνος επανάληψης μεγάλων γεγονότων*, το *μέγιστο μέγεθος αναμενόμενου σεισμού* κ.α. (Σχήμα 4). Η ακρίβεια της μεθόδου όσον αφορά στον προσδιορισμό του χρόνου εκδήλωσης του σεισμού είναι μάλλον περιορισμένη, γιατί εξαρτάται από τη στρωματογραφία των ιζηματογενών αποθέσεων παρά τα ρήγματα και την ακρίβεια των τεχνικών χρονολόγησης (C^{14} , AMS, θερμο- και οπτική- φωταύγεια κ. ά). Γενικά οι περιορισμοί της μεθόδου οφείλονται στη διάβρωση των πλευρικών κορημάτων των ρηγμάτων, τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις, στην απουσία ή κακή ποιότητα του χρονολογήσιμου υλικού και όταν οι σεισμικές μετατοπίσεις είναι μικρές και μη ανιχνεύσιμες (McCalpin 1996, Yeats et al 1996).



Σχήμα 4. Παλαιοσεισμολογική τομή στο ρήγμα Καπαρελίου, όπου γίνεται λεπτομερής τεκτοστρωματογραφική ανάλυση (φάσεις κολουβιακών αποθέσεων στο ρήγμα και μικρές ρηγματώσεις και ρωγμώσεις που συνδέονται με παλαιότερους του 1981 σεισμούς των τελευταίων 10.000 χρόνων (Kokkalas et al. 2007).

Η παλαιοσεισμολογία θεωρείται ως πολύ σημαντική μέθοδος ανάλυσης ενεργών ρηγμάτων. Στην Ελλάδα παρά τη σπουδαιότητα της μεθόδου οι παλαιοσεισμολογικές μελέτες είναι περιορισμένες και μόνο σε ακαδημαϊκό επίπεδο (Pavlidis 1996, Pavlidis et al., 2004, Koukouvelas et al., 2001; 2005, Caputo et al. 2004; Chatzipetros et al. 2005, Caputo et al., 2008). Ενδεικτικά αναφέρεται αντίστοιχη βιβλιογραφία στο τέλος, από την οποία προκύπτει ότι τα παλαιοσεισμολογικά δεδομένα είναι ελάχιστα για ορισμένα ενεργά ρήγματα της κεντρικής και Βόρειας Ελλάδας. Συγκεκριμένα παλαιοσεισμολογικές τομές έχουν γίνει στα ρήγματα Γερακαρούς (Μυγδονία λεκάνη), Γρεβενών, Ελίκης, Πισίων-Αλεποχωρίου, Αταλάντης, Σπάρτης, Αιγίου και Καπαρελίου (Pavlidis 1996, Chatzipetros et al 1998, Koukouvelas et al 2001, 2005, Pandosti et al 2004,a,b; Pavlidis et al., 2004, Papanastasiou et al., 2005; Chatzipetros et al. 2005).

Τα ρήγματα δεν παρουσιάζουν σε ολόκληρο το μήκος τους τα ίδια γεωμετρικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά και την ίδια σεισμική συμπεριφορά. Συνήθως διακρίνονται σε επιμέρους μικρότερα τμήματα (segments) με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και σεισμική ιστορία (Cartwright et al. 1995, Yeats et al. 1996). Πολλές φορές κατά τη διάρκεια ενός σεισμού ενεργοποιούνται ένα ή περισσότερα τμήματα του ρήγματος και σπάνια ή ποτέ ολόκληρο το ρήγμα. Ο χωρισμός των ρηγμάτων, κυρίως των μεγάλων σε μήκος, βοηθά στον εντοπισμό θέσεων μελλοντικών σεισμών, καλύτερου υπολογισμού του αναμενόμενου μεγέθους, του ρυθμού ολίσθησης και άλλων σημαντικών παραμέτρων για την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου. Τέλος και σε ισχυρούς επιφανειακούς σεισμούς, όπως ο σεισμός της 8^{ης} Ιουνίου 2008 στη ΒΔ Πελοπόννησο, δεν παρουσιάζονται επιφανειακές διαρρήξεις του σεισμικού ρήγματος (τυφλό ρήγμα), ενώ αντίθετα άλλες σημαντικές εδαφικές αστοχίες παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια του σεισμού οι οποίες είναι εξίσου επικίνδυνες για τις κατασκευές.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Από τα παραπάνω σκιαγραφείται η πολυπλοκότητα της δομής, της αναγνώρισης, της αποτύπωσης και της εκτίμησης της ενεργότητας και επικινδυνότητας ενός γεωλογικού ρήγματος. Ιδιαίτερα στον πολύπλοκο γεωτεκτονικά ελλαδικό χώρο. Η ύπαρξη ενεργού ρήγματος στη στενή και ευρύτερη περιοχή μεγάλου τεχνικού έργου έχει μεγάλη σημασία. Γι' αυτό είναι αναγκαίο να διατυπωθούν συγκεκριμένες (αυστηρά καθορισμένες) *προδιαγραφές ασφαλείας* για κάθε κατηγορία έργου ξεχωριστά, άμεσα συνδεδεμένες με τη γεωδυναμική συμπεριφορά του Ελληνικού χώρου, όπως:

- α. Είδος και κλίμακα απαιτούμενης νεοτεκτονικής χαρτογράφησης και αποτύπωσης ενεργών ρηγμάτων,
- β. Απόσταση ασφαλείας έργου από το ίχνος του ενεργού ρήγματος,
- γ. Σημασία της γεωμετρίας (επιφανειακής πολυπλοκότητας) του ρήγματος στην κατασκευή,
- δ. Αναμενόμενη δραστηριότητα (σεισμική ή ασεισμική) του ρήγματος και μέγεθος επιφανειακών μετατοπίσεων.
- ε. Συνολική επίδραση στην κατασκευή, και
- στ. Προσδιορισμός άλλων ειδών εδαφικής παραμόρφωσης (π.χ. εδαφικές αστοχίες, ερπυσμός, ρευστοποιήσιμα εδάφη).

Από γεωλογική άποψη οι κύριοι άξονες των προτάσεων μπορούν να συνοψισθούν:

1. Ως Νεοτεκτονική περίοδος να χαρακτηρίζεται γενικά η περίοδος Νεογενούς-Τεταρτογενούς, όπου κυρίως εντοπίζονται οι πρόσφατες γεωλογικές δομές, αλλά να εξετάζονται και όλες οι τεκτονικές δομές και παραμορφώσεις και πέρα του συγκεκριμένου αυτού χρονικού ορίου από το παρόν (ενεργός τεκτονική-σεισμοτεκτονική) στο απώτερο γεωλογικό παρελθόν όσο απαιτείται για να γίνει κατανοητή η σύγχρονη και ενεργός παραμόρφωση.
2. Ειδικότερη έμφαση πρέπει να δίνεται σε ρήγματα που έχουν δραστηριοποιηθεί στο ανώτατο Πλειστόκαινο (35.000 χρόνια) και ειδικότερα στο Ολόκαινο (τελευταία 10.000 χρόνια) και να υπολογίζεται ο αριθμός και το μέγεθος των σεισμικών του δραστηριοποιήσεων του.
3. Στις νεοτεκτονικές χαρτογραφήσεις και μελέτες να παίρνονται κυρίως υπόψη οι αντίστοιχες απαιτήσεις των κατασκευών, όπως εκτίμηση του *μήκους του ρήγματος*, η ζώνη παραμόρφωσης, ο *μέσος ρυθμός ολίσθησης*, ο *χρόνος παρέλευσης από το τελευταίο αξιοσημείωτο σεισμικό γεγονός* και κυρίως η *αναμενόμενη μετατόπιση* από τυχόν μελλοντική επαναδραστηριοποίησή του.
4. Να καθορίζεται ποσοτικά ο βαθμός της *επικινδυνότητας* των ενεργών ρηγμάτων (χωρισμός σεισμικών ή σεισμογενετικών ρηγμάτων από απλές διαρρήξεις, πρώτης, δεύτερης κλπ τάξης ρήγματα) και πάντα σε σύνδεση με τα σεισμολογικά στοιχεία προς την κατεύθυνση του υπολογισμού της μελλοντικής τους δράσης.
5. Να γίνεται σαφής διαχωρισμός σεισμικών και ασεισμικών διαρρήξεων όπου είναι δυνατόν.
6. Να δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στο χωρισμό των πετρωμάτων (εδαφών) σύμφωνα με τις απαιτήσεις των κατασκευών (συνθήκες θεμελίωσης έργου, όριο ζώνης, επίπεδο πιθανότητας).
7. Να καταργηθεί ο όρος Ανενεργό ρήγμα και αντ' αυτού να χρησιμοποιείται "Ρήγμα Άγνωστης ή Αβέβαιης Δραστηριότητας" για το οποίο δεν υπάρχουν ενδείξεις για πρόσφατη δράση.
8. Να γίνει προσπάθεια από γεωεπιστήμονες επεξεργασίας και κωδικοποίησης, για τη διατύπωση σαφούς επιστημονικού-τεχνικού ορισμού Ενεργών Ρηγμάτων, Προδιαγραφών, Κατασκευής Νεοτεκτονικών χαρτών, Τεχνικών προδιαγραφών, Νεοτεκτονικών μελετών κλπ.
9. Να γίνει καταγραφή των ρηγμάτων του Ελληνικού χώρου σε Σύστημα Ταξινόμησης με Η/Υ (βάση δεδομένων) αντίστοιχη με εκείνη του INGV-Roma (Basili et al. 2008).

Τέλος, για τον καθορισμό ενός ελληνικού μοντέλου νεοτεκτονικής χαρτογράφησης, θα πρέπει:

- Να καθορισθεί σαφώς η χρονική περίοδος που θα ορίζει τις ενεργές δομές και κατ' επέκταση οι πρόσφατοι ιζηματογενείς σχηματισμοί, που κυρίως θα αναπαρασταθούν με τη μεγαλύτερη δυνατή στρωματογραφική λεπτομέρεια (παλαιοντολογικά, παλαιομαγνητικά δεδομένα και στοιχεία απόλυτης χρονολόγησης (Mc Calpin 1996).

- Να τοποθετούνται όλα τα απαραίτητα γεωμορφολογικά στοιχεία (τόσο με χρωματικές διαφορές όσο και σύμβολα) με μεγάλη λεπτομέρεια.
- Να χαρτογραφούνται όσο πιο ασθενικά γίνεται και σε πολύ γενικές ενότητες: το υπόβαθρο (1 κρυσταλλικό, 2 αλπικοί σχηματισμοί, 3 ηφαιστειακοί, 4 νεογενείς λεκάνες), ώστε να μην επηρεάζουν τη γενική εικόνα του νεοτεκτονικού χάρτη, στους οποίους πρέπει να τονίζονται οι νεότεροι και χαλαρότεροι σχηματισμοί και τα γεωμορφολογικά στοιχεία.

Η κύρια συμβολή του μοντέλου αυτού χαρτογράφησης θα συνίσταται:

- στη λεπτομερή χαρτογράφηση των ρηγμάτων (με ιδιαίτερη έμφαση στη γεωμετρία και κινηματική τους, το χωρισμό τους σε τμήματα (segments), τις συζυγείς ή ημισυζυγείς δομές τους, τις διακλαδώσεις τους κ.ά.).
- στον εντοπισμό και την προβολή γεωμορφολογικών ανωμαλιών που οφείλονται σε τεκτονικά αίτια (μορφοτεκτονικές δομές) όπως αυτές που σχετίζονται με : α) πρηνή (δημιουργία, εξέλιξη της, απλά, σύνθετα, βαθμός καμπυλότητας κ.ά.), β) τρόπο απόθεσης ή επηρεασμού ιζημάτων (δομή τους, κλίση τους, "σεισμίτες" και ποσοτική εκτίμηση της πιθανότητας ρευστοποίησης, τρόπος απόθεσης πλευρικών ριπιδίων), γ) υδρογραφικό δίκτυο (αποκλίσεις-αλλαγές ροής, είδος ανάπτυξης, κτλ), δ) δευτερεύουσες δομές (αναστροφή αναγλύφου, κατολισθήσεις, κατά βάθος διάβρωση, σχήματα κοιλάδων κ.ά.).
- παλαιοσεισμολογικών στοιχείων, δηλαδή θέσεων εκσκαφών (ορύγματα) κατά μήκος ενεργών ρηγμάτων, λεπτομερής τεκτονοστρωματογραφική ανάλυση (αποτύπωση 1:10), καθορισμός στιγμιαίων τεκτονικών γεγονότων του πρόσφατου γεωλογικού παρελθόντος (παλαιοσεισμοί), και αν είναι δυνατόν εκτίμηση του πιθανού μεγέθους τους, του ρυθμού επανάληψης τους (ρυθμος ολίσθησης ρηγμάτων).
- τέλος, όλα τα παραπάνω μπορούν να συμπληρωθούν με στοιχεία ιστορικής, αρχαιολογικής (όπου υπάρχουν) και σύγχρονης σεισμικότητας, άλλα γεωφυσικά δεδομένα, στοιχεία γεωτρήσεων, ανυψώσεις, καταβυθίσεις, γεωθερμικά πεδία, απότομα πρηνή κτλ.

Βάση για τον καθορισμό συγκεκριμένων προδιαγραφών-οδηγιών νεοτεκτονικής χαρτογράφησης μπορεί να αποτελέσουν οι "προδιαγραφές και υπόμνημα νεοτεκτονικού χάρτη" (ΟΑΣΠ 1985) που απετέλεσαν τις οδηγίες σύνταξης των νεοτεκτονικών χαρτών 1:100.000 του ΟΑΣΠ, οι οποίες όμως είναι απλές και πεπαλαιωμένες. Θα πρέπει να αναμορφωθούν και να συμπληρωθούν, μετά την εμπειρία που αποκτήθηκε από την εκπόνηση των παραπάνω χαρτών από διάφορες ελληνικές ερευνητικές ομάδες και τη διεθνή εμπειρία, ώστε να αποτελέσουν τις βασικές οδηγίες-προδιαγραφές σύνταξης νεοτεκτονικών χαρτών στο μέλλον ειδικά για τη θεμελίωση μεγάλων τεχνικών έργων.

Η νεοτεκτονική χαρτογράφηση 1:100.000 του ελληνικού χώρου (ΟΑΣΠ 1985-σήμερα) αποτελεί ταυτόχρονα ένα εργαλείο για τη βασική έρευνα και τις εφαρμογές της. Θα πρέπει να συνεχιστεί και να ολοκληρωθεί το πρόγραμμα αυτό, παράλληλα με το αντίστοιχο πρόγραμμα συγκέντρωσης νεοτεκτονικών στοιχείων σε κλίμακα 1:500.000 (ΟΑΣΠ 1993-σήμερα). Το

τελευταίο εξυπηρετεί περισσότερο σκοπούς βασικής έρευνας και θα μπορούσε να μετατραπεί σε πρόγραμμα "τράπεζα δεδομένων νεοτεκτονικής" που θα συγκεντρώσει και θα κωδικοποιήσει όλα τα υπάρχοντα, δημοσιευμένα ή μη, στοιχεία για τα ενεργά ρήγματα του ελληνικού χώρου. Δεν επαρκεί όμως για τις ανάγκες του μηχανικού. Γι' αυτό η νεοτεκτονική χαρτογράφηση θα πρέπει να επεκταθεί σε μεγαλύτερες κλίμακες για περιοχές ειδικού ενδιαφέροντος του ελληνικού χώρου:

- σε ζώνες γνωστών ενεργών σεισμικών ρηγμάτων του ελλαδικού χώρου
- σε αστικές περιοχές που παρουσιάζουν μεγάλο σεισμικό κίνδυνο (Προάστια Αθήνας, Θεσσαλονίκη, Πάτρα, Ηράκλειο κ.α.)
- σε περιοχές επέκτασης νέων οικισμών ή βιομηχανικών ζωνών
- σε περιοχές όπου σχεδιάζονται ή πρόκειται να κατασκευασθούν μεγάλης σημασίας τεχνικά έργα.

Βάση για τον ορισμό των ενεργών ρηγμάτων μπορεί να αποτελέσει :

"Τα ενεργά ρήγματα καθορίζονται σύμφωνα με το ποσό της μετατόπισής τους ανά μονάδα χρόνου, την ολίσθηση τους, τον χρόνο επανάληψης μεγάλων σεισμικών γεγονότων στη διάσταση του γεωλογικού χρόνου (ανώτατο Πλειστόκαινο-Ολόκαινο), τις τεταρτογενείς κινήσεις τους, το χρόνο ηρεμίας τους και την αναμενόμενη μελλοντική τους κίνηση σε συνδυασμό με το είδος των κατασκευών". (βλέπε επίσης και Maps of Active faults in Japan, Matsuda & Kinugasa 1991, Regine Group 1991, Yeats et al 1996, Fraser 2001, McClymont 2001).

Οι αντισεισμικοί κώδικες των Δυτικών ΗΠΑ (Western States Seismic Policy Council, Fraser 2001, κ.ά.) διαχωρίζουν τα ενεργά ρήγματα σε τρεις (3) μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με το βαθμό ενεργότητάς τους και κατά συνέπεια το βαθμό επικινδυνότητάς τους:

- Ολοκαινικά ενεργά ρήγματα (με άλμα στα 10.000 χρόνια),
- Υστεροτεταρτογενή (με δραστηριότητα στα τελευταία 130.000 χρόνια), και
- Τεταρτογενή ενεργά ρήγματα (αυτά που παρουσιάζουν δραστηριότητα -επιφανειακές μετακινήσεις- κατά την Τεταρτογενή περίοδο (1.600.000 χρόνια).

Σύμφωνα με τους κανονισμούς της πολιτείας της Καλιφόρνιας (Title 14, Article 3. Policies and Criteria of the State Mining and Geology board), ενεργό θεωρείται ένα ρήγμα το οποίο παρουσιάζει επιφανειακή μετατόπιση κατά τη διάρκεια του Ολοκαινίου (περίπου τα τελευταία 11.000 χρόνια), καθιστώντας το μια πιθανή πηγή σεισμικής απειλής στις κατασκευές που είναι κτισμένες κατά μήκος του ή πλησίον του. Ίχνος του ρήματος θεωρείται η γραμμή που σχηματίστηκε από τη διατομή του ρήματος με την ελεύθερη επιφάνεια της γης (McClymont 2001, Fraser 2001, Basili et al. 2008). Σήμερα με τα δεδομένα της παλαιοσεισμολογίας μπορούμε να διακρίνουμε διάφορους βαθμούς ενεργότητας και κατά συνέπεια επικινδυνότητας των ρηγμάτων ακόμη και αυτών που έδρασαν μέσα στην ολόκαινη γεωλογική εποχή, ώστε και αυτά να καταταγούν σε κατηγορίες διαφόρου βαθμού

ενεργότητας (π.χ. ρήγμα σεισμού Γρεβενών, Καπαρελίου με μεγάλη περίοδο επανάληψης σεισμών, μεγαλύτερη των 4.000 χρόνων και άρα μικρής επικινδυνότητας).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το άρθρο αυτό ανασκόπησης έχει σκοπό να επανατοποθετήσει το θέμα, ενεργό γεωλογικό ρήγμα ως πιθανή σεισμική πηγή για την εκτίμηση της Σεισμικής Επικινδυνότητας και την ασφάλεια των τεχνικών έργων. Επιδιώκει να προβληματίσει τον τεχνικό κόσμο της χώρας και τους γεωεπιστήμονες ώστε: 1^ο) να γίνει μια σύγχρονη συστηματική, με βάση τις νέες επιστημονικές απόψεις, καταγραφή (βάση δεδομένων) των ενεργών και πιθανά ενεργών δομών της χώρας, προσβάσιμη σε όλους, 2^ο) να επαναπροσδιοριστούν τα κριτήρια αναγνώρισης και χαρτογράφησης τους, 3^ο) να ταξινομηθούν τα ενεργά ρήγματα ανάλογα με το βαθμό ενεργότητας (ρυθμός ολίσθησης, περίοδος επανάληψης σεισμών σε σχέση με το χρόνο παρέλευσης από το τελευταίο σεισμικό γεγονός) και τη σπουδαιότητα της κατασκευής και 4^ο) τα γεωλογικά ρήγματα να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη στους αντισεισμικούς κανονισμούς και να καθοριστούν σαφείς προδιαγραφές εκπόνησης αντίστοιχων γεωλογικών-εδαφοτεχνικών μελετών.

Η χαρτογράφηση των ενεργών δομών, η σεισμική προϊστορία τους, ο ρυθμός ολίσθησης τους, η περίοδος επανάληψης στιγμιαίων τεκτονικών γεγονότων, η τμηματοποίησή (segmentation) τους σε τμήματα διαφορετικής σεισμικής συμπεριφοράς, η γεωμετρική τους ανάπτυξη και ο τρόπος σύνδεσης μεταξύ τους είναι μερικά από τα κριτήρια που πρέπει να επαναπροσδιορίζουν την έννοια της ενεργότητας και επικινδυνότητας των ρηγμάτων.

Σύγχρονες μέθοδοι τεκτονικής γεωλογίας, ποσοτικής μορφοτεκτονικής ανάλυσης, 3D ανάλυσης αναγλύφου, επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων (*συμβολομετρία ραντάρ* - SAR και Dif. interferometry), γεωφυσικής διασκόπησης, κυρίως παλαιοσεισμολογίας και αρχαιοσεισμολογίας, μικρο- και μακρο- γεωδαισίας είναι απαραίτητες πλέον για να προσδιορίζουν το βαθμό ενεργότητας και κατά συνέπεια την επικινδυνότητά των ρηγμάτων ανάλογα με τη σημασία (οικονομική ή κοινωνική) του τεχνικού έργου. Με τον τρόπο αυτό ρήγματα, που με τα κλασσικά κριτήρια και τα ντετερμινιστικά ή πιθανολογικά μοντέλα χαρακτηρίζονται ιδιαίτερα επικίνδυνα, υπερεκτιμούνται και απαιτούν ιδιαίτερα ακραίες τιμές ασφαλείας δόμησης, μπορεί να κατατάσσονται σε χαμηλότερες κλίμακες επικινδυνότητας, ενώ αντίθετα τεκτονικές δομές που είτε δεν συνδέονται με ιστορικούς σεισμούς, είτε παρουσιάζουν ασαφή γεωλογικά χαρακτηριστικά ενεργότητας, είτε αγνοούνται σήμερα ή υποεκτιμούνται, μπορεί όμως να εκτιμηθούν ιδιαίτερα επικίνδυνες.

Τίθεται ένας προβληματισμός, γιατί ο χρόνος είναι ώριμος ώστε να επαναδιατυπωθούν κριτήρια ενεργότητας των ρηγμάτων με γεωλογική, τεχνική και νομική σημασία.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η γενική αυτή εισήγηση στηρίζεται σε εμπειρία ελληνική και διεθνή των 30 τελευταίων χρόνων και στη συστηματική συλλογική εργασία της συγκέντρωσης και αξιολόγησης των

ενεργών δομών του ευρύτερου χώρου του Αιγαίου από την ομάδα των συνεργατών μου Riccardo Caputo, Αλέξανδρο Χατζηπέτρο, Σωτήρη Βαλκανιώτη, Σωτήρη Σμπόρα, Γιώργο Παπαθανασίου, Άννα Ζερβοπούλου και άλλους τους οποίους ευχαριστώ θερμά. Επίσης η διαρκής συνεργασία με πολλούς συναδέλφους, όπως Δ. Μουντράκη, Γ. Παπαδόπουλο, Ι. Κουκουβέλα, Σ. Κοκκάλα, Αθ. Γκανά, Μ. Τρανό, Χ. Φασουλά τους αλλοδαπούς συναδέλφους της INQUA-Neotectonics Commission και Earthquake Geology net και άλλους υπήρξε πολύτιμη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

(εκτός από τις αναφορές του κειμένου παρατίθενται επιπλέον ενδεικτικά εργασίες νεοτεκτονικής και παλαιοσεισμολογίας του ελληνικού χώρου)

- Ambraseys N.N. and Jackson J.A. (1998): Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region: *Geophys. J. Int.*, 133, 390-406.
- Barka A.A. and Kadinsky-Cade K. (1988): Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics*, 7, 663-684.
- Basili R, Valensise G, Vannoli P, Burrato P., Fracassi U., Mariano S., Tiberti Mara Monica (2008) The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia Seismology and Tectonophysics Department. *Tectonophysics*, v453, 7-19.
- Bonilla M.G., Mark R.K. and Lienkaemper J.J. (1984): Statistical relations among earthquake magnitude surface rupture length, and surface fault displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74, 2379-2411.
- Burbank D.W., and Anderson R.S., (2001), *Tectonic Geomorphology*. Blackwell Science.
- Caputo R. (1993): Morphogenic earthquakes: a proposal. *Bull. INQUA-NC*, 16, p. 24.
- Caputo R. (1996): The active Nea Anchialos Fault System (Central Greece): comparison of geological, morphotectonic, archaeological and seismological data. *Ann. Geofisica*, 39, 3, 557-574.
- Caputo R., Bravard J.-P. and Helly B. (1994): The Pliocene-Quaternary tecto-sedimentary evolution of the Larissa Plain (Eastern Thessaly, Greece). *Geodin. Acta*, 7, 57-85.
- Caputo R., Helly B., Pavlides S., Papadopoulos G., (2004), Palaeoseismological investigation of the Tyrnavos Fault (Thessaly, Central Greece). *Tectonophysics*, 394, pp. 1-20.
- Caputo R., Monaco C. and Tortorici L. (2006) Multiseismic cycle deformation rates from Holocene normal fault scarps on Crete (Greece). *Terra Nova*, 18, 181-190.
- Caputo R., Mucciarelli M. and Pavlides S. (2008) Magnitude distribution of linear orophogenic 3 earthquakes in the Mediterranean Region: insights from palaeoseismological and historical data. *Geophysical Journal International* (in press)
- Caputo, R., and Pavlides, S., (2008). "Earthquake Geology: Methods and Applications" *Tectonophysics*, Special Issue, V453.
- Cartwright J.A., Trudgill B.D., and Mansfield C.S., (1995), Fault growth by segment linkage: an explanation for scatter in maximum displacement and trace length data from the Canyonlands Grabens of SE Utah. *J. Struct. Geol.*, 17, pp. 1319-1326.
- Chatzipetros A., Kokkalas S., Pavlides S., and Koukouvelas I., (2005), Palaeoseismic data and their implication for active deformation in Greece. *J. Geodyn.*, 40, pp. 170-188.
- Chatzipetros A., Pavlides S. and Mountrakis D. (1998): Understanding the 13 May 1995 western Macedonia earthquake: a paleoseismological approach. *J. Geodyn.*, 26, 327-339.
- Cladouhos T.T., and Marrett R., (1996), Are fault growth and linkagemodels consistent with power-law distributions of fault lengths? *J. Struc. Geol.*, 18, pp. 281-293.

- Coppersmith K. and Youngs R.R. (2000): Data needs for probabilistic fault displacement hazard analysis. *J. Geodyn.*, 29, 329-343.
- Cowie P.A., and Scholz C.H., (1992), Displacement–length scaling relationships for faults: data synthesis and discussion. *J. Struct. Geol.*, 14, pp. 1149–1156.
- Doutsos T., and Koukouvelas I.K., (1998), Fractal analysis of normal faults in northwestern Aegean area, Greece. *J. Geodyn.*, 26, pp. 197–216.
- Fraser W. A. (2001). California division of safety of dams fault activity guidelines Chief, Geology Branch Division of Safety of Dams California Department of Water Resources
- Ganas A., Pavlides S.B., Sboras S., Valkaniotis S., Papaioannou S., Alexandris G.A., Plessa A., Papadopoulos G.A. (2004). Active fault geometry and kinematics in Parnitha Mountain, Attica, Greece. *Journal of Structural Geology* 26 2103–2118
- Goldsworthy, M., Jackson, J., Haines, J., 2002. The continuity of active fault systems in Greece. *Geophys. J. Int.* 148, 596–618.
- Guidoboni E. and Comastri A. (2005): *Catalogue of Earthquakes and Tsunamis in the Mediterranean Area from the 11th to the 15th Century*, Ist. Naz. di Geofis. e Vulcanol., Storia Geofis. Ambiente, Bologna, Italy.
- Guidoboni E., Comastri A. and Traina G. (1994): *Catalogue of ancient earthquakes in the Mediterranean area up to 10th century.*, ING-SGA, Bologna, 504 pp.
- Jackson R. (2006). *Fatal attraction: living with earthquakes, the growth of villages into megacities, and earthquake vulnerability in the modern world*, *J. Phil. Trans.* 364, 1911–1925.
- Keller E.A., and Pinter, N., (1996/2000), *Active Tectonics*. Englewood cliffs, New Jersey, Prentice Hall Inc., pp. 121-147.
- Kim Y.-S., and Sanderson D.J., (2005), *The relationship between displacement and length of faults: a review*. *Earth Sci. Rev.*, 68, pp. 317–334.
- Kiratzis A., Karakaisis G.F., Papadimitriou E.E. and Papazachos B.C. (1985): *Seismic source parameter relations for earthquakes in Greece*. *Pure Appl. Geophys.*, 123, 27-41.
- Kokkalas S., and Koukouvelas I.K., (2005), Fault-scarp degradation modelling in central Greece: the Kaparelli and Eliki faults (Gulf of Corinth) as a case study. *J. Geodyn.*, 40, pp. 200–215.
- Koukouvelas I., Stamatopoulos L., Katsonopoulou D., and Pavlides S., (2001), A paleoseismological and geoarchaeological investigation of Eliki fault, Gulf of Corinth, Greece. *J. Struct. Geol.*, 23, pp. 531–543.
- Koukouvelas I.K., Katsonopoulou D., Soter S., and Xypolias P., (2005), Slip rates on the Helike Fault, Gulf of Corinth, Greece: new evidence from geoarchaeology. *Terra Nova*, 17, pp. 158–164.
- Kürçer A., Chatzipetros A., Tutkun S. Z., Pavlides S. Ateş , Ö. And Valkaniotis S. (2008). The Yenice – Gönen active fault (NW Turkey): active tectonics and paleoseismology. *Tectonophysics*.
- Maps of Active faults in Japan (1992) by the Research Group for Active Faults of Japan Univ. of Tokyo Press
- Matsuda, T. & Kinugasa, Y. (1991). Active faults in Japan. *Episodes*, V14, No3, 199-204
- McClymont B. (2001) *Building on the Edge. The Use and Development of Land On or Close to Fault Lines* parliamentary commissioner for the environment. Institute of Geological & Nuclear Sciences. ISBN: 0-908804-96-2
- McCalpin, P. J. (1996). *Paleoseismology*. Academic Press.
- Michetti A.M. and Hancock P.L. (Eds) (1997): Paleoseismology: understanding past earthquakes using 415 Quaternary geology. *J. Geodyn.*, 24 (1-4), 3-10
- Mörner N.A., Adams J. (Eds) (1989): Paleoseismicity and Neotectonics. *Tectonophysics*, 163 (3-4), 181-337.
- Mörner N.-A., Stewart I.S., Trifonov V.G., Caputo R., Nikonov A.A., Kozhurin A.I. and Kopp M.L. (Eds) (2004): Active Faults of the Eastern Hemisphere. *Tectonophysics.*, 380, 2-4, 123-294.

- Mountrakis D., Pavlides S., Zouros N., Astaras Th. and Chatzipetros A. (1998): Seismic fault geometry and kinematics of the 13 May 1995 Western Macedonia (Greece) earthquake. *J. Geodyn.*, 26, 2-4, 175-196.
- Papadopoulos G.A. and Pavlides S. (1992): The large 1956 earthquake in the south Aegean: macroseismic field configuration, faulting, and neotectonics of Amorgos Island, *Earth & Planetary Science Letters*, 3, 383-396.
- Papadopoulos G.A., Ganas A. and Pavlides S. (2002): The problem of seismic potential assessment: case study of the unexpected earthquake of 7 September 1999 in Athens, Greece. *Earth Planets Space*, 54, 9-18.
- Papadopoulos, A.G., Lefkopoulos, G., (1993). Magnitude – distance relation for liquefaction in soil from earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.* 83, (3), pp. 925-
- Pantosti D., De Martini PM, Papanastassiou D., Lemeille F., Palyvos N., Stavrakakis G. (2004a): Paleoseismological trenching across the Atalanti Fault (Central Greece): evidence for ancestors of the 1894 earthquake during the Middle Ages and Roman Times. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, 2, 531-549.
- Pantosti D., De Martini P.M., Koukouvelas I., Stamatopoulos L., Palyvos N., Pucci S., Lemeille F. and Pavlides S. (2004b): Palaeoseismological investigations of the Aigion Fault (Gulf of Corinth, Greece). *C.R. Geoscience*, 336, 335-342.
- Papanastassiou D., Gaki-Papanastassiou K. and Maroukian H. (2005): Recognition of past earthquakes along the Sparta fault (Peloponnesus, southern Greece) during the Holocene, by combining results of different dating techniques. *J. Geodyn.*, 40, 2-3, 189-199.
- Papanikolaou, D., Alexandri, M., Nomikou, P. (2006). Active Faulting in the North Aegean basin. *Geol. Soc. of America, Spec. Paper 409* (Dilek & Pavlides Eds), 189-209.
- Papathanassiou, G., Pavlides, Sp., Chistarar, B., Pitilakis, K., (2004). Liquefaction phenomena triggered by the earthquake of 14 August 2003, Lefkada (Ionian Islands). *Proc. 10th Pan. Cong. EGE, Thessaloniki, 15-17 April* (in Greek)
- Papathanassiou G., Pavlides S., Christaras B. & Pitilakis K. (2005). Liquefaction case histories and empirical relations of earthquake magnitude versus distance from the broader Aegean Region. *Journal of Geodynamics* V40, 2-3, 257-278.
- Papazachos B.C., and Papazachou C., (1997), *The earthquakes of Greece*. Ziti, Thessaloniki.
- Papazachos, B.C., Comninakis, P.E., Karakaisis, G.F., Karakostas, B.G., Papaioannou, Ch.A., Papazachos, C.B., Scordilis, E.M., (2000). A catalogue of earthquakes in Greece and surrounding area for the period 550BC-1999, *Publ. Geoph. Lab., Univ. of Thessaloniki*, 1, 333 pp.
- Pavlides S. (1993): Active faulting in multi-fractured seismogenic areas; examples from Greece. *Z. Geomorph. N.F.*, 94, 57-72.
- Pavlides S. (1996): Active Faults in Greece. *J. Earthq. Prediction and Research*, 5, 422-430.
- Pavlides, s. (1996). First palaeoseismological results from Greece. *Annali Di Geofisica*, Vol. XXXIX, N. 3.
- Pavlides S. and King G.C.P., Eds. (1998). Results of the May 13, 1995 Kozani-Grevena earthquake – INQUA Neotectonic Commission parallel session on earthquake geology, *Journal of Geodynamics*, 26.
- Pavlides S.B., Zhang P. and Pantosti D. (Eds.) (1999): Earthquakes, active faulting, and paleoseismological studies for the reconstruction of the seismic history of faults. *Tectonophys.*, 308, 1-2, 1-298.
- Pavlides S., and Caputo R., (2004), Magnitude versus faults' surface parameters: Quantitative relationships from the Aegean Region. *Tectonophysics* 380, pp. 159–188.
- Παυλιδής Σ., Βαλκανιώτης Σ., Γκανάς Α., Κεραμυδάς Δ. & Σμπόρας Σ. (2004). Το Ενεργό Ρήγμα της Ατάλαντης – Επανεκτίμηση με νέα Γεωλογικά Δεδομένα. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας Τομ. Χxxvi, 2004 Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσ/νίκη.
- Pavlides S., Chatzipetros A., Zervopoulou A., Kürçer A. and Triantafyllos D. (2006). Post-Roman seismic activity in Mikri Doxipara – Zoni archaeological excavation (NE Greece),

- European Geosciences Union General Assembly*, Vienna, Austria, 2-7 April 2006, *Geophysical Research Abstracts*, 8, 06483.
- Pavlidis S., Koçiu S., Mukelli P., Hyseni A. and Zouros N. (2001): Neotectonics of Southwestern Albania and archaeological evidence for seismic activity in Butrint. *Bull. Geol. Soc. Greece*, XXXIV, 1, 85-96 [in Greek with English abstract].
- Pavlidis S., Koukouvelas I., Kokkalas S., Stamatopoulos L., Keramydas D., and Tsodoulos I. (2004), Late Holocene evolution of the East Eliki fault, Gulf of Corinth (Central Greece). *Quatern. Int.*, 115-116, pp. 139-154.
- Pavlidis S., Papadopoulos G.A. and Ganas A. (2002): The fault that caused the Athens September 1999 Ms=5.9 earthquake: field observations. *Natural Hazards*, (in press).
- Pavlidis S., Valkaniotis S. & Chatzipetros A. (2005). Seismically capable faults in Greece and their use in seismic hazard assessment. 4th Intern conference on Earthquake Geotechnical Engineering, June 25-28 2005, Thessaloniki, paper no 1609
- Pavlidis, S., A. Chatzipetros, Z. S. Tutkun, V. Özaksoy & B. Dogan. (2006). Evidence for late Holocene activity along the seismogenic fault of the 1999 Izmit earthquake NW Turkey. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. (Robertson & Mountrakis Eds)*, 260, 635-647.
- Pavlidis, S., Caputo, R. Koukouvelas, I., Kokkalas, S. & Chatzipetros, A. (2006). Paleoseismological investigations of Aegean type active Faults in mainland Greece and their implications. *Geol. Soc. America, Spec. Paper (Dilek & Pavlidis Eds)*, 409, 175-188.
- Pezzopane S.K. and Dawson T.E. (1996): Fault displacement hazard: a summary of issues and information. In: *Seismotectonic framework and characterization of faulting at Yucca Mountain, Nevada. U.S. Geological Survey Administrative Report U.S. Department of Energy*, 160 pp., Chapter 9.
- Piccardi L, Toth L., Vittori E., Aliaj S., Cello G., Cunningham W. D., Drakatos G., Gosar A., Herak D., Herak M., Sebela S., Sulstarova E., Windhoffer G., Glavatovic B., Kiratzi A., Ganas A., Omerbashich M., Pavlidis S., Petro L., Sijaric G., Tomljenovic B., Tondi E. (2007). A first attempt at compiling a map of active faults of the Adria region *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 9, 09228, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-09228 © European Geosciences Union 2007
- REGINE GROUP (1991). Proposal for classification of fault activity in an intraplate collision setting: Definitions and examples. *Tectonophysics* 194, 279-293
- Şaroğlu, F., Emre, Ö., Kuşçu, I., (1992). Active Fault Map of Turkey (scale 1:1,000,000). General Direct. Mineral Res. Explor. (MTA), Ankara, Turkey.
- Schwartz P.D. and Coppersmith K.J. (1984): Fault behaviour and characteristic earthquakes: examples from the Wasatch and San Andreas Fault. *J. Geophys. Res.*, 89, 5681-5698.
- Strom A.L. and Nikonov A.A. (1997): Relations between the seismogenic fault parameters and earthquake magnitude. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 33, 1011-1022.
- Stewart I.S. and Hancock P.L. (1991): Scales of structural heterogeneity within neotectonic normal fault zones in the Aegean region. *J. Struct. Geol.*, 13, 191-204.
- Tsodoulos I. M., Koukouvelas I. K., Pavlidis S. (2008). Tectonic Geomorphology of the easternmost extension of the Gulf of Corinth (Beotia, Central Greece). *Tectonophysics* v453,211-232.
- Walsh J., and Watterson J., (1988), Analysis of the relationship between displacements and dimensions of faults. *J. Struct. Geol.*, 10, pp. 239–247.
- Walsh J., Watterson J., and Yielding G., (1991), The importance of small-scale faulting in regional extension. *Nature*, 351, pp. 391–393.
- Wells D.L. and Coppersmith J.K. (1994): New empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974-1002.
- Yeats R., Sieh, K., Allen, (1996). *The Geology of Earthquakes*. Oxford University Press
- Yeats R. and V.C. Thakur (2008). Active faulting south of the Himalayan Front: Establishing a new plate boundary. *Tectonophysics* ,V453, 63-73.
- Zervopoulou A., Chatzipetros A., Tsiokos L., Syrides G., Pavlidis S., (2007). Non-seismic surface faulting: the Peraia fault case study (Thessaloniki, N Greece). 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki.

- Ζούρος Ν., Χατζηπέτρος Α. & Παυλίδης Σ. (2003). Συμβολή στη μελέτη των επιφανειακών εδαφικών ρωγμών της λεκάνης της Λάρισας (ανατολική Θεσσαλία), *Πρακτικά 3^{ου} Επιστ. Συν. Ανάπτυξης Θεσσαλίας, Τομ Α΄*, 131-155.
- Zygouri V., Verroios S., Kokkalas S., Xypolias P., and Koukouvelas I.K., (2008), Scaling properties within the Gulf of Corinth, Greece; comparison between offshore and onshore active faults. *Tectonophysics*, v453, 193-210.