



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΧΡΗΣΤΟΣ
ΜΙΧΑΗΛ ΓΙΑΣΟΥΜΗΣ

Εκτίμηση του πλάτους της ζώνης επιφανειακής συνσεισμικής παραμόρφωσης ενεργών ρηγμάτων με βάση παγκόσμια δεδομένα



Επιβλέπουσα : ΘΕΟΔΩΡΑ ΡΟΝΤΟΓΙΑΝΝΗ, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΧΡΗΣΤΟΣ
ΜΙΧΑΗΛ ΓΙΑΣΟΥΜΗΣ

**Εκτίμηση του πλάτους της ζώνης επιφανειακής συνσεισμικής
παραμόρφωσης ενεργών ρηγμάτων με βάση παγκόσμια δεδομένα**

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

ΡΟΝΤΟΓΙΑΝΝΗ ΘΕΟΔΩΡΑ (επιβλέπουσα)

ΛΟΥΠΑΣΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, Επ. καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΚΑΛΗΩΡΑΣ ΑΝΔΡΕΑΣ, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εικόνα εξωφύλλου: Επιφανειακές συνσεισμικές διαρρήξεις στην Αλάσκα, με την ενεργοποίηση του ρήγματος Denali (σεισμός με μέγεθος $M=7,9$, 2002).

Copyright © Παπαγεωργίου Χρήστος – Μιχαήλ Γιασουμής, 2014

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν κείμενο αποτελεί τη διπλωματική εργασία των τελειόφοιτων φοιτητών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών (Μ.Μ.Μ.) Παπαγεωργίου Χρήστου και Μιχαήλ Γιασουμή, με θέμα «Εκτίμηση του πλάτους της ζώνης επιφανειακής συνσεισμικής παραμόρφωσης ενεργών ρηγμάτων με βάση παγκόσμια δεδομένα» το οποίο κατατέθηκε στην ακόλουθη Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή:

Ροντογιάννη Θεοδώρα, Καθηγήτρια Σχολής Μ.Μ.Μ. (Επιβλέπουσα)

Λουπασάκης Κωνσταντίνος,, Επίκ. Καθηγητής Σχολής Μ.Μ.Μ.

Καληώρας Ανδρέας, Λέκτορας Σχολής Μ.Μ.Μ.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εκτίμηση του πλάτους της ζώνης επιφανειακής συνσεισμικής παραμόρφωσης ενεργών ρηγμάτων με βάση παγκόσμια δεδομένα, σε σχέση με το είδος και το μήκος του κάθε ρήγματος που ενεργοποιήθηκε. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν οι επιφανειακές σεισμικές διαρρήξεις που έχουν εκδηλωθεί στον ελληνικό χώρο αλλά και σε διάφορες περιοχές της γης, και αφορούν κανονικά, ανάστροφα και οριζόντιας ολίσθησης ρήγματα. Το θέμα που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική έχει εκτός από θεωρητικό και μεγάλο, κυρίως, πρακτικό ενδιαφέρον, αφού ένας προβληματισμός αιχμής για τους μηχανικούς που σχεδιάζουν σε περιοχές ενεργών ρηγμάτων είναι το πλάτος της ζώνης παραμόρφωσης κατά μήκος του ρήγματος που εμφανίζει επιφανειακή μετατόπιση. Σκοπός μας είναι τα συμπεράσματα της διπλωματικής μας εργασίας, να αποτελέσουν το πρώτο βήμα για την εκτίμηση αντίστοιχων μεγεθών στην περίπτωση μελλοντικών σεισμών και κατ' επέκταση στη χρήση τους στην αντισεισμική προστασία και στο σχεδιασμό μεγάλων τεχνικών και αναπτυξιακών έργων.

Η δομή της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω:

Στο 1^ο Κεφάλαιο αναλύονται τα γενικά χαρακτηριστικά και οι βασικοί τύποι των ρηγμάτων. Ακολουθούν ορισμοί και κριτήρια ως προς το διαχωρισμό των ρηγμάτων με βάση την ενεργότητά τους.

Στο 2^ο Κεφάλαιο εισάγεται η έννοια της σεισμικής επικινδυνότητας και δίνονται εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση αυτής. Παράλληλα αναλύονται τα προβλήματα που μπορούν να προκύψουν από την άμεση γειτνίαση τεχνικών έργων με ενεργά ρηγμάτα.

Στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εφελκυστικές και συμπιεστικές νεοτεκτονικές δομές καθώς και τα είδη των σεισμικών μετατοπίσεων σε σχέση με το είδος των ρηγμάτων.

Στο 4^ο Κεφάλαιο περιγράφονται τα προβλήματα λόγω της παρουσίας ρηγμάτων σε μια περιοχή, που σχετίζονται με τη διαφοροποίηση στη γεωλογική δομή, τις γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές συνθήκες και τη σεισμική δραστηριότητα.

Στο 5^ο Κεφάλαιο δίνονται παραδείγματα από σεισμούς στην Ελλάδα αλλά και στον παγκόσμιο χώρο, ταξινομημένοι ανάλογα με το τύπο των ρηγμάτων.

Τέλος, στο 6^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εκδήλωση επιφανειακών διαρρήξεων και μετατοπίσεων κατά μήκος των ρηγμάτων, κατά τη διάρκεια ισχυρού σεισμού, έχει σαν αποτέλεσμα την ενίσχυση των καταστροφών λόγω επιβάρυνσης που προκαλούν επιπλέον των σεισμικών δονήσεων και οι εδαφικές παραμορφώσεις. Το μέγεθος των σεισμικών μετατοπίσεων μπορεί να εκτιμηθεί με βάση υπάρχουσες εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν το μέγεθος του σεισμού με το μήκος του ρήγματος και την σεισμική μετατόπιση. Ένα θέμα μεγάλου ενδιαφέροντος για την αντισεισμική προστασία και τον αστικό σχεδιασμό, αφορά το πλάτος της ζώνης μέσα στο οποίο θα εκδηλωθούν οι επιφανειακές διαρρήξεις κατά μήκος του ρήγματος που ανέδρασε. Στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό αναφέρεται η απαγόρευση δόμησης πάνω σε ενεργά ρήγματα, χωρίς όμως να καθορίζεται το πλάτος της ζώνης απαγόρευσης. Σε κανονισμούς άλλων χωρών διευκρινίζεται ότι αυτό, σε περίπτωση απλών κατασκευών θα είναι 25m εκατέρωθεν του ενεργού ρήγματος.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνήσει την επίδραση του μήκους και του είδους ενός ρήγματος στο πλάτος της ζώνης μέσα στο οποίο εκδηλώνονται οι εδαφικές σεισμικές διαρρήξεις. Για την εκτίμηση του μελετήθηκαν ορισμένοι μεγάλοι σεισμοί σε διάφορες χώρες της γης, με βάση τους οποίους εξάγονται τα πρώτα συμπεράσματα. Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια αρχική προσπάθεια καταγραφής και συστηματικοποίησης τέτοιου είδους πληροφοριών στην Ελλάδα, και θεωρούμε ότι θα πρέπει να επεκταθεί με την συστηματική καταγραφή όσο το δυνατόν περισσότερων σεισμών για τους οποίους υπάρχουν διαθέσιμα τα κατάλληλα στοιχεία αξιολόγησης.

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας έγινε συλλογή, επεξεργασία και αξιολόγηση των πληροφοριών που αφορούσαν την εκδήλωση επιφανειακών διαρρήξεων, τεκτονικής προέλευσης, κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμών. Σημειώνεται ότι επειδή λεπτομερή δεδομένα μεγεθών στο θέμα αυτό είναι περιορισμένα, ελήφθησαν υπόψη και χάρτες, σχέδια ή φωτογραφίες υπαίθρου για την αξιολόγηση του πλάτους της ζώνης συνσεισμικής παραμόρφωσης.

ABSTRACT

«Estimation of the surface coseismic deformation zone width along active faults based on global data»

The occurrence of surface rupturing and displacement along the faults, during strong earthquakes, result on the elevated destruction due to additional ground deformation. The magnitude of the coseismic displacement can be estimated on the basis of existed empirical relationships between the earthquake magnitude, the length of the fault and the seismic displacement. An interest topic for the antiseismic protection and urban design is the estimation of the width of the surface coseismic deformation zone along an active fault. According to the Greek Antiseismic Code, construction on the active faults is prohibited, although the width of the zone is not considered. In seismic regulations of other countries, this zone has a width of 25m in each side of the concerned active fault.

The purpose of this thesis was to investigate the influence of the fault type and length on the width of the zone, inside of which the seismic surface ruptures are formed. For this estimation, a number of strong earthquakes in global scale were studied and the preliminary results were provided. This work is a first attempt, in Greece, to record and evaluate such a kind of information, considering that a systematic research must be continued in this domain

This work was based on the collection, processing and evaluation of the information concerning the surface rupturing, of tectonic origin, during strong earthquakes. It is noticed that due to the limited detailed data, relevant maps, designs and field photographs were taken in consideration, for the estimation of the deformation zone width.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	10
1.1	Τα ρήγματα	11
1.2	Ενεργά ρήγματα και σεισμικές μετατοπίσεις.....	14
1.3	Αναγνώριση ενεργά τεκτονικών περιοχών	19
2	ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ - ΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΚΙΝΔΥΝΟΣ	24
2.1	Σεισμικός κίνδυνος.....	24
2.2	Σεισμική επικινδυνότητα	25
2.3	Σχετική νομοθεσία	29
2.4	Διάδοση ενεργού ρήγματος δια μέσου εδαφικού επιφανειακού στρώματος.....	30
3	ΕΙΔΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΣΤΑ ΡΗΓΜΑΤΑ	34
3.1	Εφελκυστικές δομές.....	34
3.2	Συμπιεστικές δομές.....	41
3.3	Τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και οι δομές τους.....	47
4	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΚΑΙ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΡΗΓΜΑΤΩΝ	51
4.1	Προβλήματα από τη διαφοροποίηση στη γεωλογική δομή	51
4.2	Διαφοροποίηση της λιθοστρωματογραφικής διάρθρωσης.....	51
4.2.1	Διαφοροποίηση της τεκτονικής δομής.....	52
4.2.2	Παρουσία τεκτονικών πετρωμάτων	52
4.2.3	Παρουσία πλευρικών κορημάτων	53
4.3	Προβλήματα από τη διαφοροποίηση των γεωτεχνικών συνθηκών	53
4.3.1	Διαφορικές καθιζήσεις	53
4.3.2	Διαφορική διάβρωση.....	54
4.3.3	Κατολισθήσεις–Καταπτώσεις–Ανατροπές	54
4.3.4	Έγκοιλα – ασυνέχειες.....	55
4.4	Προβλήματα σχετιζόμενα με σεισμική δραστηριότητα	55
4.4.1	Μετατόπιση ρηξιτεμαχών.....	55
4.4.2	Ενίσχυση Εντάσεων.....	56
4.4.3	Φαινόμενα κυματικής συμβολής – κατευθυντικότητας	56
4.4.4	Ρευστοποιήσεις και σεισμικά ρήγματα.....	56

5	ΤΟ ΠΛΑΤΟΣ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΣΥΝΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ – ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	
	ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΟΥΣ	58
5.1	Κανονικά ρήγματα.....	61
5.2	Ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης	76
5.3	Ανάστροφα ρήγματα.....	98
6	Στατιστική επεξεργασία - διαγράμματα	103
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	112
8	Βιβλιογραφία	Error! Bookmark not defined.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

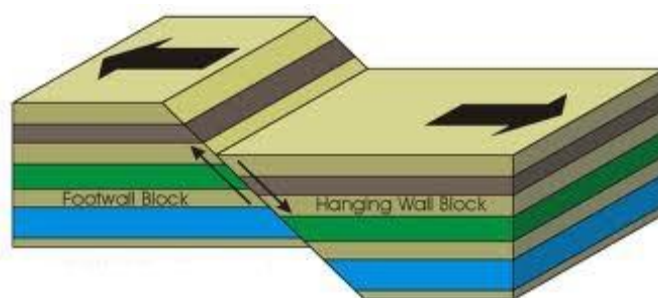
Είναι γνωστό ότι οι επιπτώσεις ενός σεισμού εξαρτώνται κυρίως από την ένταση των σεισμικών δονήσεων, αλλά επίσης και τα δευτερογενή φαινόμενα (κατολισθήσεις, καταπτώσεις, ρευστοποιήσεις, κύματα βαρύτητας, κ.α) που συνοδεύουν πολλές φορές ένα ισχυρό σεισμό. Μία βασική αιτία αυξημένων καταστροφών, σύμφωνα με πρόσφατα αλλά και ιστορικά δεδομένα, είναι η δημιουργία εδαφικών διαρρήξεων λόγω ανάδρασης ενεργών ρηγμάτων. Η παραμόρφωση του εδάφους και οι συνσεισμικές μετατοπίσεις προκαλούν αστοχίες στις κατασκευές, που εξαρτώνται από το μέγεθος των μετατοπίσεων αλλά και το πλάτος της ζώνης μέσα στην οποία αναπτύσσονται οι εδαφικές διαρρήξεις. Είναι ευνόητο ότι η γεωλογική δομή της περιοχής εκδήλωσης των σεισμικών διαρρήξεων και η λιθολογία των σχηματισμών επηρεάζει σημαντικά τον τρόπο σχηματισμού τους. Βασικό ρόλο παίζει επίσης το είδος του ρήγματος που ανέδρασε, σε συνδυασμό με το γεωλογικό υπόβαθρο και το πάχος των πρόσφατων σχηματισμών που τυχόν το καλύπτουν.

Μία καλή γνώση της θέσης πιθανού σχηματισμού επιφανειακών σεισμικών διαρρήξεων αλλά και του πλάτους της ζώνης που τις οριοθετεί, συμβάλλει στον καλύτερο σχεδιασμό των έργων στις συγκεκριμένες περιοχές και γενικότερα στην αντισεισμική προστασία. Σαν γενική πρακτική, σε σεισμικές περιοχές, αποφεύγεται η δόμηση στις ζώνες που έχουν σημειωθεί επιφανειακές διαρρήξεις σε παλαιότερους σεισμούς ή εκτιμάται ότι αναμένονται σε μελλοντικούς. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως π.χ. στα γραμμικά έργα (αυτοκινητόδρομοι, σιδηρόδρομοι, αγωγοί ενέργειας) είναι αναπόφευκτη η αποφυγή των ενεργών ρηγμάτων, οπότε η εκτίμηση των εδαφικών παραμορφώσεων συμβάλλει σημαντικά στον ασφαλή σχεδιασμό και κατασκευή του έργου. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα αναφέρεται ο σεισμός της Αλάσκας του 2002, με μέγεθος $M=7,9$, όπου παρότι κατά μήκος του μεγάλου ρήγματος του Denali που ανέδρασε σημειώθηκαν μετατοπίσεις με μέγεθος έως και 5,5 μέτρα, ο αγωγός φυσικού αερίου, λόγω προβλέψιμου κατάλληλου σχεδιασμού, έμεινε ανέπαφος.

1.1 Τα ρήγματα

Ρήγμα (fault) είναι η απότομη διακοπή της συνέχειας των πετρωμάτων λόγω θραύσης κατά μήκος μιας επιφάνειας διάρρηξης, η οποία συνοδεύεται και από σχετική μετατόπιση των δύο πλευρών εκατέρωθεν της επιφάνειας αυτής. Τα ρήγματα οφείλονται κατά κύριο λόγο στις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τις κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών, όταν οι τάσεις που αναπτύσσονται στα πετρώματα υπερβούν το όριο θραύσης τους. Συνήθως τα ρήγματα εμφανίζονται πολλαπλά σε μια περιοχή, παράλληλα ή όχι, οπότε και γίνεται λόγος για ζώνη ρηγμάτων ή ρηξιγενή ζώνη.

Από τα δύο τεμάχη του πετρώματος που χωρίζονται από το ρήγμα, το τεμάχος που βρίσκεται προς τη φορά κλίσης του ρήματος, δηλαδή υπέρκειται του ρήματος, ονομάζεται υπερκείμενο τεμάχος ή οροφή (hanging wall), ενώ το τεμάχος που βρίσκεται αντίθετα από τη φορά κλίσης του ρήματος, δηλαδή υπόκειται του ρήματος, ονομάζεται υποκείμενο τεμάχος ή δάπεδο (foot wall) (εικόνα 1). Η επιφάνεια που προκύπτει από τις σχετικές μετακινήσεις των δύο τεμαχών ονομάζεται κατοπτρική επιφάνεια (επειδή σε πολλές περιπτώσεις είναι σχεδόν λεία), ή «καθρέφτης» του ρήματος. Στον καθρέφτη του ρήματος και υπό την προϋπόθεση ότι αυτός δεν έχει υποστεί έντονη διάβρωση, παρατηρούνται οι γραμμές ολίσθησης, οι οποίες αποτυπώνουν τη σχετική κίνηση των τεμαχών πάνω στη ρηξιγενή επιφάνεια. Αυτές σχηματίζονται από την τριβή σκληρών υλικών (κόκκων χαλαζία, κροκαλών κ.ά.), τα οποία λόγω της αντίθετης κίνησης των δυο ρηξιτεμαχών σύρθηκαν πάνω στη ρηξιγενή επιφάνεια (εικόνα 2).



Εικόνα 1.1. Επιφάνεια ρήματος με σημειωμένη τη σχετική κίνηση των δύο τεμαχών



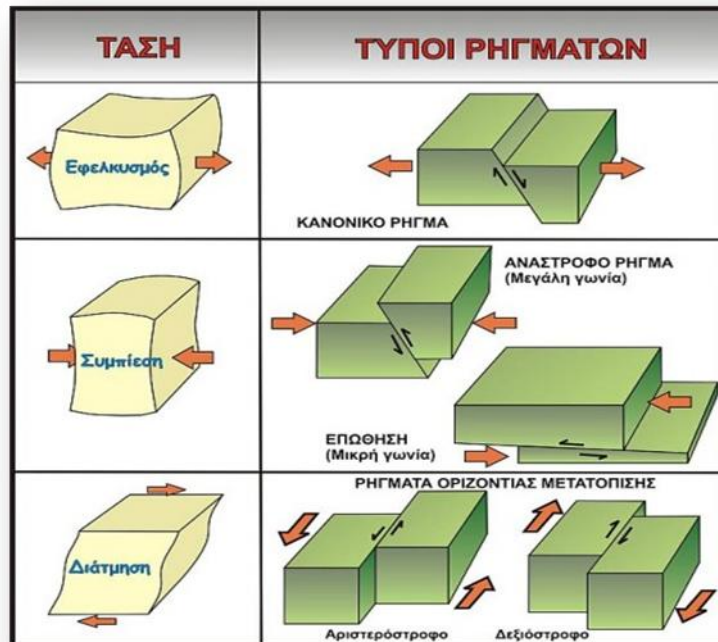
Εικόνα 1.2 Επιφάνεια ρήγματος με χαρακτηριστικές τεκτονικές γραμμές ολίσθησης

Μία από τις βασικότερες ταξινομήσεις των ρηγμάτων βασίζεται στην κίνηση εκατέρωθεν της ρηξιγενούς επιφάνειας, οπότε ανάλογα με την τροχιά ολίσθησης τα ρήγματα διαιρούνται σε:

- Ρήγματα ολίσθησης κατά κλίση (dip-slip faults): στα ρήγματα αυτά η μετατόπιση έχει γίνει παράλληλα προς τη φορά κλίσης του ρήγματος. Ανάλογα με την απόκλιση ή τη σύγκλιση οροφής και δαπέδου, χωρίζονται σε
 - Κανονικά ρήγματα (normal faults) στα οποία η οροφή του ρήγματος βυθίζεται, και σε
 - Ανάστροφα ρήγματα (reverse faults) στα οποία, σε αντίθεση με τα κανονικά, παρατηρείται ανύψωση της οροφής.
- Ρήγματα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης ή κατά παράταξη (strike-slip faults): Είναι τα ρήγματα στα οποία η μετατόπιση έχει γίνει παράλληλα προς την παράταξη του ρήγματος. Τα ρήγματα αυτά διακρίνονται με τη σειρά τους σε αριστερόστροφα (left-lateral/sinistral) και δεξιόστροφα (right-lateral/dextral).
- Ρήγματα πλάγιας ολίσθησης (oblique-slip faults): Σε αυτή την περίπτωση το άνωσμα της ολίσθησης σχηματίζει μετρήσιμη γωνία με την παράταξη ή τη φορά κλίσης του ρήγματος. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι υπάρχουν κατηγορίες ρηγμάτων που προέρχονται από μεικτούς κινηματικούς χαρακτήρες και ονοματίζονται αντίστοιχα με μεικτό τρόπο, π.χ. η ορολογία

πλαγιοκανονικό ρήγμα αντιστοιχεί σε ρήγμα με πλάγια και κανονική συνιστώσα κίνησης.

Στην εικόνα 3 απεικονίζονται οι βασικοί τύποι ρηγμάτων και οι τεκτονικές τάσεις που τα δημιουργούν. Παρατηρούμε ότι οι εφελκυστικές δυνάμεις δημιουργούν κανονικά ρήγματα, οι συμπιεστικές δυνάμεις δημιουργούν ανάστροφα ρήγματα και από διατμητικές τάσεις έχουμε τη δημιουργία ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης. Διακρίνουμε στην κατηγορία των ανάστροφων ρηγμάτων, ανάλογα με τη γωνία κλίσης της ρηξιγενούς επιφάνειας, τα εφφιευτικού χαρακτήρα ανάστροφα ρήγματα (με κλίση $>45^\circ$) και τα επωθητικού χαρακτήρα ανάστροφα ρήγματα (με κλίση $<45^\circ$).



Εικόνα 1.3. Βασικοί τύποι ρηγμάτων και αντίστοιχες τεκτονικές τάσεις

1.2 Ενεργά ρήγματα και σεισμικές μετατοπίσεις

Πολλές περιοχές του πλανήτη μας, όπως και ο Ελληνικός χώρος, χαρακτηρίζονται από την παρουσία πολυάριθμων ρηγμάτων, τα περισσότερα από τα οποία λειτούργησαν στο παρελθόν, κατά τη διάρκεια εκατομμυρίων ή εκατοντάδων χιλιάδων ετών, αλλά σήμερα παρουσιάζονται χωρίς δυναμική. Αντίθετα, τα νεότερης κυρίως γεωλογικής ηλικίας ρήγματα επαναδραστηριοποιούνται κατά ορισμένα χρονικά διαστήματα (κανονικά ή μη) και προκαλούν τους σεισμούς. Τα ρήγματα αυτά ονομάζονται ενεργά ρήγματα (Παυλίδης 2003, Ροντογιάννη 2006).

Ανάλογα με το γεωδυναμικό καθεστώς κάθε περιοχής ή και τις επιστημονικές αντιλήψεις, υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για να χαρακτηριστεί ένα ρήγμα ως ενεργό, με βασικό κριτήριο να θεωρείται η ηλικία της τελευταίας ανάδρασή του. Έτσι, ενεργό χαρακτηρίζεται ένα ρήγμα όταν έχει παρουσιάσει σεισμική (ή ασεισμική) δραστηριότητα:

- τα τελευταία 10.000 χρόνια
- τα 35.000 χρόνια
- τα 150.000 χρόνια
- περισσότερο από μια φορά τα τελευταία 500.000 χρόνια
- στη διάρκεια του Τεταρτογενούς, ενώ συνδέεται αποδεδειγμένα με καταγραμμένα σεισμικά επίκεντρα.

Οι ορισμοί αυτοί έχουν αποκτήσει σε χώρες με μεγάλη σεισμικότητα (ΗΠΑ, Ιαπωνία, Νέα Ζηλανδία) και νομική σημασία, οπότε και λαμβάνονται σοβαρά υπόψη για τις κατασκευές αγωγών ενέργειας, τον πολεοδομικό σχεδιασμό και μεγάλα τεχνικά και αναπτυξιακά έργα.

Η Διεθνής Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας θεωρεί ένα ρήγμα ενεργό αν:

- Παρουσιάζει τεκμήρια κίνησης στο πρόσφατο Τεταρτογενές
- Υπάρχουν τοπογραφικές ενδείξεις για πρόσφατη επιφανειακή διάρρηξη
- Συνδέεται άμεσα με σεισμούς καταγραμμένους με σεισμολογικά όργανα
- Παρουσιάζει ασεισμική ολίσθηση ή έχει μια αποδεδειγμένα δομική σχέση με ένα άλλο γνωστό ενεργό ρήγμα, έτσι ώστε η κίνηση του ενός μπορεί να προκαλέσει την κίνηση του άλλου.

Οι ιαπωνικοί ορισμοί εστιάζουν κυρίως στο μέγεθος της μετατόπισης των ρηγμάτων και στο σύγχρονο και μελλοντικό ρυθμό ολίσθησης τους, οπότε τα ρήγματα κατατάσσονται σε:

- Ρήγματα με πολύ υψηλή δραστηριότητα, όπου ο μέσος όρος του ρυθμού ολίσθησης είναι $> 1\text{cm}/\text{έτος}$ (που αφορά τις πιο ενεργές ρηξιγενείς ζώνες της γης)
- Ρήγματα με υψηλή δραστηριότητα, με μέσο ρυθμό ολίσθησης μεταξύ $0.1\text{cm}/\text{έτος}$ και $1\text{cm}/\text{έτος}$. Σημειώνεται ότι σύμφωνα και με τη Διεθνή Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας ρήγματα υψηλής δραστηριότητας θεωρούνται αυτά τα οποία συνδέονται με σεισμό μεγέθους $M=7.0$ και ρυθμό επανάληψης της τάξεως των εκατοντάδων έως και χιλιάδων ετών
- Ρήγματα με μέτρια, χαμηλή ή πολύ χαμηλή δραστηριότητα (αδρανή)

Σε ότι αφορά τον ελληνικό χώρο, μπορούμε να θεωρήσουμε ένα ρήγμα ενεργό όταν αποδεδειγμένα έχει δράσει τα τελευταία 500.000 χρόνια (από το Μέσο Πλειστόκαινο μέχρι σήμερα). Στο διάστημα αυτό, δεν έχει σημειωθεί μεγάλη αλλαγή στο τεκτονικό μοντέλο, δηλαδή στο είδος και τον προσανατολισμό των τεκτονικών τάσεων που επηρεάζουν πολλές από τις ενεργές περιοχές της χώρας, οπότε αναμένεται να είναι ανάλογος και ο τρόπος της μελλοντικής κίνησης ενός ρήγματος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι φανερό ότι ο ασφαλής χαρακτηρισμός ενός ρήγματος ως ενεργού από τις ενόργανες σεισμικές καταγραφές, που υπάρχουν μόνο για το διάστημα των τελευταίων 110 περίπου ετών, δεν είναι αρκετά αξιόπιστος. Έτσι για την καλύτερη προσέγγιση του προβλήματος και την κατά το δυνατόν ασφαλέστερη αναγνώριση των ενεργών ρηγμάτων μιας περιοχής έρευνας, χρησιμοποιούνται εκτός από τα σεισμολογικά και γεωλογικά κριτήρια, καθώς και γεωφυσικά και ιστορικά δεδομένα, τα οποία συνοψίζονται ως εξής:

- **Γεωλογικά κριτήρια**

Ένα ρήγμα μπορεί να χαρακτηριστεί γεωλογικά ενεργό όταν αποδεδειγμένα επαναδραστηριοποιήθηκε κατά το πρόσφατο γεωλογικό παρελθόν, δηλαδή όταν έχει δραστηριοποιηθεί τουλάχιστον κατά το Τεταρτογενές. Αυτό διαπιστώνεται

άμεσα με την ηλικία των σχηματισμών που επηρεάζει. Όταν δηλαδή το ρήγμα κόβει σχηματισμούς του Ανώτερου Πλειστόκαινου ή και νεότερους, τότε χαρακτηρίζεται ως γεωλογικά ενεργό ρήγμα. Υπάρχουν όμως και έμμεσοι τρόποι για να διαπιστωθεί αν ένα ρήγμα είναι γεωλογικά ενεργό, όπως είναι τα πρόσφατα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά που ενδεχόμενα συνοδεύουν το ενεργό ρήγμα. Τέτοια είναι, αναβαθμίδες τεκτονικής προέλευσης, νεοτεκτονικά εξάρματα, νεοσχηματισθείσες τεκτονικές κοιλάδες, απότομη αλλαγή διεύθυνσης χειμάρρων, τεκτονικά πρηνή με μεγάλες κλίσεις (απότομες πλαγιές), κυματοειδής διάταξη πρόσφατων ιζημάτων που οφείλεται σε τεκτονικά αίτια, τριγωνικές επιφάνειες κ.ά.

Αλλά επικουρικά στοιχεία για την ένδειξη της ενεργού δράσης ενός ρήγματος είναι η ύπαρξη θερμομεταλλικών πηγών ή ατμίδων κατά μήκος αυτού. Επίσης η ανάπτυξη γεωθερμικών πεδίων στην ευρύτερη περιοχή του ρήγματος, καθώς και φαινόμενα έντονης διάβρωσης που εμφανίζονται στο ανερχόμενο τέμαχος του ρήγματος, τα οποία όμως δεν είναι απαραίτητα, μονοσήμαντα, να χαρακτηρίζουν πάντοτε ενεργά ρήγματα.

▪ **Σεισμολογικά κριτήρια**

Μεγάλοι ή ακόμη και μικροί σεισμοί, τα επίκεντρα και τα εστιακά βάθη των οποίων είναι καθορισμένα ακριβώς από μεγάλο δίκτυο σεισμολογικών σταθμών, μπορούν να ορίσουν τη θέση ενεργών ρηγμάτων. Επίσης σεισμικές ακολουθίες (προσεισμοί, μετασεισμοί, σμηνοσεισμοί) συνδέονται άμεσα με ενεργά ρήγματα, τη γεωμετρία των οποίων μάλιστα μπορούν να την καθορίσουν με ικανοποιητική ακρίβεια. Τέλος μικροσεισμοί ($1.5 \leq M \leq 3$) που είναι υπολογισμένοι με δίκτυο σειсмоγράφων μεγάλης ευαισθησίας ή με δίκτυο φορητών σειсмоγράφων εγκατεστημένων σε μικρή περιοχή (2-5km γύρω από τα ρήγματα) καθορίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια τα ενεργά ρήγματα. Αντίθετα όμως, η έλλειψη σεισμών δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο για τον καθορισμό ενός ρήγματος ως μη ενεργού.

▪ **Παλαιοσεισμολογικά κριτήρια**

Οι παλαιοσεισμολογικές μέθοδοι, όπου μπορούν να εφαρμοσθούν, παρέχουν πολύ αξιόπιστα δεδομένα και αποδείξεις για το χαρακτηρισμό των ενεργών ρηγμάτων με ποσοτικές παραμέτρους, όπως το είδος των παλαιοσεισμών, τα άλματα των ρηγμάτων και ο ρυθμός ολίσθησης τους.

▪ **Ιστορικά κριτήρια**

Πληροφορίες από ιστορικές πηγές για μεγάλους επιφανειακούς σεισμούς που συνδέονται με μετακινήσεις ρηγμάτων, κατολισθήσεις, ρευστοποιήσεις εδαφών, αλλαγές ροής χειμάρρων ή πηγών κ.ά. αποτελούν σοβαρές ενδείξεις για το χαρακτηρισμό μιας περιοχής ως τεκτονικά ενεργού. Ο συνδυασμός αυτών των πληροφοριών με χαρτογραφημένα ρήγματα μπορεί να καθορίσει με σαφήνεια τα ενεργά ρήγματα της περιοχής.

▪ **Γεωφυσικά κριτήρια**

Γεωφυσικά δεδομένα, όπως βαρυτομετρικές ανωμαλίες ή ακριβείς υπολογισμοί της δομής του φλοιού της γης διάφορων σεισμοτεκτονικών τεμαχών, συμβάλλουν ουσιαστικά στην κατανόηση της ενεργού τεκτονικής μιας περιοχής.

Με βάση τα κριτήρια που προαναφέρθηκαν, τα ρήγματα ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες με τους αντίστοιχους χαρακτηρισμούς.

▪ **Σεισμικά ρήγματα**

Είναι τα ρήγματα για τα οποία υπάρχουν σύγχρονες ή ιστορικές καταγραφές και μαρτυρίες για την εκδήλωση κατά μήκος τους επιφανειακών διαρρήξεων κατά τη διάρκεια σεισμού.

▪ **Ενεργά ρήγματα**

Είναι εκείνα που αναμένεται να εμφανίσουν επιφανειακή διάρρηξη κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμών ή παρουσιάζουν μικρή αλλά συνεχή μετακίνηση των δύο τεμαχών τους (creep), η οποία διαπιστώνεται με γεωδαιτικές μετρήσεις. Τα ενεργά ρήγματα συνήθως τέμνουν πρόσφατα ιζήματα ή ηφαιστειακά πετρώματα Τεταρτογενούς ηλικίας (κυρίως Ανωτέρου Πλειστοκαίνου και Ολοκαίνου) και είναι συνδεδεμένα με πρόσφατες γεωμορφολογικές δομές ή με την εκδήλωση θερμών πηγών. Τέλος, έχουν άμεση σχέση με την κατανομή των επικέντρων σεισμών και μικροσεισμών ή ακόμη και ιστορικών σεισμών.

▪ **Δυνητικώς ενεργά ρήγματα**

Χαρακτηρίζονται εκείνα τα ρήγματα που διαθέτουν μικρό βαθμό συσχέτισης με την κατανομή των επικέντρων μεγάλων σεισμών ή συνηθέστερα συνδέονται μόνο με

μικροσεισμούς. Επίσης, πρόκειται για ρήγματα για τα οποία δεν υπάρχουν ιστορικές πληροφορίες για σεισμούς και εδαφικές διαρρήξεις και μετακινήσεις, επηρεάζουν νέα ιζήματα, αλλά δε φαίνεται να έχουν επαναδραστηριοποιηθεί στο πολύ πρόσφατο παρελθόν. Τέλος, πρόκειται για εκείνα τα ρήγματα όπου τα νέα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του εδάφους με τα οποία συνδέονται (π.χ. κατοπτρικές επιφάνειες) έχουν διαβρωθεί ή δεν διακρίνονται ευκρινώς.

▪ **Ρήγματα άγνωστης δραστηριότητας**

Χαρακτηρίζονται εκείνα για τα οποία δεν υπάρχουν σεισμολογικές, ιστορικές και γεωλογικές ενδείξεις για επαναδραστηριοποίησή τους στο πρόσφατο γεωλογικό παρελθόν. Τα ρήγματα αυτής της κατηγορίας δεν είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό τεχνικών έργων, παρά μόνο ως επιφάνειες ασυνέχειας. Η περίπτωση μελλοντικής ενεργοποίησής τους εμφανίζεται σχεδόν μηδενική.

Οι παραπάνω χαρακτηρισμοί προφανώς και δεν είναι απόλυτοι, λόγω του ότι αναφέρονται στη Γη και τις φυσικές δυνάμεις, που είναι σε πολλές περιπτώσεις απρόβλεπτες. Για το χαρακτηρισμό ενός ρήγματος ως ενεργού πρέπει κανείς να είναι πολύ προσεκτικός και να μην αποκλείει εύκολα ρήγματα, καθώς ορισμένα που είχαν χαρακτηριστεί στο παρελθόν ως τεκτονικά αδρανή, αιφνιδίασαν στη συνέχεια, με την εκδήλωση καταστροφικών σεισμών.

Ένας από τους βασικότερους λόγους που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το μηχανικό τα ενεργά ρήγματα μιας περιοχής, είναι η θεμελίωση τεχνικών κατασκευών (κτίρια, γέφυρες, δρόμοι, υπόγεια δίκτυα ηλεκτρισμού, φράγματα, σήραγγες) πάνω ή και κοντά σε αυτά. Για την αποφυγή αστοχιών από την δόμηση πάνω σε ρήγματα, πολλές χώρες έχουν θεσπίσει ειδική νομοθεσία. Η νομοθεσία αυτή περιλαμβάνει ζώνες απαγόρευσης δόμησης ακριβώς πάνω στα ρήγματα καθώς και σε απόσταση από αυτά, που διαφέρει ανά χώρα καθώς και ζώνες ειδικών συνθηκών δόμησης όσο απομακρυνόμαστε από αυτά.

Είναι ευνόητο ότι σε ότι αφορά τα έργα που γίνονται στην Ελλάδα, εκτός από τις διεθνείς και ελληνικές προδιαγραφές πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη η εμπειρία από τα αποτελέσματα και τις επιπτώσεις των σεισμών στο χώρο μας ή σε

περιοχές με παρόμοιο σεισμοτεκτονικό καθεστώς. Τα ενεργά ρήγματα θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη στον αντισεισμικό σχεδιασμό, ακόμη και αν τα υπάρχοντα σεισμολογικά στοιχεία δείχνουν σαφώς χαμηλότερους δείκτες και συντελεστές – όπως συνέβη στην περίπτωση των απρόβλεπτων σεισμών της Κοζάνης – Γρεβενών (1995) και της Αθήνας (1999). Η διεθνής επιστημονική κοινότητα πλέον δέχεται ότι είναι προτιμότερη και ασφαλέστερη η σωστή θεμελίωση 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 γνώση.

1.3 Αναγνώριση ενεργά τεκτονικών περιοχών

Η πλειοψηφία των ερευνών που αφορούν τα ενεργά ρήγματα ακολουθούν μια παρόμοια μεθοδολογία, ανεξάρτητα από το τεκτονικό περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιούνται. Οι αρχικές έρευνες διεξάγονται με χρήση εργαλείων τηλεπισκόπησης, δορυφορικών εικόνων ή αεροφωτογραφιών, για τον εντοπισμό γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών, ενδεικτικών της παρουσίας ενεργής επιφανειακής διάρρηξης (Allen 1975). Η ευκολία της αναγνώρισης των ενεργών ρηγμάτων εξαρτάται από τη μορφή των διαρρήξεων, το βαθμό τους και την πρόσφατη δραστηριότητα τους, καθώς και από τη διατήρηση της γεωμορφολογίας της γραμμής του ρήγματος. Σε περιοχές με υψηλή διάβρωση και έντονες καιρικές συνθήκες, ή όπου τα ποσοστά μετατόπισης δεν είναι υψηλά κατά μήκος του ίχνους του ρήγματος, ένα μέρος ή και το σύνολο των ενδείξεων για την πρόσφατη δραστηριότητα του ρήγματος ενδέχεται να έχουν χαθεί ή να είναι τελείως ασαφή.

Όταν αναγνωριστεί μια ζώνη ενεργών ρηγμάτων, ακολουθεί η έρευνα πεδίου, η οποία είναι απαραίτητη για να επιβεβαιωθούν οι ενδείξεις που δίνονται από τις εικόνες τηλεπισκόπησης και να επιλεγούν έπειτα οι θέσεις για περαιτέρω μελέτη.

Οι επιτόπου έρευνες ρηγμάτων εμπίπτουν σε τρεις γενικές κατηγορίες:

- επιφανειακές έρευνες
- μη επεμβατικές έρευνες υπεδάφους

- επεμβατικές έρευνες υπεδάφους.

Οι επιφανειακές έρευνες συνήθως περιλαμβάνουν λεπτομερή γεωλογική και γεωμορφολογική χαρτογράφηση προκειμένου να καθοριστεί η ηλικία των γεωλογικών σχηματισμών που επηρεάζονται από το ρήγμα καθώς και ο βαθμός και η φύση των πρόσφατων μετατοπίσεων κατά μήκος του ρήγματος. Οι έρευνες αυτές παρέχουν κυρίως ποιοτικές πληροφορίες σχετικά με τα διάφορα επεισόδια δράσης του ρήγματος και τις τεκτονικές τάσεις που συνδέονται με αυτά.

Οι μη-επεμβατικές έρευνες υπεδάφους είναι κυρίως γεωφυσικές μέθοδοι, συμπεριλαμβανομένης της ανάκλασης και διάθλασης σεισμικών κυμάτων, ραντάρ ανίχνευσης εδάφους και ηλεκτρομαγνητικών προφίλ. Αν και αυτές οι τεχνικές μπορεί να είναι χρήσιμες για την ανίχνευση της παρουσίας ρηγμάτων μικρού βάθους, δεν παρέχουν μια λεπτομερή εικόνα της ίδιας της ζώνης του ρήγματος.

Για να αποκτήσουμε μια λεπτομερή κατανόηση της γεωμετρίας της ζώνης του ενεργού ρήγματος, γενικά πρέπει να εκτελεστούν επεμβατικές έρευνες υπεδάφους, δηλαδή εκσκαφή ορύγματος εγκάρσια στο ρήγμα.

Αν και η εκσκαφή ορυγμάτων παρέχει την πιο λεπτομερή εικόνα μιας ζώνης ρήγματος, είναι μια σχετικά δαπανηρή και χρονοβόρα ερευνητική τεχνική. Το κόστος της έρευνας σε κάθε ρήγμα μπορεί γίνει απαγορευτικό και να μην είναι δυνατόν να εκτελεστεί μέσα σε ένα αυστηρό χρονοδιάγραμμα του έργου, κυρίως στις περιπτώσεις ενός γραμμικού έργου ή ενός δικτύου γραμμικών έργων που μπορεί να έχουν πολλαπλές διασταυρώσεις με ρήγματα.

Μετά την ολοκλήρωση των επιτόπου ερευνών στα ρήγματα απαιτείται περαιτέρω λεπτομερές έρευνα και συλλογή κατάλληλων δεδομένων ώστε να χαρακτηριστεί αναλόγως η επιφανειακή διάρρηξη και να εντοπιστούν οι πιθανοί κίνδυνοι που προκύπτουν από αυτή. Συνοπτικά τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

- Ο χαρακτηρισμός των ρηγμάτων ανάλογα με την ενεργότητα και την επικινδυνότητά τους σε σεισμικά, ενεργά, δυνητικώς ενεργά και άγνωστης δραστηριότητας (όπως έχει ήδη αναφερθεί).
- Η λεπτομερές χαρτογράφηση του ίχνους των ενεργών αλλά και των δυνητικώς ενεργών ρηγμάτων σε αρκετά μεγάλες κλίμακες. Η χαρτογράφηση περιλαμβάνει εκτός από την επιτόπια (in situ) καταγραφή, την αξιολόγηση γεωτρήσεων για τον

προσδιορισμό του άλματος του ρήγματος αλλά και της ζώνης επιρροής και παραμόρφωσής του καθώς και τη λεπτομερή καταγραφή της επιφάνειας για τον προσδιορισμό της μορφολογίας του.

- Η διάνοιξη παλαιοσεισμολογικών τομών για την εύρεση περισσότερων στοιχείων του ρήγματος (πλάτος διαρρηγμένης ζώνης, εύρεση παλαιότερων σεισμικών γεγονότων και πιθανού αντίστοιχου χρόνου επανάληψής τους). 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 (αρκετά ισχυροί σεισμοί σε μικρά χρονικά διαστήματα) που εναλλάσσονται με μεγάλες περιόδους αδράνειας (σεισμικής ησυχίας). Ο χρόνος αυτός αδρανείας ενός ρήγματος μπορεί πιθανώς να χαρακτηρίσει ένα ενεργό ρήγμα ως ασφαλές για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και για ένα ορισμένο είδος κατασκευής.
- Ο υπολογισμός του μήκους του ρήγματος. Αν δεν υπάρχουν λεπτομερή παλαιοσεισμικά δεδομένα μετατόπισης για ένα ρήγμα, οι εμπειρικές σχέσεις μεταξύ μήκους του ρήγματος, του μεγέθους του σεισμού και της επιφανειακής μετατόπισης παρέχουν μια εκτίμηση του βαθμού της μετατόπισης σε όλη την ζώνη του ρήγματος (Πίνακας 1). Αυτές οι σχέσεις δεν δίνουν διακριτές τιμές της μετατόπισης κατά μήκος των ρηγμάτων, αλλά παρέχουν ένα εύρος τιμών (μέση και μέγιστη) της μετατόπισης για το σύνολο του ρήγματος. Ο υπολογισμός της μέγιστης μετατόπισης είναι συνήθως επαρκής για το σχεδιασμό των μέτρων προστασίας. Σε μια περιοχή όπου υπάρχει μεγάλος αριθμός ρηγμάτων, τα δεδομένα μετατόπισης του ρήγματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό καμπύλων πιθανότητας υπέρβασης της μέσης και της μέγιστης μετατόπισης (Youngs et al. 2003).

Παρά τη μεγάλη πρόοδο που σημειώθηκε, η αναγνώριση των ενεργών ρηγμάτων στη χώρα μας είναι συνήθως μια δύσκολη διαδικασία λόγω της τεκτονικής πολυπλοκότητας του Ελλαδικού χώρου, με την ύπαρξη πολλών μικρών σε μήκος δομών και της πολυσχιδούς γεωμετρικής ανάπτυξής τους.

Αναφορά	Εξίσωση
Wyss and Brune (1968)	$ML = 1.9 \log L(\text{cm}) - 6.7$ California-Nevada $M_c = 3-6$
Enescu (1977)	$\log L(\text{cm}) = 0.38 M_s + 3.85$ περιοχή Vrancea $\log S(\text{cm}^2) = 0.76 M_s + 7.42$ Ρουμανία
Ambraseys and Zatopek	$M_s = 0.88 \log L(\text{km}) + 5.62$ Τουρκία $M_s = 5.8-8.0$
Bollinger (1968)	$M_s = 0.79 \log(Km) + 6.04$ $M_s = 5-8$
King and Knopoff (1968, 1969)	$\log(LD2) = 2.24 M_s - 4.99$ $M_s = 5.5-8.5$ L(cm) $\log(LD) = 1.70 M_s - 3.47$ D(cm)max
Chinnery (1969)	$M_s = 0.57 \log(LD2) + 0.84$ $M_s = 3-8$ L(cm) $M_s = 1.04 \log D + 4.96$ D(cm) W(cm) $M_s = 0.79 \log(LDW) - 4.74$ Strike slip
Housner (1970)	$\log L(\text{Km}) = 0.43 M_s - 1.54$ $M_s < 6.4$ $\log L(\text{Km}) = 0.87 M_s - 4.45$ $M_s > 6.4$
Schick (1970)	$M_s = 2 \log L(\text{Km}) + 3.5$ Γερμανία
Shebalin (1971)	$\log L(\text{Km}) = 0.5 M_s - 1.8$ $\log W(\text{Km}) = 0.3 M_s - 0.25$ logh -0.5
Ozawa (1972)	$M_s = 0.76 \log L(\text{Km}) + 6.35$ Κγoto, Ιαπωνία
Douglas and Ryall (1975)	$\log L(\text{Km}) = 0.395 M_s - 1.454$ $M_s < 6.4$ Nevada $\log L(\text{Km}) = 0.9 M_s - 4.673$ $M_s > 6.4$
Matsuda (1975)	$\log D(\text{m}) = 0.6 M_s - 4.0$ Ιαπωνία

	$\log L(\text{Km})=0.6M_s-2.9$
McKeown (1975)	$\log L(\text{cm})=0.56M_c+2.73$ Nevada
Nikonov (1975)	$M_s-0.97\log L(\text{Km})+6.3$ Ασία $M_s=6-8.5$
	$M_s=0.9\log D(\text{cm})+5.43$
Patwardham et al. (1975)	$\log L(\text{Km}) = (M_s-2.88)/2.7$ $M_s<6.4$
	$\log L(\text{Km})=(M_s-5.13)/1.11$ $M_s>6.0$
Drimmel (1979)	$M_s=2\log L(\text{Km})+1.7$ Alps $M_s<7$
Wyss (1979)	$M_s=\log LW(\text{Km}^2)+4.15$ $M_s>5.6$
Kiratzis et al. (1985)	$\log L(\text{Km})=0.61 M_s-2.55$ για Ελλάδα και
	για σεισμούς $5.8<M_s<7.5$
Pavlidis et al. 2000	$M_s=0.6 \log L + 5,89$ Αιγαίο για σεισμούς $6<M_s<7.0$

Εικόνα 1.4. Εμπειρικές σχέσεις μεταξύ μήκους ρήγματος (L) και μεγέθους σεισμού (Ms) για διάφορες περιοχές

2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ - ΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΚΙΝΔΥΝΟΣ

2.1 Σεισμικός κίνδυνος

Οι μεταβλητές οι οποίες, κυρίως, εξετάζονται για τη θεμελίωση τεχνικών κατασκευών σε θέσεις ενεργών ρηγμάτων είναι η σεισμική επικινδυνότητα (Seismic Hazard) και ο σεισμικός κίνδυνος (Seismic Risk). Ως σεισμική επικινδυνότητα ορίζεται η αναμενόμενη εκδήλωση ενός μελλοντικού σεισμού και ως σεισμικός κίνδυνος οι αναμενόμενες συνέπειες ενός μελλοντικού σεισμού (Parazachos et al.1986, Kramer 1996, Παυλίδης 2003).

Ο σεισμικός κίνδυνος (R), σε μία θέση όπου υπάρχει ή πρόκειται να γίνει μια τεχνική κατασκευή, καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της αναμενόμενης σεισμικής κίνησης του εδάφους στη θέση αυτή αλλά και από τις ιδιότητες της τεχνικής κατασκευής. Το σύνολο των χαρακτηριστικών αυτών της εδαφικής σεισμικής κίνησης (πλάτος και περίοδος της εδαφικής ταλάντωσης, πιθανότητα γένεσής της κ.ά.) ανήκει στη σεισμική επικινδυνότητα (H), ενώ οι ιδιότητες της τεχνικής κατασκευής (ιδιοπερίοδος, συντελεστής απόσβεσης, ποιότητα της κατασκευής) ορίζονται ως τρωτότητα (V) της κατασκευής.

Οι τρεις προαναφερθείσες σεισμικές παράμετροι εκφράζονται μεταξύ τους με βάση τη σχέση $R = H * V$ (Kramer 1996). Από τη σχέση αυτή παρατηρούμε ότι για να μειώσουμε τις συνέπειες ενός σεισμού (βλάβες στις τεχνικές κατασκευές, θάνατοι), δηλαδή το σεισμικό κίνδυνο R, πρέπει να ελαττώσουμε τη σεισμική επικινδυνότητα H ή την τρωτότητα της κατασκευής V ή και τις δύο. Στην πραγματικότητα, όμως, μπορούμε να μεταβάλλουμε μόνο την τρωτότητα μιας κατασκευής και όχι τη σεισμική επικινδυνότητα, η οποία εξαρτάται κυρίως από φυσικούς παράγοντες (ιδιότητες της σεισμικής εστίας, του μέσου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, του εδάφους θεμελίωσης της κατασκευής κ.ά.).

Κατά το σχεδιασμό μιας τεχνικής κατασκευής επιδιώκεται η εφαρμογή των δύο ακόλουθων αρχών:

- Η τεχνική κατασκευή να μην καταρρεύσει από τη μέγιστη αναμενόμενη σεισμική κίνηση στη θέση θεμελίωσης.

- Η τεχνική κατασκευή να μην υποστεί βλάβη ή να υποστεί μικρή, εύκολα επισκευάσιμη βλάβη από την πιο πιθανή αναμενόμενη ισχυρή σεισμική κίνηση κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής της.

Η μορφή ενός τεχνικού έργου παίζει σημαντικό ρόλο στην απόκριση του έργου στη σεισμική κίνηση. Γενικά, καλύτερη συμπεριφορά έχει η κατασκευή που είναι απλή, συμμετρική, δεν παρουσιάζει εξαιρετική επιμήκυνση κατά την οριζόντια ή την κατακόρυφη διάσταση, έχει ομοιόμορφη και συνεχή κατανομή της δυσκαμψίας και αντοχής της και έχει σωστή θεμελίωση λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του εδάφους.

2.2 Σεισμική επικινδυνότητα

Η σεισμική επικινδυνότητα, ως η αναμενόμενη εκδήλωση ενός μελλοντικού σεισμού, είναι μία από τις βασικότερες σεισμικές παραμέτρους που θα πρέπει να εξετάζεται και να εκτιμάται κατάλληλα. Η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας μιας περιοχής ή θέσης βασίζεται α) στο σεισμοτεκτονικό μοντέλο της περιοχής, που συντίθεται από τα σεισμολογικά και τεκτονικά (κυρίως νεοτεκτονικά) στοιχεία και β) στη σχέση απόσβεσης, που περιγράφει τη δόνηση γύρω από τη σεισμική πηγή.

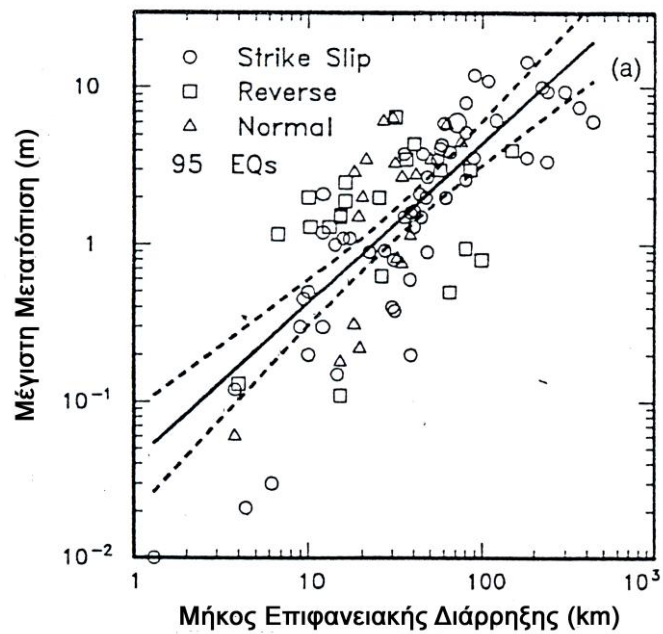
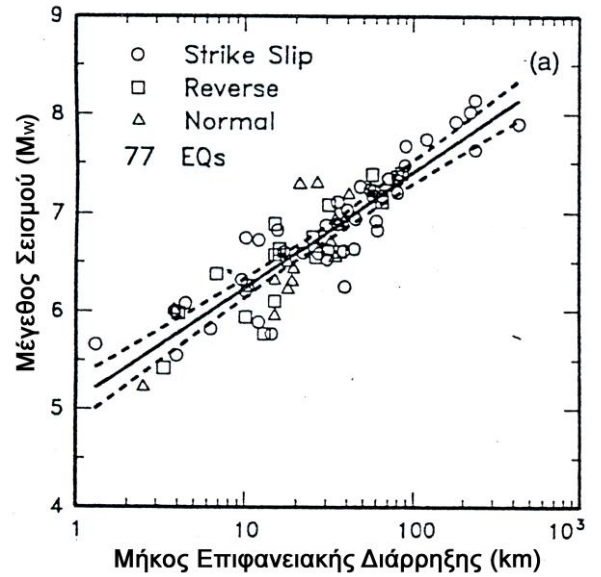
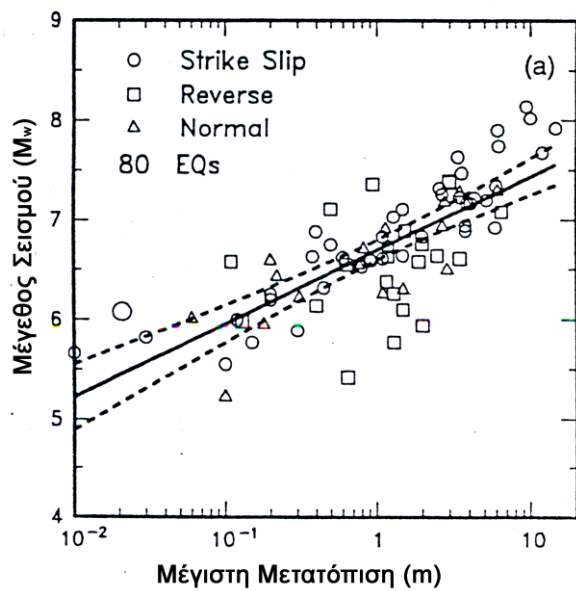
Είναι πολύ σημαντικό να μπορεί να υπολογισθεί η πιθανότητα να γίνει ένας σεισμός ακόμη και σε περιοχές όπου δεν έχουν καταγραφεί μεγάλα σεισμικά γεγονότα, εαν και είναι βέβαια αρκετά δύσκολο να υπολογισθούν τέτοιες ποσότητες. Τα αποτελέσματα της σεισμολογικής έρευνας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν κατασκευάζονται σημαντικά τεχνικά έργα (π.χ. σταθμοί πυρηνικής ενέργειας, φράγματα κ.λπ.), ειδικά όταν η εγκατάσταση τους μπορεί να αλλάξει την κατανομή των τάσεων στο φλοιό της Γης και να προκαλέσει τεκτονικές κινήσεις. Το αντικείμενο μιας μελέτης για να βρεθεί μια τέτοια σεισμοτεκτονική σχέση, περιέχει τον καθορισμό σχέσεων ανάμεσα στις παραμέτρους της σεισμικότητας (π.χ. μέγιστα μεγέθη σεισμών M_{max}) και στα γεωλογικά χαρακτηριστικά.

Για τον υπολογισμό του μέγιστου αναμενόμενου μεγέθους (M_{max}) ενός μελλοντικού σεισμικού γεγονότος, μιας κρίσιμης δηλαδή ποσότητας για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας, χρησιμοποιούνται, όπως προαναφέρθηκε, ορισμένες εμπειρικές σχέσεις, οι οποίες συνδέουν το μέγεθος ενός σεισμού με διάφορες παραμέτρους (π.χ. μήκος και πλάτος διάρρηξης, μέγιστη και μέση μετατόπιση,

εμβαδόν επιφάνειας διάρρηξης κ.ά.) της σεισμικής εστίας. Έτσι, βασικό ρόλο για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας παίζει η εκτίμηση του μεγέθους M_w (Μέγεθος Ροπής) και της μέγιστης κατακόρυφης μετατόπισης MD. Για τον καθορισμό τους έχουν μελετηθεί τα επιφανειακά μεγέθη σεισμών (M_s), η μέγιστη ένταση (I_{max}), το επιφανειακό μήκος διάρρηξης (SLR), η μέγιστη μετατόπιση (MD) και η μέση μετατόπιση (AD) και έχουν προκύψει εμπειρικές σχέσεις ανάλογα με τη μεθοδολογία που βασίζεται στην επιλογή των σεισμών, από τις οποίες οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες εμφανίζονται στον Πίνακα 2 και την Εικόνα 4). Παρά τις πολλαπλές έρευνες και την πρόοδο που έχει σημειωθεί στη συσχέτιση των παραπάνω μεγεθών και την συνακόλουθη εφαρμογή της στον αντισεισμικό σχεδιασμό, αναφορικά με το πλάτος της ζώνης των επιφανειακών διαρρήξεων δεν υπάρχουν αντίστοιχες εμπειρικές συσχετίσεις.

WC94	AJ98	PC04	P04
Wells & Coppersmith (1994)	Ambraseys & Jackson (1998)	Pavlidis & Caputo (2004)	Papazachos et al. (2004)
Κανονικά ρήγματα Παγκόσμια δεδομένα	Κανονικά ρήγματα Ανατολική Μεσόγειος	Κανονικά ρήγματα Ευρύτερη περιοχή Αιγαίου	Κανονικά ρήγματα Παγκόσμια δεδομένα
$M_w = 4.86 + 1.32 \log(SRL)$	$M_s = 5.13 + 1.14 \log(L)$	$M_s = 0.9 \log(SRL) + 5.48$	$\log(L) = 0.50M - 1.86$
$\log(MD) = -5.9 + 0.89 * M_w$		$M_s = 0.59 \log(MVD) + 6.75$	$\log MD = 0.72M - 2.82$
$\log(AD) = -4.45 + 0.63 * M_w$			
M _w = Μέγεθος ροπής			
SRL= Μήκος ρήματος			
MD= Μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση			
AD= Μέση κατακόρυφη μετατόπιση			

Εικόνα 2.1. Εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας όπως έχουν δοθεί από τέσσερες διαφορετικές ερευνητικές ομάδες



Εικόνα 2.2. Διαγράμματα εμπειρικών σχέσεων μεταξύ μεγέθους σεισμού (M_w), μήκους επιφανειακής διάρρηξης (SRL σε km) και μέγιστης μετατόπισης (MD σε m) για όλους τους τύπους των ρηγμάτων (Wells & Coppersmith 1994)

2.3 Σχετική νομοθεσία

Ανάλογη με τη νομοθεσία άλλων χωρών υπάρχει και για την Ελλάδα στον Νέο Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό ΕΑΚ-2000 (ΦΕΚ 2184B/20-12-1999) και στην τροποποίηση και συμπλήρωση του (ΦΕΚ781/18-6-2003) σε αντίστοιχο κεφάλαιο για την γειτνίαση ενεργών σεισμοτεκτονικών ρηγμάτων και τον καθορισμό ζωνών προστασίας για τις κατασκευές. Η νομοθεσία αυτή δεν είναι ιδιαίτερα σαφής για τον καθορισμό ζωνών αλλά επιβάλλει την σύνταξη ειδικής μελέτης ανάλογα με την περίπτωση επικινδυνότητας των ρηγμάτων.

ΕΑΚ 2000 - ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.1.2 - Γειτνίαση Ενεργών Σεισμοτεκτονικών Ρηγμάτων

[1] *Εν γένει δεν επιτρέπεται η δόμηση κτισμάτων σπουδαιότητας Σ2, Σ3 και Σ4 στην άμεση γειτονία σεισμοτεκτονικών ρηγμάτων που θεωρούνται σεισμικώς ενεργά. Όπου: Σ1 = Κτίρια μικρής σπουδαιότητας π.χ. αγροτικά οικήματα, Σ2 = Συνήθη κτίρια κατοικιών και βιομηχανιών, Σ3 = Εκπαιδευτικά κτίρια, δημόσια, κτίρια συναθροίσεων, κτίρια μεγάλης οικονομικής αξίας και Σ4 = Κτίρια ζωτικής σημασίας π.χ. νοσοκομεία, πυροσβεστικοί σταθμοί, έργα μοναδικής καλλιτεχνικής αξίας.*

[2] *Ο χαρακτηρισμός ρηγμάτων ως σεισμικώς ενεργών θα γίνεται με βάση σειсмоϊστορικά και σεισμοτεκτονικά δεδομένα και θα λαμβάνεται υπόψη και το πιθανό μέγεθος τυχόν σεισμικής διάρρηξης. Η επισήμανση και ο χαρακτηρισμός σεισμοτεκτονικών ρηγμάτων αποτελεί εν γένει αντικείμενο ειδικής μελέτης που αφορά στην ευρύτερη περιοχή οικοδόμησης και όχι σε μεμονωμένα κτίρια. Τέτοια διερεύνηση αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για την οικιστική ανάπτυξη μίας περιοχής και υπόκειται σε έλεγχο και έγκριση της πολιτείας. Διερεύνηση για ύπαρξη σεισμικώς ενεργών ρηγμάτων δεν απαιτείται εν γένει μέσα σε οικιστικά ανεπτυγμένες περιοχές, εκτός αν υφίστανται ισχυρές ενδείξεις περί του αντιθέτου, βασιζόμενες σε επίσημους γεωλογικούς - τεκτονικούς χάρτες.*

[3] *Σε περιπτώσεις στις οποίες συντρέχουν ειδικοί λόγοι δόμησης στην άμεση γειτονία σεισμοτεκτονικών ρηγμάτων που θεωρούνται σεισμικώς ενεργά, η δόμηση επιτρέπεται μόνον ύστερα από ειδική σεισμική - γεωλογική - γεωτεχνική - στατική μελέτη. Στην μελέτη αυτή θα διερευνώνται οι επιπτώσεις της γειτνίασης του*

ρήγματος και θα λαμβάνονται μέτρα για την αποτελεσματική αντιμετώπισή τους. Η σεισμική δράση σχεδιασμού στην άμεση γειτονία τέτοιων ρηγμάτων θα λαμβάνεται αυξημένη τουλάχιστον κατά 25% σε σχέση με την οριζόμενη στο κεφάλαιο 2.

Σχετικά με τα έργα που γίνονται στην Ελλάδα, τα ενεργά ρήγματα θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη στον αντισεισμικό σχεδιασμό, ακόμη και αν τα υπάρχοντα σεισμολογικά στοιχεία δείχνουν σαφώς χαμηλότερους δείκτες επικινδυνότητας και διάστημα επαναδραστηριοποίησης πολύ μεγαλύτερο από την αναμενόμενη διάρκεια ζωής των κατασκευών. Η διεθνής επιστημονική κοινότητα, όπως αναφέρθηκε, δέχεται σήμερα ότι είναι προτιμότερη και ασφαλέστερη η σωστή θεμελίωση σε περιοχές που γνωρίζουμε την ύπαρξη, τη γεωμετρία και τη σεισμική ιστορία των ρηγμάτων, ενώ αντίθετα είναι περισσότερο επικίνδυνο να σχεδιάζουμε κατασκευές σε περιοχές με ελλιπή γεωλογική και εδαφομηχανική γνώση ή ακόμη και σε θέσεις που θεωρούνται 'ασφαλείς' από σεισμοτεκτονική άποψη.

2.4 Διάδοση ενεργού ρήγματος δια μέσου εδαφικού επιφανειακού στρώματος

Ο κίνδυνος της επιφανειακής εκδήλωσης ενός μεγάλου σεισμικού ρήγματος στη θέση έδρασης μιας κατασκευής είναι ένας σημαντικός παράγοντας στη διαδικασία του αντισεισμικού ελέγχου. Πρόσφατες αναλυτικές μελέτες (Αναστασόπουλος 2005) έχουν δείξει ότι μια κατασκευή στην επιφάνεια αλληλεπιδρά με την παραμόρφωση του εδάφους και την επιφανειακή διάρρηξη του ρήγματος. Η παρουσία μιας κατασκευής μπορεί να οδηγήσει σε εκτροπή της κατεύθυνσης διάρρηξης, όπως η τελευταία διαδίδεται στην επιφάνεια του εδάφους, καθώς και σε αλλαγή του προφίλ μετατόπισης της επιφάνειας, που προκαλείται από την επικείμενη διάρρηξη ρήγματος. Αυτός ο διπλός μηχανισμός αλληλεπίδρασης, που ονομάζεται «Δομή Αλληλεπίδρασης Διάρρηξης Ρήγματος – Εδάφους – Θεμελίωσης – Ανωδομής» έχει μεγάλη σημασία για την εκτέλεση ενός έργου.

Το φαινόμενο της διάδοσης ρηγμάτων σε υπερκείμενα εδαφικά στρώματα παρουσιάζει μεγάλη πολυπλοκότητα λόγω του πλήθους των παραγόντων που το επηρεάζουν. Τέτοιες παράμετροι είναι η μη ομοιογένεια και η ανισοτροπία του

εδάφους. Διαστρώσεις αρκετά χαλαρότερων ή πυκνότερων αποθέσεων από το περιβάλλον έδαφος αλλοιώνουν σημαντικά τη μορφή της διάρρηξης. Ακόμη η σεισμική διέγερση που λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα με τη διάρρηξη και ο δυναμικός χαρακτήρας της κίνησης του υποβάθρου αλλάζουν τον τρόπο με τον οποίο ανταποκρίνεται η εδαφική στρώση.

Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι:

- ο τύπος του ρήγματος (κανονικό, ανάστροφο, οριζόντιας ολίσθησης)
- η κλίση του ρήγματος
- το βάθος και η γεωμετρία και της εδαφικής στρώσης
- οι ιδότητες των υπερκείμενων εδαφικών υλικών
- το μέγεθος της μετατόπισης
- το πλάτος της ζώνης παραμόρφωσης

Αν και σε κάθε σεισμικό γεγονός παρατηρούνται μια έως δυο κύριες αστοχίες, συχνά η εικόνα είναι πιο περίπλοκη αφού αρκετές δευτερεύουσες ασυνέχειες εκδηλώνονται μέσα σε μια ευρύτερη ζώνη διάτμησης γύρω από το ίχνος του κυρίου ρήγματος.

Όπως επισημαίνει ο Scott (1987), πολύ συχνά σε έρευνες πεδίου και γεωλογικές χαρτογραφήσεις που προηγούνται της κατασκευής πυρηνικών μονάδων παραγωγής ενέργειας, φραγμάτων, εγκαταστάσεων αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου, πλατφόρμων ανοιχτής θάλασσας καθώς και σε περιπτώσεις αγωγών μεταφοράς, πολύ συχνά συναντώνται γεωλογικά ρήγματα. Το ερώτημα που τίθεται με αυτές τις έρευνες είναι αρχικά το κατά πόσο τα ρήγματα αυτά είναι ενεργά, δηλαδή το ρυθμό μετακίνησης του σήμερα ή το πόσες φορές μετακινήθηκε τα τελευταία 10^4 ή 10^7 χρόνια, και στη συνέχεια θα πρέπει να υπολογιστούν η συχνότητα, το μέγεθος και η πιθανότητα μετακίνησης του τα επόμενα 50 με 100 χρόνια, ανάλογα με τη θεωρούμενη διάρκεια ζωής του έργου. Τέλος, ο μηχανικός που θα κληθεί να σχεδιάσει την κατασκευή θα πρέπει να λάβει υπόψη δυο πρόσθετα αίτια αστοχίας:

- τη δόνηση από τη θραύση του ρήγματος που θα είναι ενισχυμένη λόγω του φαινομένου της κατευθυντικότητας και

- το πεδίο των μόνιμων μετατοπίσεων που θα δημιουργηθεί γύρω από την θραύση ή την διαφορική μετακίνηση στην περίπτωση που η κατασκευή βρίσκεται ακριβώς πάνω στο επιφανειακό ίχνος του ρήγματος.

Σε ότι αφορά τη διάδοση της αστοχίας μέσα στο εδαφικό στρώμα, η μετατόπιση θα διαδοθεί καθ' ύψος και θα εμφανιστεί στην επιφάνεια σαν ένας αναβαθμός η σαν μικρορωγμές και αλλοιώσεις του ανάγλυφου, ακόμα και σε περιπτώσεις που το υπερκείμενο εδαφικό στρώμα έχει βάθος αρκετά χιλιόμετρα. Τέτοια περίπτωση εμφανίστηκε στο σεισμό της περιοχής Imperial Valley στην Καλιφόρνια, όπου οι αλλουβιακές αποθέσεις έφταναν σε βάθος τα 6km.

Υπάρχει όμως η πιθανότητα η επιφάνεια θραύσεως να εμφανίζεται να σταματάει σε κάποιο ύψος μέσα στο εδαφικό στρώμα χωρίς να υπάρχει καμία διαταραχή στην επιφάνεια. Σε αυτή την περίπτωση μπορούν να γίνουν δυο υποθέσεις:

α) ότι έχουμε ένα παλαιό ρήγμα που δεν είναι πλέον ενεργό. Δηλαδή το τμήμα του εδαφικού στρώματος στο οποίο δεν έχουμε αστοχία προήλθε από νεότερες αποθέσεις, αφότου το ρήγμα έπαψε να είναι ενεργό και δεν σημειώθηκαν νεότερες μετακινήσεις.

β) ότι πρόκειται για ενεργό ρήγμα, αλλά το μέγεθος της μετατόπισης στο βραχώδες υπόβαθρο δεν είναι ικανό, σε συνάρτηση με τα εδαφικά χαρακτηριστικά, ώστε να φτάσει η παραμόρφωση του υποβάθρου μέχρι την επιφάνεια («τυφλό ρήγμα»).

Είναι συνεπώς επισφαλής ο χαρακτηρισμός ρηγμάτων ως μη ενεργών, αν βασίζεται μόνο στην παρατήρηση αποτελεσμάτων γεωτρήσεων ή γεωφυσικών μεθόδων που δείχνουν ότι το ρήγμα σταματάει σε κάποιο ύψος μέσα στο εδαφικό στρώμα.

Πρώτοι οι Duncan and Lefebvre (1973) εφάρμοσαν πεπερασμένα στοιχεία για να προσδιορίσουν της αναπτυσσόμενες τάσεις στην έδραση μιας κατασκευής που βρίσκεται στην γειτονία ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης, λόγω μετακίνησης αυτού. Τα αποτελέσματα έδειξαν σχηματισμό ζωνών παθητικών και ενεργητικών τάσεων με διεύθυνση σχεδόν 45° σε σχέση με την διεύθυνση κίνησης των τεμαχών. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν ποιοτικά με αντίστοιχα που προέκυψαν από υπό κλίμακα εργαστηριακά μοντέλα.

Οι Scott and Schoustra (1974) ανέλυσαν το πρόβλημα, όπου ένα στρώμα αλουβιακών αποθέσεων πάχους 800m υπέρκειται βραχώδους υποβάθρου με κατακόρυφο ενεργό ρήγμα. Οι Roth et al. (1981) εκτέλεσαν πειράματα σε στρώση αλουβιακών αποθέσεων πάχους 6m υπερκείμενης ανάστροφου ρήγματος.

Οι Walters and Thomas (1982) απέδειξαν ότι το χαρακτηριστικό της χαλάρωσης του εδάφους σε συνάρτηση της παραμόρφωσης ήταν κρίσιμο για τον εντοπισμό και την γεωμετρία της επιφάνειας αστοχίας. Όμως οι αναλύσεις δεν μπορούσαν να προβλέψουν ικανοποιητικά την μετατόπιση του υπεδάφους που απαιτείται για την διάδοση του ρήγματος μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια.

Οι Cole and Lade (1984) ερεύνησαν τον καθορισμό της θέσης και γεωμετρίας της επιφάνειας θραύσεως και το εύρος της επηρεαζόμενης ζώνης σε αλούβια, υπερκείμενα ρήγματος κατακόρυφης μετατόπισης. Ο Scott (1987), που πραγματεύθηκε διάφορα είδη εδαφικών αστοχιών και τους τρόπους προσομοίωσης τους σε υπολογιστή, αφιέρωσε ένα τμήμα του στα γεωλογικά ρήγματα και τη σχέση τους με τις υπερκείμενες κατασκευές.

Οι Bray et al. (1994) ασχολήθηκαν με το πρόβλημα της διάδοσης ρήγματος σε συνεκτικά υλικά, εκτελώντας αριθμητικές αναλύσεις με χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων.

3 ΕΙΔΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΣΤΑ ΡΗΓΜΑΤΑ

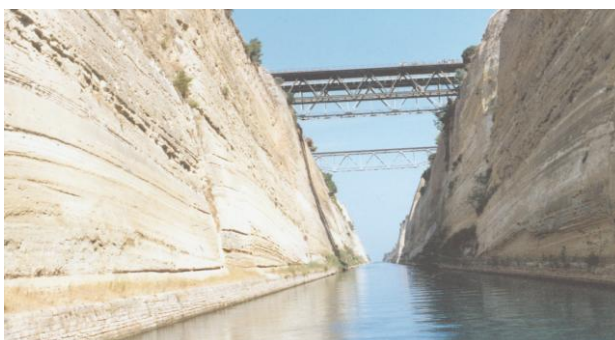
3.1 Εφελκυστικές δομές

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφούν οι κύριες μορφές νεοτεκτονικών ρηγμάτων, των πρόσφατων δηλαδή σε γεωλογικό χρόνο ρηγμάτων, τα οποία και μας ενδιαφέρουν από την άποψη της ανάδρασης και της συνακόλουθης σεισμικής επικινδυνότητας. Τα περισσότερα από τα παρατηρούμενα νεοτεκτονικά-σεισμογενετικά ρήγματα στη χώρα μας είναι εφελκυστικές δομές, αλλά ισχυροί σεισμοί συνδέονται επίσης με συμπιεστικές τάσεις και με ρήγματα, κυρίως, οριζόντιας ολίσθησης.

Μια χαρακτηριστική εικόνα μεγάλου κανονικού ρήματος αποτελεί το ενεργό ρήγμα της Αρκίτσας (εικόνα 3.1), ενώ ένα πλήθος μικρών κανονικών ρηγμάτων εμφανίζεται κατά μήκος του ισθμού της Κορίνθου (εικόνα 3.2).

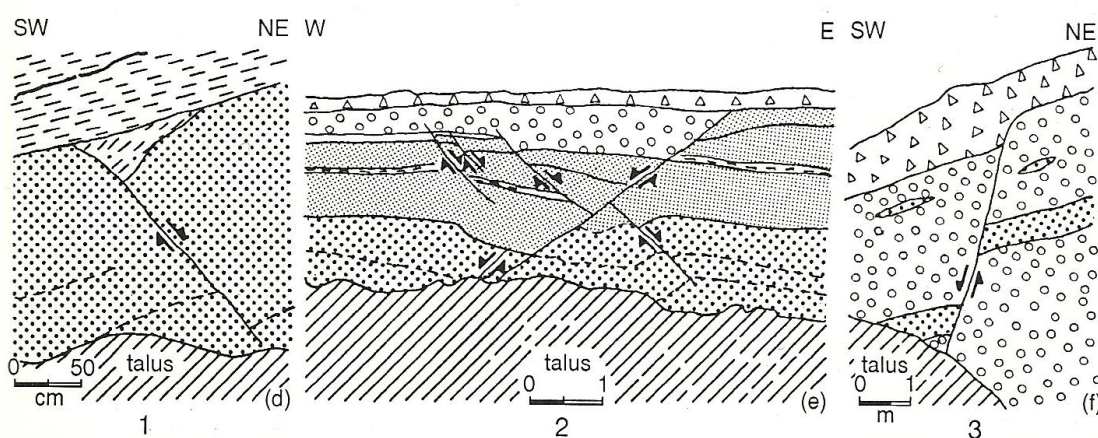


Εικόνα 3.1. Η κατοπτρική επιφάνεια του ρήματος της Αρκίτσας



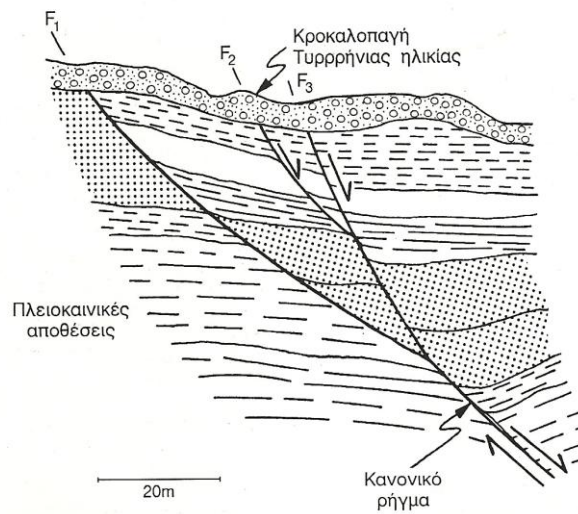
Εικόνα 3.2. Άποψη των κανονικών ρηγμάτων στον Ισθμό της Κορίνθου

Η γνώση της ηλικίας των γεωλογικών σχηματισμών είναι καθοριστικός παράγοντας για τον χαρακτηρισμό της ενεργότητας ενός ρήγματος. Σαν παράδειγμα δίνεται η εικόνα 3.3, όπου διακρίνονται μικρά κανονικά ρήγματα σε στρώματα άνω μειοκαινικής ηλικίας, τα οποία πληρούν ένα τεκτονικό βύθισμα. Ειδικότερα, στην εικόνα 3.3.1 το μικρό κανονικό ρήγμα εμφανίζεται μόνο στο στρώμα της αργίλου και αφήνει ανεπηρέαστη την υπερκείμενη μάργα, άρα συνέβη πριν από την απόθεση της. Και επειδή άργιλος και μάργα βρίσκονται σε συμφωνία, δηλαδή η ιζηματογένεση ήταν συνεχής, συμπεραίνεται ότι πρόκειται για συνιζηματογενές ρήγμα που δημιουργήθηκε στη διάρκεια απόθεσης της αργίλου. Στην εικόνα 3.3.2 φαίνεται μια ομάδα δύο συστημάτων συζυγών μικρορηγμάτων που επηρεάζει το σύνολο σχεδόν των ιζηματογενών στρωμάτων, εκτός από τις επιφανειακές αλλουβιακές αποθέσεις. Στην εικόνα 3.3.3 φαίνεται ένα κανονικό ρήγμα, που κόβει μειοπλειοκαινικά κροκαλοπαγή και άμμους και δημιουργεί μια μικρή αναβαθμίδα στη κορυφή του, η οποία καλύπτεται από ανωτεταρτογενή ιζήματα.



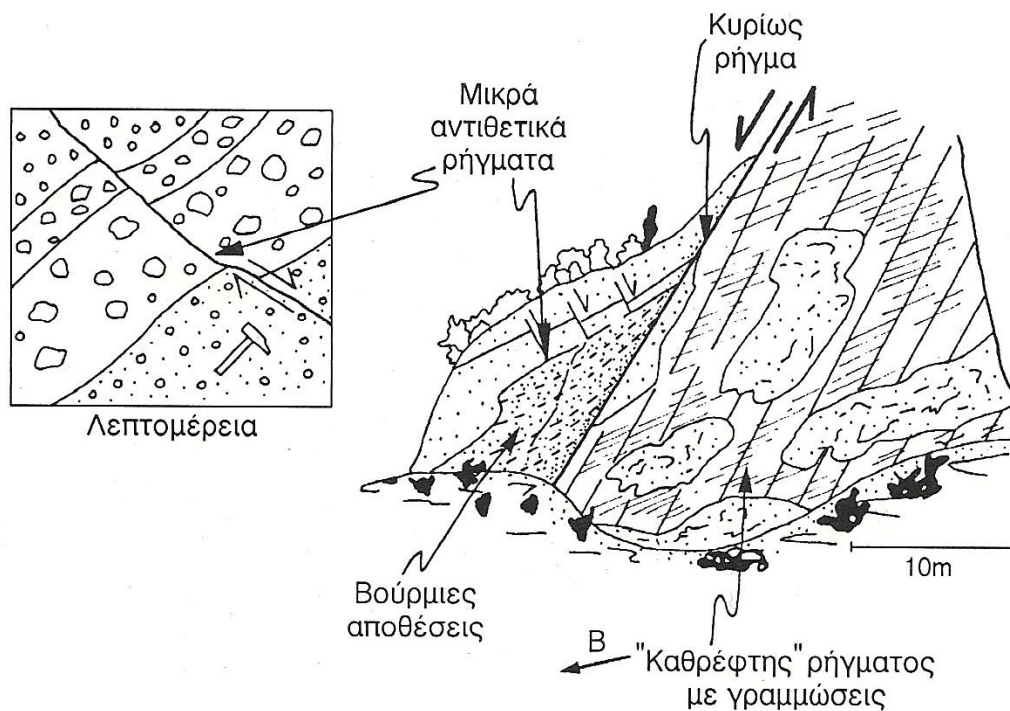
Εικόνα 3.3. Νεοτεκτονικά κανονικά μικρορήγματα που επηρεάζουν πρόσφατους ιζηματογενείς σχηματισμούς (αργίλους, μάργες, άμμους, αλλουβιακές αποθέσεις) μιας νεογενούς λεκάνης στη Β. Τουρκία (κατά Hancock & Barka 1981).

Όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εικόνες, τα ρήγματα δεν εμφανίζονται μεμονωμένα, αλλά σε ζώνες παράλληλων ή διακλαδιζόμενων ρηγμάτων. Συμβαίνει επίσης ένα ρήγμα στο βάθος να συνδέεται με μικρότερα ρήγματα προς την επιφάνεια του εδάφους (εικόνα 3.4), οπότε αυξάνεται και η αβεβαιότητα ως προς το που θα εμφανιστούν οι εδαφικές ρωγμές σε περίπτωση ανάδρασής του.



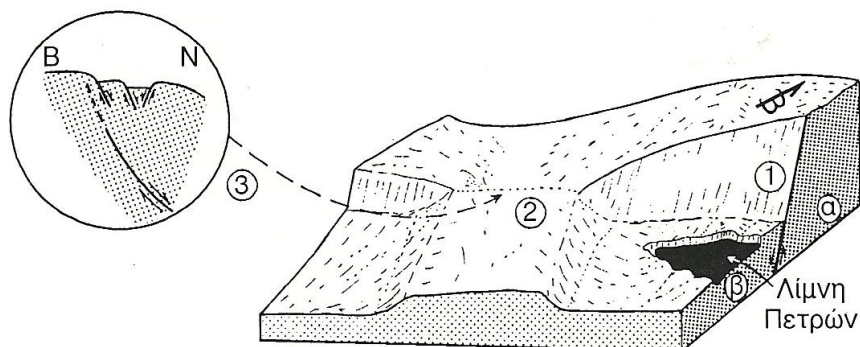
Εικόνα 3.4. Απλή εφελκυστική νεοτεκτονική δομή στη περιοχή της Ιεράπετρας Κρήτης. Το κανονικό ρήγμα επηρεάζει μόνο τους πλειοκαινικούς σχηματισμούς, ενώ αφήνει ανέπαφο το υπερκείμενο ανωπλειστοκαινικό στρώμα. (από Mercier 1976)

Αντιστοίχως μεγαλύτερος προβληματισμός υπάρχει και στις περιπτώσεις των μεγάλων κανονικών ρηγμάτων, που συνοδεύονται από μικρότερα αντιθετικά ρήγματα. Ακόμη και αν το μεγάλο ρήγμα αναδράσει με μικρό πλάτος ζώνης, τα αντιθετικά ρήγματα μπορούν επίσης να αναδράσουν δευτερογενώς και να δώσουν επιφανειακές μετατοπίσεις. Στην εικόνα 3.5 παριστάνεται η κατοπτρική επιφάνεια ενός κανονικού ρήματος, πλειοτεταρτογενούς ηλικίας, όπου έχει αποτυπωθεί και η σχετική κίνηση των δύο τεμαχών με γραμμώσεις και αυλακώσεις τεκτονικής προέλευσης. Ιδιαίτερης σημασίας αποτελεί το γεγονός ότι τα μικρά αντιθετικά ρήγματα που παρατηρούνται στους κώνους κορημάτων πιστοποιούν την πολύ πρόσφατη, ίσως και ενεργή δράση του ρήματος.



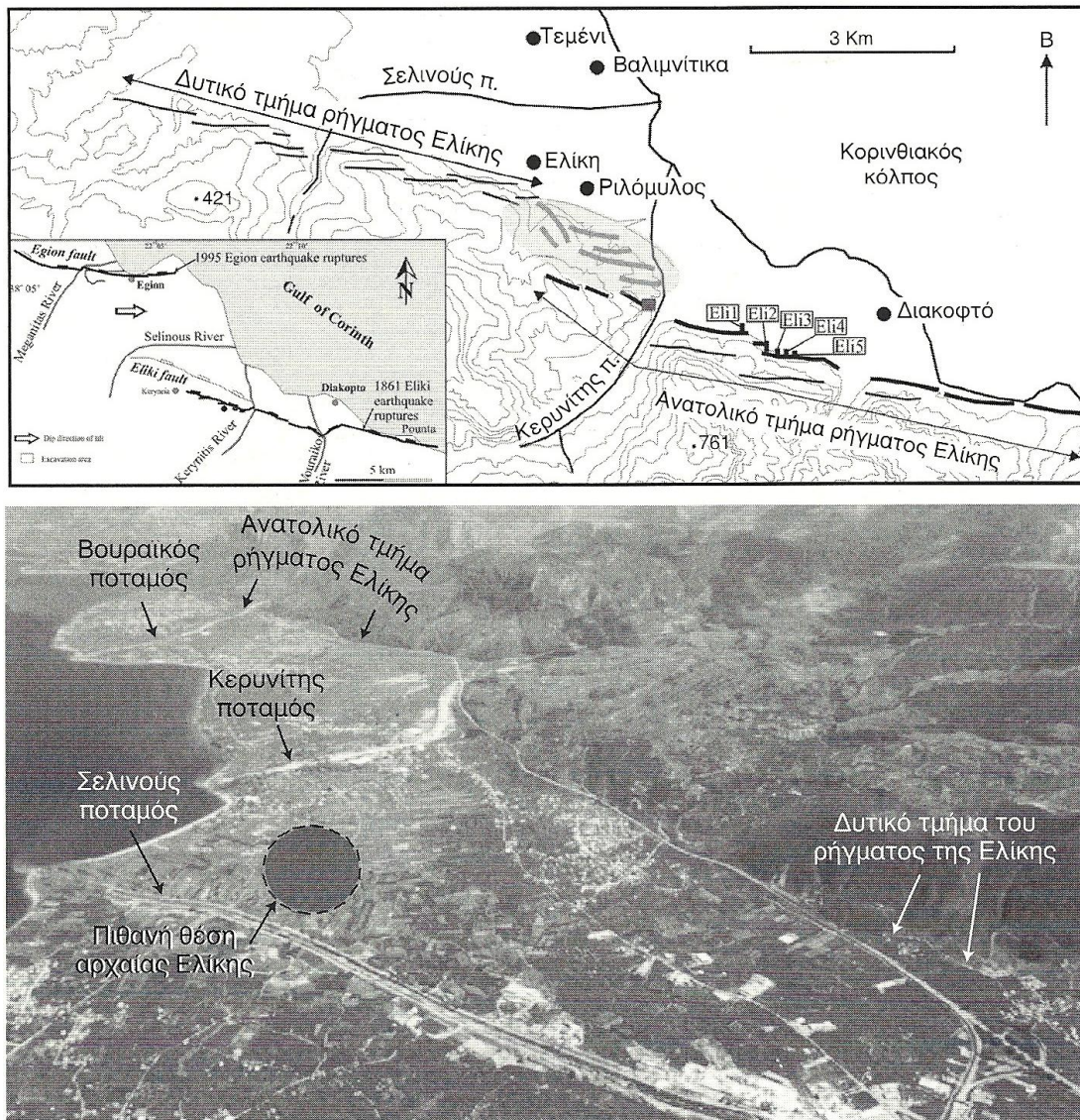
Σχήμα 3.5. Σκαρίφημα που δείχνει τη δράση κανονικού ρήγματος. Δεξιά, η κατοπτρική επιφάνεια του ρήγματος, και αριστερά στο πλαίσιο φαίνεται σε λεπτομέρεια τμήμα των πλευρικών κορημάτων, που καλύπτουν το κυρίως ρήγμα, και «κόβονται» από μικρά κανονικά ρήγματα. (Περιοχή Λοκρίδας, από Pegoraro 1972)

Όταν ένα ρήγμα δεν εμφανίζεται επειφανειακά σε ορισμένα τμήματα της ρηξιγενούς ζώνης, τότε αναζητούνται ενδείξεις της συνέχειας τους στις πρόσφατες - επιφανειακές αποθέσεις, που συνήθως καλύπτουν τέτοιες θέσεις των ρηγμάτων. Τα μικρής κλίμακας τεκτονικά φαινόμενα, όπως μικρορήγματα στην ίδια διεύθυνση με το κύριο ρήγμα, βυθίσματα κ.α, που εκδηλώνονται επειφανειακά κατά μήκος της νοητής γραμμής του ρήγματος, τεκμηριώνουν την συνέχεια του ρήγματος στους νεότερους σχηματισμούς και την πιθανή υπόγεια δράση του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί εκείνο της εικόνας 3.6.



Εικόνα 3.6. Σχηματικό τρισδιάστατο σκαρίφημα παραδείγματος μη ορατής δράσης ρήγματος στην περιοχή της λεκάνης Αμυνταίου-Φλώρινας. Διακρίνονται η μεγάλη ρηξιγενής επιφάνεια (1) και η περιοχή (2), όπου δεν παρατηρούνται επιφανειακές εκδηλώσεις του ρήγματος. Στην τομή 3 παριστάνονται τα μικρής κλίμακας τεκτονικά φαινόμενα που παρατηρούνται στα ιζήματα της περιοχής (με τα οποία τεκμηριώνεται η υπόγεια δράση του κύριου ρήγματος. (από Παυλίδη 1985)

Μια ολοκληρωμένη μελέτη ενός νεοτεκτονικού ρήγματος αφορά τέλος τη χρονολόγηση των παλαιοσεισμικών γεγονότων, η οποία γίνεται με διάφορες μεθόδους χρονολόγησης τεταρτογενών υλικών. Στη συνέχεια δίνεται ένα παράδειγμα αναγνώρισης παλαιοσεισμικών γεγονότων με γεωλογικά κριτήρια από τον Ελληνικό χώρο, που αφορά στις παλαιοσεισμικές τομές που διανοίχτηκαν κάθετα στο ίχνος του ρήγματος της Ελίκης (Koukoubelas et al., 2001, Παυλίδης κ.α., 2001), (Εικόνα 3.8)

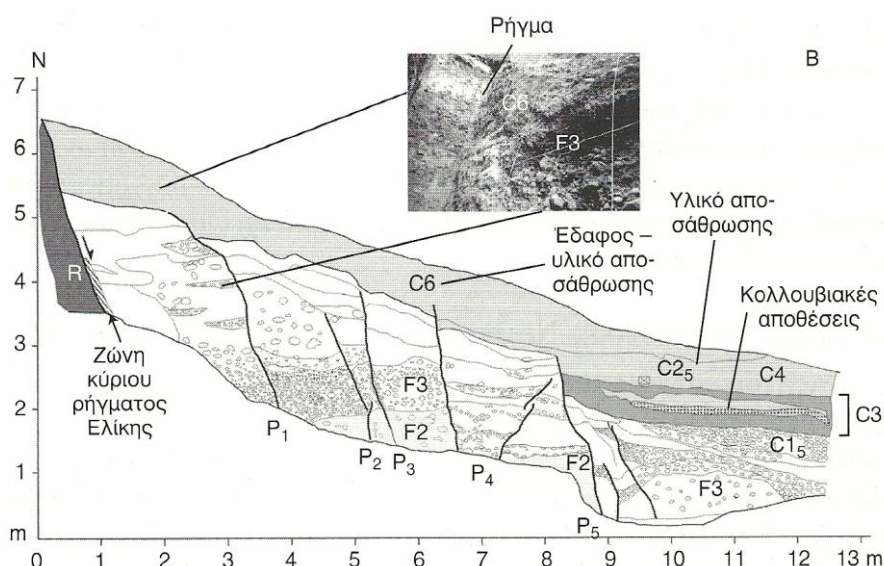


Εικόνα 3.8 Φωτογραφία από ελικόπτερο (κάτω) και τοπογραφικό σκαρίφημα (πάνω) του ρήγματος της Ελίκης, όπου φαίνονται τα δύο κύρια τμήματα του (segments): Ανατολικό και δυτικό και οι θέσεις των παλαιοσεισμολογικών εκσαφών (ELI-1 έως ELI-5) (από Pavlides et al., 2003)

Στις τομές αναγνωρίστηκαν τέσσερις διακριτοί στρωματογραφικοί ορίζοντες, που είναι οι ακόλουθοι επό τον κατώτερο προς τον ανώτερο:

- Χερσογενείς ερυθρόχρωμοι ποτάμια προέλευσης σχηματισμοί. Τα στρώματα αυτά εκτιμάται ότι έχουν μέγιστο πάχος 3m. Στο στρώμα περιέχονται κυρίως ασβεστολιθικές κροκάλες και στο ανώτερο τμήμα του εμφανίζονται ασβεστιτικά συγκρίματα υποδηλώνοντας εδαφογένεση.

- Ποτάμιες αποθέσεις. Περιλαμβάνουν κροκαλοπαγή με μέγεθος μεγάλου άξονα κροκάλων απο 7-25cm, που εμφανίζονται σε όλες τις τομές. Το μέγιστο πάχος του σχηματισμού είναι 2.5m (εικόνα 3.9).
- Κολλουβιακές αποθέσεις. Περιλαμβάνουν κόκκινου ή καφέ χρώματος πολύμεικτες αποθέσεις που εσωτερικά διαφοροποιούνται ανάλογα με το βαθμό εδαφογένεσης. Το μέγιστο πάχος των στρωμάτων, αν και ποικίλει, είναι περίπου 2m. Στις κολλουβιακές αποθέσεις συχνή είναι η παρεμβολή παλαιοεφαφικών οριζόντων που αντιστοιχούν σε περιόδους τεκτονικής ησυχίας (εικόνα 3.9).
- Αποθέσεις λασποροών. Περιλαμβάνουν κροκαλοπαγή κίτρινου χρώματος σε φακούς μέγιστου πάχους 1m. Οι αποθέσεις αυτές έχουν πλευρική σχέση με τις κολλουβιακές αποθέσεις.



Εικόνα 3.9 Παλαιοσεισμολογική τομή χαρτογραφημένη αρχικά σε κλίμακα 1:20. Διακρίνονται τα ποταχειμμάρια στρώματα που επηρεάζουν από μια σειρά ρήγματος (P1-P5) και τα υπερκείμενα χερσαία (C3, C4, C6). Το υλικό αποσάθρωσης (στρώματα C3, C4, C5) χρονολογήθηκαν με C^{14} σε ηλικίες που αντιστοιχούν στον $16^0 - 18^0$ αιώνα

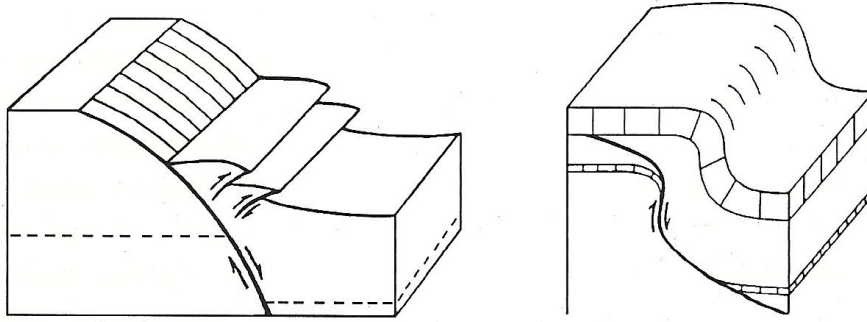
Στη πρώτη εκσκαφή ένας κλάδος του ρήγματος επηρεάζει το σύνολο σχεδόν των στρωμάτων μέχρι και το παλαιοέδαφος ηλικίας 750 περίπου ετών (C^{14}) με μέγιστο άλμα στους ανώτερους οριζόντες 0.93m. Ανεπηρέαστος παραμένει μόνο ο πολύ πρόσφατος εδαφικός μανδύας (κολλουβιακές αποθέσεις και σύγχρονο έδαφος) πάχους 0.30 – 0.80m, ο οποίος συμμετέχει επειφανειακά στη διαμόρφωση του

τεκτονικού πρηνούς. Συνδέεται με το μεγάλο σεισμό του 1861. Ένας δεύτερος παράλληλος κλάδος με κατακόρυφο άλμα 1.37m διακόπτει ενδιάμεσους στρωματογραφικούς ορίζοντες και είναι υπεύθυνος για την δημιουργία δύο μικρών κολλουβιακών σφηνών, στο κατερχόμενο τέμαχος. Πιθανώς να συνδέεται επίσης με συνσεισμική μετατόπιση πριν το μεγάλο σεισμό του 1861. Το τρίτο ρήγμα που επηρεάζει βαθύτερα στρώματα, ηλικίας μετά-ελληνιστικής έως πρώιμης ρωμαϊκής εποχής, με βάση τον προσδιορισμό θραυσμάτων κεραμικών και με κατακόρυφη μετατόπιση 0.44m, συνδέεται με θαμμένο παλαιοπρανές και κολλουβιακή σφήνα.

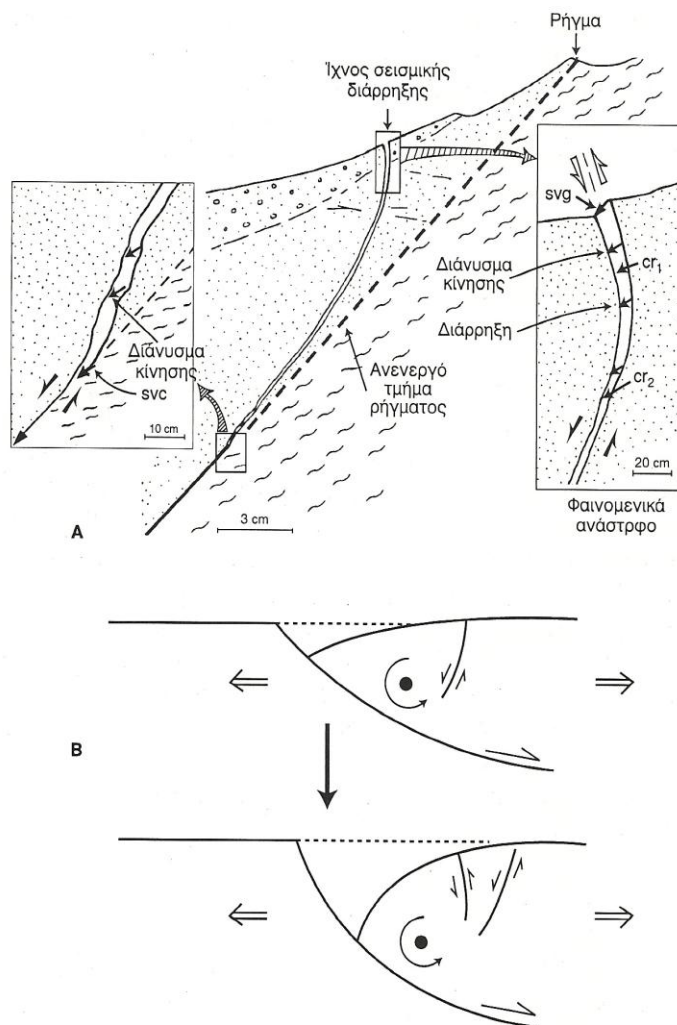
Τρία ρήγματα (1,2,3) ή κλάδοι ρηγμάτων εμφανίζονται στη τομή του σχήματος 3.9, οι οποίοι μετατοπίζουν τις ποτάμιες και τις κολλουβιακές αποθέσεις. Όλα τα ρήγματα κλίνουν προς τα βόρεια και η μέση κλίση τους είναι μεγαλύτερη των 60°. Με βάση τις μετατοπίσεις των κολλουβιακών αποθέσεων τα ρήγματα 2 και 3 έχουν μετατοπίσεις 0.75 και 0.30m αντίστοιχα. Το περιθωριακό κύριο ρήγμα μεταξύ υποβάθρου και σύγχρονων αποθέσεων στο νοτιότερο άκρο της τομής εκτιμάται ότι έχει μετατόπιση που υπερβαίνει τα 4m.

3.2 Συμπιεστικές δομές

Στις νεοτεκτονικές και παλαιοσεισμολογικές έρευνες, κυρίως σε πρόσφατα μεταλλικά και ιδιαίτερα σε ολοκαινικά ιζήματα, εξετάζονται και αναλύονται επίσης δομές, που οφείλονται σε συμπιεστικά φαινόμενα (ανάστροφα ρήγματα, μικροπτυχές κτλ.). Πολλές φορές χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, επειδή έχουν παρατηρηθεί συμπιεστικά φαινόμενα μικρής έκτασης που ουσιαστικά οφείλονται σε εφελκυστικό πεδίο των τάσεων. Ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι επιφανειακές διαρρήξεις του σεισμού της Θεσσαλονίκης του 1978 (εικόνες 3.10 και 3.11).

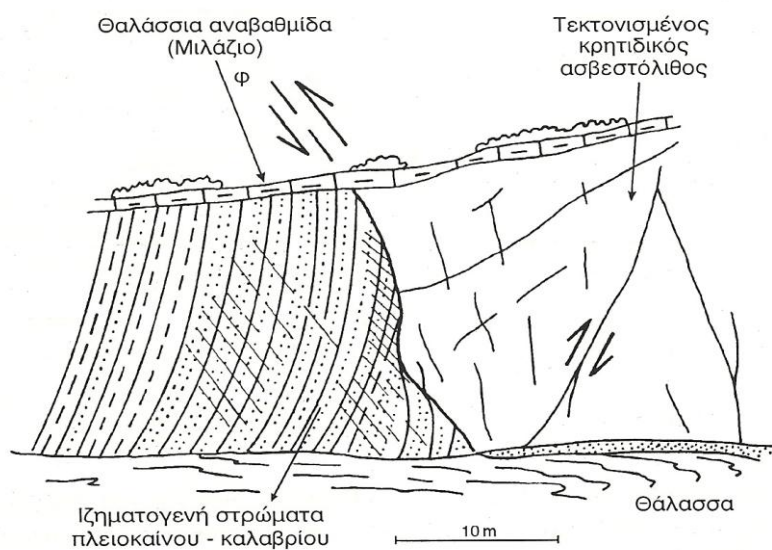


Εικόνα 3.10 Παραδείγματα ανάστροφων ρηγμάτων (μικροδομών) που οφείλονται στη δράση αντίστοιχων κανονικών ρηγμάτων (μεγαδομών) (από Mattauer 1973)



Εικόνα 3.11. Α) Ψευδοανάστροφη σεισμική διάρρηξη στα χαλαρά ιζήματα της περιοχής Νικομηδινού Μυγδονίας, λόγω της δράσης του κανονικού ρήγματος του σεισμού του 1978 (από Mercier et al., 1983). Β) Ψευδοανάστροφο ρήγμα λόγω εξελικτικής περιστροφής του πάνω (κατερχόμενου) τεμάχους κανονικού ρήγματος καμπυλότητας (listric fault), όπου η περιστροφή του μικρού ρήγματος έχει προχωρήσει τόσο ώστε να φαίνεται σαν ανάστροφο.

Στην εικόνα 3.12 εμφανίζεται μια περίπτωση γνήσιων ανάστροφων ρηγμάτων απο την Κεφαλονιά. Ο ασβεστόλιθος κρητιδικής ηλικίας, ο οποίος είναι έντονα τεκτονισμένος, διασχίζεται από μικρά ανάστροφα ρήγματα και κυρίως βρίσκεται με ανάστροφη κίνηση επάνω σε πλειοπλειστοκαινικά θαλάσσια ιζήματα. Το τεκτονικό αυτό επεισόδιο είναι καλυμμένο και «σφραγίζεται» από λεπτό στρώμα θαλάσσιου ιζήματος, το οποίο μένει όμως ανεπηρέαστο.

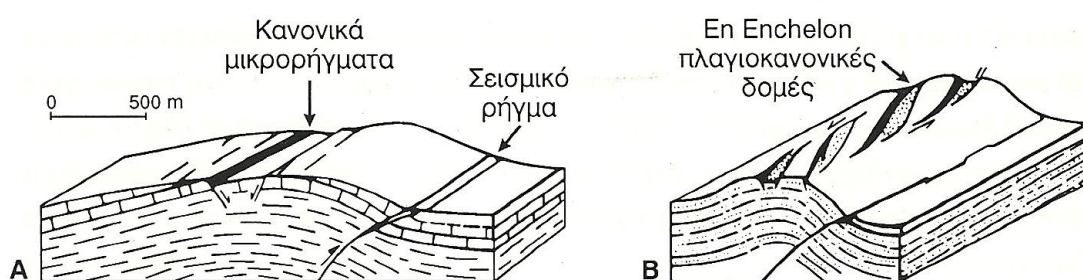


Εικόνα 3.12 Απλό ανάστροφο ρήγμα μεταξύ πλειοπλειστοκαινικών ιζημάτων και κρητιδικού ασβεστόλιθου στο Αργοστόλι (η σχετική κίνηση σημειώνεται με βέλη) (από Sorel 1976)

Η παραμόρφωση σε συμπιεστικό τεκτονικό περιβάλλον περιλαμβάνει ταυτόχρονα οριζόντιες και κατακόρυφες αλλαγές στην επιφάνεια της γης. Οι νεοτεκτονικές παραμορφώσεις ή αντίστοιχες παραμορφώσεις μετά από μεγάλους σεισμούς, είναι της τάξης από ορισμένα εκατοστά έως και πολλά μέτρα. Στον ελλαδικό χώρο ανάστροφα πρόσφατα ρήγματα παρατηρούνται κυρίως κοντά στα όρια του τόξου, στη δυτική Ελλάδα, ενώ αντίθετα πολύ μεγάλα ανάστροφα ρήγματα παρατηρούνται σε άλλες σεισμογενείς περιοχές της Γης.

Ένα αξιόλογο παράδειγμα ανάστροφου σεισμικού ρήγματος αποτελεί το ρήγμα του El Asnam της Αλγερίας, που συνδέεται με το σεισμό μεγέθους $M_s=7.4$ του 1980. Η αρχική επιφανειακή παρατήρηση των συνσεισμικών διαρρήξεων αφορούσε τα

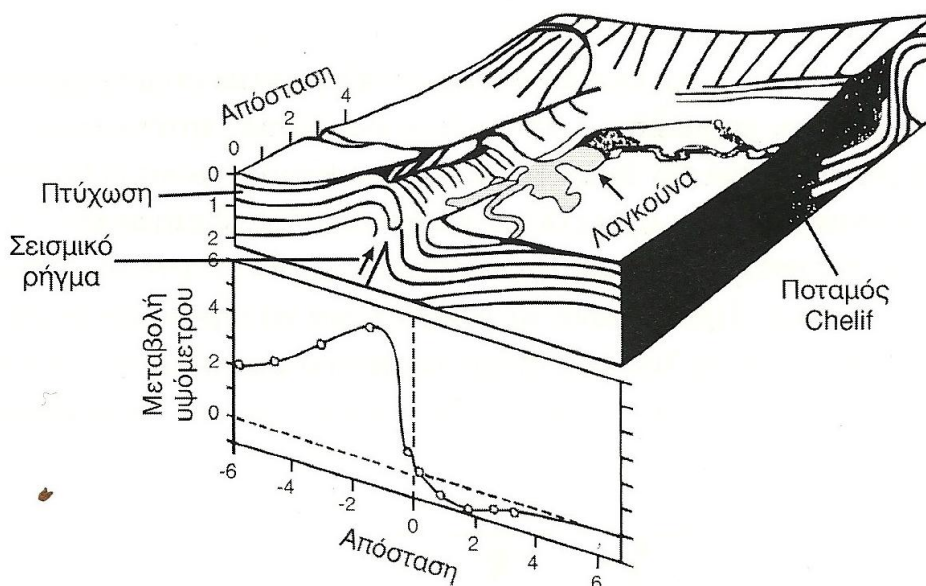
μικρά κανονικά ρήγματα (Εικόνα 3.13), που είχαν δημιουργηθεί από την "πτύχωση" και τη θραύση των στρωμάτων κατά την κίνηση του ανάστροφου ρήγματος. Τα κανονικά αυτά τα ρήγματα εμφανίζονται στην επιφάνεια και είναι σχετικά μικρές δομές. Μικρά τεκτονικά βυθίσματα που δημιουργούνται από τα κανονικά ρήγματα εμφανίζονται με δύο μορφές: στη μια περίπτωση είναι παράλληλα ως προς τον άξονα του αντικλίνου και τη γραμμή της επώθησης (Εικόνα 3.13α) και την άλλη εμφανίζονται με γωνία ως προς αυτά που πιθανόν δείχνει ότι η κίνηση του ανάστροφου ρήγματος συνοδεύεται από μια αριστερόστροφη συνιστώσα (Εικόνα 3.13β). Τα μικρά αυτά δευτερογενή ρήγματα που βρίσκονται στην κορυφή των πτυχών εμφανίζονται σε πολλούς σεισμούς οι οποίοι συνδέονται με ανάστροφα ρήγματα. Πρόκειται για σχετικά ασήμαντα ρήγματα, που αποτελούν μέρος της παραμόρφωσης του κύριου ρήγματος, το οποίο προκαλεί το σεισμό. Αποτελούν όμως μαρτυρίες παλαιών σεισμών, που μπορούν να χρονολογηθούν εφαρμόζοντας μεθόδους ραδιοχρονολόγησης στα γειτονικά ιζήματα.



Εικόνα 3.13. Δευτερογενή κανονικά ρήγματα που συνόδευαν τις κινήσεις του κύριου ανάστροφου ρήγματος (κορυφή της πτύχωσης) στο El Asnam, Αλγερία 1980 (Philip & Magraoui 1983)

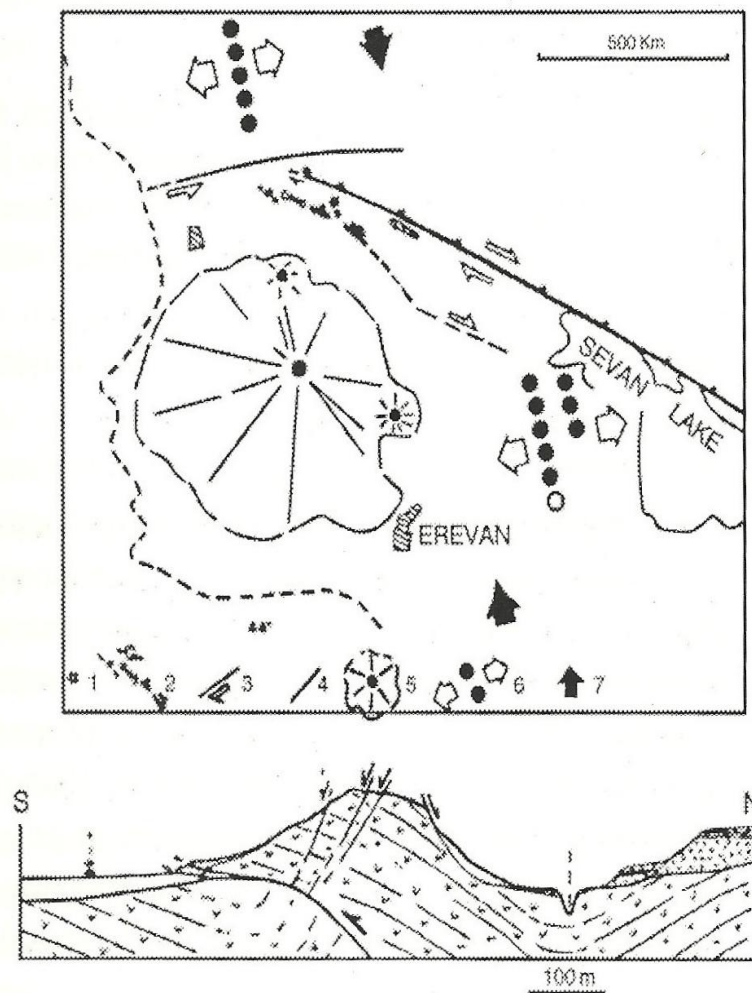
Η εστία του σεισμού του El Asnam προσδιορίστηκε σε βάθος 7- 10km. Η αιτία του σεισμού ήταν η ολίσθηση (3-6 m) στο ανάστροφο ρήγμα, του οποίου το κεντρικό τμήμα φτάνει μέχρι την επιφάνεια και ήταν γνωστό από γεωλογική χαρτογράφηση. Συστηματικές γεωλογικές παρατηρήσεις έδειξαν ότι ένα αντίκλινο, το οποίο συνδέεται με το ρήγμα, μπορεί κατά τη διάρκεια ενός σεισμού να ανυψωθεί μέχρι και 5m και η κοιλάδα να καμφθεί προς τα πάνω μέχρι 1 m. Το ίδιο συνέβη και στο El Asnam. Ο ποταμός Shelif που έρεε διαμέσου μιας χαράδρας, η οποία είχε σχηματιστεί με την κίνηση του ρήγματος και την ανύψωση της κοιλάδας,

φράχθηκε από προσχώσεις μετά το σεισμό λόγω ανύψωσης. Λίγες μέρες μετά το σεισμό ο ποταμός χυνόταν μέσα σε μια λίμνη που σχηματίστηκε λόγω της συνσεισμικής ανύψωσης (Εικόνα 3.14). Πριν ακόμα το ποτάμι κόψει την πτυχή, είχε συγκεντρωθεί στη λίμνη άργιλος πάχους 40cm, γεγονός που σημαίνει ότι η πτυχή σχηματιζόταν ταυτόχρονα με την ανύψωση της κοιλάδας.



Εικόνα 3.14. Τρισδιάστατο σχήμα που δείχνει τη ανύψωση της περιοχής El Asnam (γεωδαιτικά δεδομένα στην καμπύλη κάτω) με την κίνηση του ανάστροφο ρήγματος και τη δημιουργία εποχιακής λίμνης, λόγω της δημιουργίας συνσεισμικού «φράγματος» (Philip & Magraoui 1983, Yeats 1989)

Ένας άλλος καταστροφικός σεισμός, με επιφανειακό μέγεθος $M_s=6,8$, που συνδέεται με αναστροφο ρήγμα και πτυχή είναι εκείνος που έγινε στο Spitak της Αρμενίας το 1988 και είχε τουλάχιστον 25.000 θύματα (Εικόνα 3.15). Η περιοχή, που χαρακτηρίζεται από πολύ έντονες συμπιεστικές τάσεις, είναι μια από τις περισσότερο ενεργές σεισμικά περιοχές του κόσμου. Η κύρια δόνηση ήταν αποτέλεσμα της ολίσθησης σε ένα ανάστροφο ρήγμα, που δημιουργεί πάνω του μια αντικλινική δομή. Η επιφανειακή διάρρηξη αναπτύχθηκε επιφανειακά σε μήκος μόνο 8-10km, ενώ οι μετασεισμοί κατανέμονταν σε μια ζώνη μήκους 50km. Τα περισσότερα από αυτά τα ρήγματα δεν έχουν σημαντική επιφανειακή εμφάνιση, γεγονός που είχε σαν αποτέλεσμα λίγες μόνο σεισμογόνες διαρρήξεις να φθάσουν μέχρι την επιφάνεια.

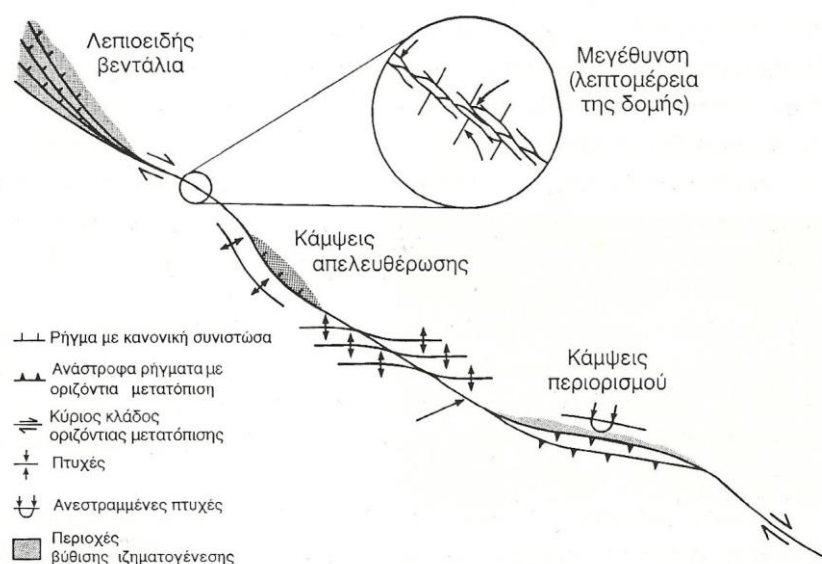


Εικόνα 3.15. Χάρτης και τομή των σεισμικών ρηγμάτων του σεισμού Spitak Αρμενίας

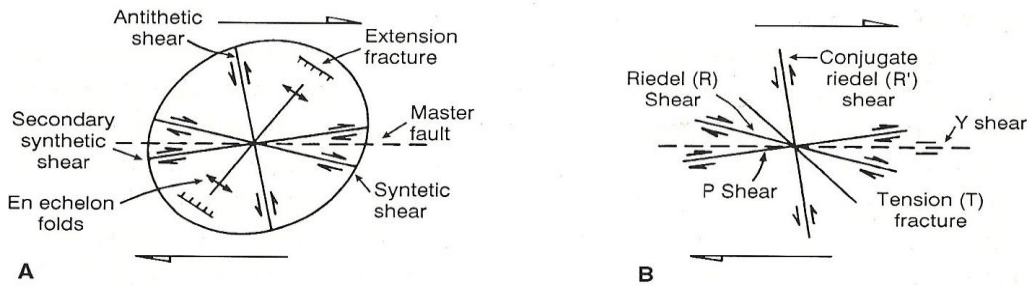
1-Επίκεντρο, 2-Ρήγματα (ανάστροφα, πλαγιοανάστροφα και οριζόντιας ολίσθησης). 3-Το κύριο αριστερόστροφο ρήγμα. 4-Κύρια ανάστροφα ρήγματα. 5-Ηφαιστεια, 6-Ηφαιστειακά κέντρα και τοπικό εφελκυστικό πεδίο. 7-Το κύριο συμπιεστικό πεδίο των τάσεων (από Philip et. al. 1992)

3.3 Τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και οι δομές τους

Τα ρήγματα της κατηγορίας αυτής προκαλούν οριζόντια μετατόπιση των γεωλογικών σχηματισμών που βρίσκονται εκατέρωθεν της ρηξιγενούς επιφάνειας, και έχουν μεγάλη σημασία, τόσο γιατί παρουσιάζουν μια ενδιαφέρουσα, από μηχανική και γεωλογική άποψη, γεωμετρική και αρχιτεκτονική διαταξη (εικόνες 3.15 και 3.16), όσο και επειδή παίζουν έναν ιδιαίτερο γεωδυναμικό ρόλο σε τοπική αλλά και παγκόσμια διάσταση. Οι περισσότεροι και ισχυρότεροι σεισμοί, τα τελευταία χρόνια, συνδέονται με ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, ενώ και πολλά άλλα ρήγματα ή ρηξιγενείς ζώνες, που παλαιότερα είχαν χαρακτηριστεί ως κανονικά ή ανάστροφα, φαίνεται ότι παρουσιάζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης.



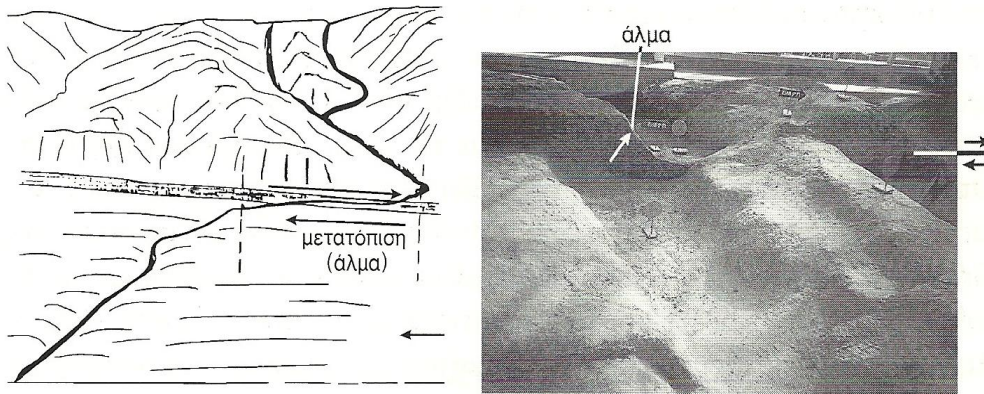
Εικόνα 3.16. Η γεωμετρία ενός ιδιαιτού δεξιόστροφου ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης με τις επιμέρους τυπικές συνοδευτικές δομές του (Biddle & Christie-Blick 1985)



Εικόνα 3.17. Ορολογία και γωνιακή σχέση των δομών για μια περίπτωση δεξιόστροφης απλής διάτμησης (simple shear). Α. Ελλειψοειδές παραμόρφωσης και σύγχρονη ορολογία που βασίζεται στους Wilcox et al. (1973). Β. Ορολογία σύμφωνα με τα πειράματα του Riedel. Κύρια ζώνη μετατόπισης ή Κύριο ρήγμα (Master Fault) ή ύψιλον "διάτμηση" (Y Shear). Δευτερεύουσες "συνθετικές διατμήσεις" (secondary Synthetic Shears) η P και R διατμήσεις (P και Riedel shears) που τοποθετούνται σε γωνία 10° - 15° σε σχέση με την διεύθυνση του κύριου ρήγματος. Αντιθετική "διάτμηση" (Antithetic Shear) ή Συζυγής (Conjugate R'Riedel) "διάτμηση". Εφελκυστικές δομές (Extension structures of fractures). Συμπιεστικές δομές (Contractional structures or en echelon folds), (Biddle & Christie-Blick 1985)

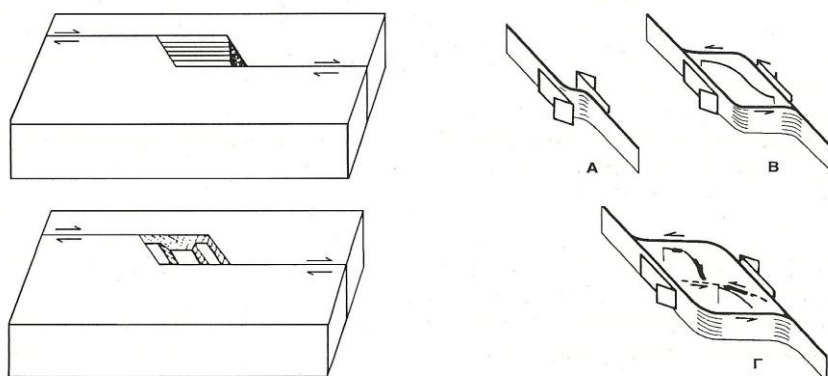
Το φαινόμενο της οριζόντιας ολίσθησης τεκτονικών τεμαχίων είναι περισσότερο περίπλοκο από ό,τι των κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων, όπου η δομή των ρηγμάτων είναι λιγότερο απλή και περισσότερο κατανοητή. Η γεωλογία των ρηγμάτων αυτών παρουσιάζει την ίδια γενική εμφάνιση, όπως πολύ μεγάλες δομές και ρηξιγενείς ζώνες συνοδευόμενες από μικρότερα ρήγματα διαφορετικών ειδών, πολλά από τα οποία συνδέονται με πτυχές, μικρά ανάστροφα κυρίως ή μικρά κανονικά ρήγματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα οριζόντια μετατόπισης ρήγματα είναι κυρίως αποτέλεσμα συμπιεστικών τάσεων και δευτερευόντως εφελκυστικών.

Η ανάλυση ορισμένων πολύ μεγάλων σεισμών έχει δείξει ότι πολύ περισσότερα ρήγματα απ ό,τι μέχρι σήμερα πιστευόταν είναι αποτέλεσμα οριζόντιας μετατόπισης και μάλιστα εκτείνονται σε μεγάλα βάθη του φλοιού και της λιθόσφαιρας, διαχωρίζοντας ανεξάρτητα τεμάχια (mega-blocks) ή και λιθοσφαιρικές πλάκες, όπως τα ρήγματα του Αγίου Ανδρέα στην Καλιφόρνια, του Ιορδάνη-Λιβάνου στη Μέση Ανατολή, τα μεγάλα ενδοηπειρωτικά ρήγματα της Κίνας και το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας στην Τουρκία.

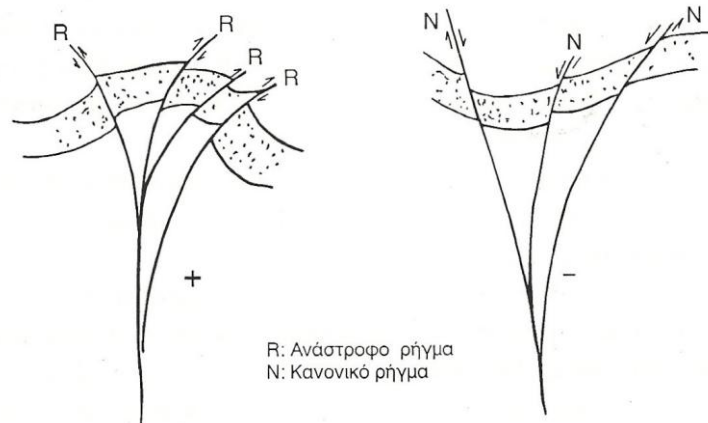


Εικόνα 3.18. Αριστερά: Τυπικό παράδειγμα εκτροπής (δεξιόστροφης μετατόπισης) της κοίτης ενός χειμάρρου στο Carrizo Plain της Καλιφόρνιας, λόγω της ενεργού δράσης ενός δεξιόστροφου κλάδου του ρήγματος San Antreas, Δεξιά: Οριζόντια μετατόπιση κοίτης ενός μικρού ρέματος στο νησί Awaji (Ιαπωνία) ως συνέπεια της επιφανειακής διάρρηξης του σεισμού του Kobe (1995)

Τα οριζόντια μετατόπισης ρήγματα είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες τεκτονικές δομές, και η ζώνη επιφανειακών διαρρήξεων εκδηλώνεται συχνά με μεγάλος πλάτος. Τα ρήγματα της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν ειδικές γεωμετρικές δομές, όπως δομές λουλουδιών (flower or tulip structures), λεκάνες ώθησης και εφελκυσμού (pull-apart basins), en echelon συζυγείς δομές κ.ά. που συμβάλλουν στη διάχυση της παραμόρφωσης εκατέρωθεν της κεντρικής βασικής τεκτονικής γραμμής. Παραδείγματα δομών που δημιουργούνται κατά μήκος της ρηξιγενούς ζώνης ενός ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης δίνονται στις εικόνες 3.19 και 3.20.



Εικόνα 3.19. Αριστερά τρισδιάστατο μοντέλο μίας τεκτονικής λεκάνης εφελκυσμού (pull-apart basin). Δεξιά: σχηματική απεικόνιση που δείχνει τον εξελικτικό τρόπο δημιουργίας μιας τεκτονικής λεκάνης ώθησης-εφελκυσμού (pull-apart basin) σε τρία στάδια (A, B, Γ)



Εικόνα 3.20 Τυπικές μορφές δομών “λουλουδιού”(αριστερά: θετική ή ανάστροφη και δεξιά: αρνητική ή κανονική) που συνδέονται με τη δράση ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης

4 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΚΑΙ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΡΗΓΜΑΤΩΝ

4.1 Προβλήματα από τη διαφοροποίηση στη γεωλογική δομή

Από την παρουσία ρηγμάτων, ως μεγάλων επιφανειών ασυνέχειας, δημιουργείται διαφοροποίηση στα γεωλογικά, γεωτεχνικά και σεισμικά των περιοχών εκατέρωθεν του ίχνους τους. Οι παράμετροι που σχετίζονται με τη διαφοροποίηση αυτή της γεωλογικής δομής είναι οι ακόλουθες (πίνακας 4.1).

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΕΙΔΟΣ	ΚΥΡΙΑ ΑΙΤΙΑ	ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ	ΚΥΡΙΕΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	ΚΥΡΙΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ
ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ - ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ	ΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ	ΠΡΩΤΟΓΕΝΕΙΣ ΔΟΜΕΣ	ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	---	---
	ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΡΗΞΕΩΝ			---	---
	ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΡΙΒΗ	ΖΩΝΕΣ ΚΑΤΑΚΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	ΑΠΩΛΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΘΙΣΤΗΣΕΙΣ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΚΑΘΙΣΤΗΣΕΙΣ	ΑΠΟΜΑΚΡ. ΤΕΚΤ. ΥΛΙΚΟΥ ΕΙΔ. ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΜΕΤΑΒΕΣΗ ΕΡΓΟΥ
	ΠΛΕΥΡΙΚΑ ΚΟΡΗΜΑΤΑ	ΔΙΑΒΡΩΣΗ	ΕΙΔΙΚΕΣ ΓΕΩΜΟΡΦΕΣ		ΔΙΑΦΟΡΙΚΕΣ ΚΑΘΙΣΤΗΣΕΙΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΕΡΠΥΣΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ	ΕΙΔ. ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ ΕΠΙΛ. ΘΕΣΗΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ
ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ	ΔΙΑΦΟΡ. ΚΑΘΙΣΤΗΣΕΙΣ	ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΜΗΣ	ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	ΑΠΩΛΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ	ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕΤΑΒΕΣΗ ΕΡΓΟΥ ΕΙΔΙΚΟΙ ΟΡΟΙ
	ΔΙΑΦΟΡ. ΔΙΑΒΡΩΣΗ				ΑΠΩΛΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ	
	ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ	ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΜΗΣ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΚΛΙΣΕΙΣ ΚΑΤΑΚΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ	ΧΑΛΑΡΩΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ		ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΑΠΩΛΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ	ΜΕΤΑΒΕΣΗ ΕΡΓΟΥ ΕΙΔΙΚΑ ΕΡΓΑ
	ΚΑΤΑΠΤΟΞΕΙΣ-ΑΝΑΤΡΟΠΕΣ-ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΕΙΣ	ΚΑΤΑΚΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ	ΧΑΛΑΡΩΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ		ΑΜΕΣΕΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ	ΜΕΤΑΒΕΣΗ ΕΡΓΟΥ ΕΡΓΑ ΣΤΑΒΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ
	ΕΓΚΟΙΛΑ	ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	ΚΑΡΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝ. ΕΜΦΑΝΙΣΗ		+ ΓΕΩΦΥΣ. ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΙΣ	ΑΠΩΛΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ
ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ	---	ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ	ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΠΗΓΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ	ΓΕΩΛΟΓ.ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ	ΔΥΣΧΕΡΕΙΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΕΣ ΚΑΘΙΣΤΗΣΕΙΣ	ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΕΙΔ. ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΜΕΤΑΒΕΣΗ ΕΡΓΟΥ
ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ	ΜΕΤΑΒΕΣΗ ΡΗΞΙΤΕΜΑΧΩΝ	ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΕΙΔΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ	ΓΕΩΛ. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΝΕΟΤ. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΙΔΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ	ΜΕΓΑΛΕΣ ΒΛΑΒΕΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΕΙΣ	ΕΙΔΙΚΟΙ ΟΡΟΙ ΜΕΤΑΒΕΣΗΣ ΕΡΓΟΥ
	ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΝΤΑΣΕΩΝ	ΤΡΟΠΟΣ ΔΙΑΡΡΗΣΗΣ				
	ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΣΤΙΑΣ				
	ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΕΙΣ	ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ				

Εικόνας 4.1. Συγκετρωτικός πίνακας κατηγοριοποίησης προβλημάτων, αιτιών και αντιμετώπισης που απαντώνται κατά μήκος των ρηγμάτων (από Παυλίδη 2001)

4.2 Διαφοροποίηση της λιθοστρωματογραφικής διάρθρωσης

Η διαφοροποίηση της λιθοστρωματογραφικής διάρθρωσης εκατέρωθεν των ρηγμάτων είναι αρκετά συχνή, ειδικά στις περιπτώσεις όπου οι ρηξιγενείς δομές εμφανίζουν μεγάλο μέγεθος μετατόπισης των τεμαχίων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι δυνατόν να απαντούν σχηματισμοί με τελείως διαφορετικούς χαρακτήρες στα δύο ρηξιτεμάχη. Τούτο είναι σύνηθες στον Ελληνικό χώρο, όπου μεγάλες περιθωριακές ρηξιγενείς ζώνες αλλά και ρήγματα μικρότερης τάξης, φέρνουν σε επαφή σχετικά συνεκτικούς βραχώδεις

σηματισμούς αλπικής ηλικίας (π.χ. ασβεστόλιθους) με χαλαρές μεταλλικές αποθέσεις (π.χ. μάργες, άργιλους). Παρόλο που η ανισοτροπία αυτή καθ' αυτή δεν προκαλεί άμεσα σημαντικά προβλήματα, εντούτοις αποτελεί το αίτιο γενικότερης διαφοροποίησης των τοπικών συνθηκών (π.χ. υδρογεωλογικές συνθήκες, γεωτεχνικές συνθήκες, κλπ.) στην περιοχή θεμελίωσης ενός έργου.

4.2.1 Διαφοροποίηση της τεκτονικής δομής

Οι διαφορετικές λιθοστρωματογραφικές ενότητες που έρχονται σε επαφή λόγω του ρήγματος μπορεί να εμφανίζουν τελείως διαφορετική τεκτονική παραμόρφωση. Χωρίς αυτό να αποτελεί κανόνα, ρήγματα με μικρό άλμα και μήκος δεν προκαλούν σημαντική διαφοροποίηση στην τεκτονική δομή εκατέρωθέν τους. Στην αντίθετη περίπτωση, είναι συχνό το φαινόμενο να έρχονται σε επαφή απαραμόρφωτοι ή ελαφρά παραμορφωμένοι γεωλογικοί σχηματισμοί με άλλους, ισχυρά τεκτονισμένους.

4.2.2 Παρουσία τεκτονικών πετρωμάτων

Πρόκειται για πετρώματα που προέρχονται από τον κατακερματισμό των γεωλογικών σχηματισμών κατά τη διάρρηξη, λόγω τριβής των εκατέρωθεν ρηξιτεμαχών. Η παρουσία καθώς και το εύρος ανάπτυξής τους εξαρτώνται άμεσα, μεταξύ άλλων από: (i) το είδος και την ένταση του εφαρμοζόμενου πεδίου τάσεων, (ii) το είδος και το μέγεθος της μετατόπισης, (iii) την ύπαρξη ή μη διαδοχικών επαναδραστηριοποιήσεων του ρήγματος, (iv) τη λιθολογική σύσταση των παρειών του ρήγματος, (v) την παρουσία υγρής φάσης, κ.ά. Το σημαντικότερο πρόβλημα που δημιουργείται είναι η έντονη ανισοτροπία των γεωλογικών σχηματισμών, που οδηγεί σε σειρά επιμέρους προβλημάτων όπως: (i) απώλεια στήριξης εξαιτίας πλήρωσης των δημιουργούμενων κενών από πιθανές υπερκείμενες μάζες, (ii) κυκλοφορία υπογείων υδάτων και συνεπαγόμενη υπόγεια διάβρωση, (iii) στατική και δυναμική καθίζηση εξαιτίας συμπίεσης των χαλαρών τεκτονικών πετρωμάτων στη ζώνη του ρήγματος και (iv) διαφοροποίηση ή/και ενίσχυση αναμενόμενων μετακινήσεων και επιταχύνσεων σε σεισμική διέγερση. Η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού περιλαμβάνει, σε γενικές γραμμές: (i) απομάκρυνση του τεκτονικού υλικού, (ii) βελτίωση της βραχομάζας – εξυγίανση, (iii) πιθανή μετάθεση του τεχνικού έργου.

4.2.3 Παρουσία πλευρικών κορημάτων

Τα ρηξιγενή μέτωπα συχνά καλύπτονται από λιγότερο ή περισσότερο χαλαρά, γωνιώδη, αδρομερή ή λεπτομερή υλικά, τα πλευρικά κορήματα. Απαντούν σε ζώνη ποικίλου εύρους κατά μήκος του ίχνους ή του μετώπου του ρήγματος με το οποίο πολλές φορές συνδέονται γενετικά. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι θέσεις κατά μήκος σεισμικών διαρρήξεων που καλύπτονται από κορήματα, αφού σε αυτά οι μετατοπίσεις κατά τη διάρκεια σεισμού έχουν σημαντικά μεγαλύτερο μέγεθος από τις αντίστοιχες στο γεωλογικό υπόβαθρο (Rondoyanni et al. 2013).

Τα προβλήματα που ανακύπτουν είναι συνάρτηση του βαθμού συνεκτικότητας των κορημάτων. Έτσι, όταν κυριαρχούν οι χαλαρές φάσεις τα πιθανά προβλήματα εντοπίζονται: (i) στις έντονες διαφορικές καθιζήσεις, (ii) στις κατολισθήσεις οι οποίες ευνοούνται λόγω της κλίσης των πρανών, (iii) σε φαινόμενα ερπυσμού και (iv) στις αυξημένες τιμές ορισμένων σεισμικών παραμέτρων (π.χ. μετατόπιση). Στις συνεκτικές/βραχώδεις φάσεις αναμένονται: (i) παρουσία εγκοίλων, λόγω εκλεκτικής υπόγειας διάβρωσης των ενδιαστρώσεων των πιθανών χαλαρών φάσεων και (ii) καταπτώσεις. Συνθετότερα προβλήματα εμφανίζονται σε περίπτωση εναλλαγών χαλαρών και συνεκτικών φάσεων τόσο κατά την κατακόρυφη, όσο και κατά την οριζόντια έννοια.

Για να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα προτείνεται σε γενικές γραμμές: (i) θεμελίωση σε υγιές υπόβαθρο, (ii) αποφυγή θεμελίωσης σε διαφορετικές λιθολογικές φάσεις και (iii) εάν υπάρχει η δυνατότητα, μετάθεση του έργου εκτός της ζώνης εμφάνισης των χαλαρών φάσεων των πλευρικών κορημάτων.

4.3 Προβλήματα από τη διαφοροποίηση των γεωτεχνικών συνθηκών

Τα προβλήματα αυτού του είδους είναι άμεσο αποτέλεσμα των διεργασιών που έχουν λάβει ή λαμβάνουν χώρα κατά μήκος των ρηγμάτων, τόσο κατά τη διάρκεια γένεσης όσο και κατά τη διάρκεια εξέλιξής τους, και σχετίζονται ως ένα μεγάλο βαθμό με την διαφοροποίηση της γεωλογικής δομής. Ειδικότερα, τα προβλήματα είναι τα ακόλουθα:

4.3.1 Διαφορικές καθιζήσεις

Είναι ένα συχνό φαινόμενο που παρατηρείται εκατέρωθεν των ρηγμάτων και των ρηξιγενών ζωνών. Οι πιθανότεροι παράγοντες εκδήλωσής τους είναι: (i) η παρουσία διαφορετικών γεωλογικών σχηματισμών εκατέρωθεν του ρήγματος, (ii) η παρουσία

τεκτονικών πετρωμάτων κατά μήκος της ρηξιγενούς ζώνης, (iii) η διαφοροποίηση των γεωτεχνικών συνθηκών εκατέρωθεν του ρήγματος, και (iv) η διαφοροποίηση των υδρογεωλογικών συνθηκών.

Οι επιπτώσεις στις κατασκευές και στα τεχνικά έργα είναι κυρίως: (i) η σταδιακή απώλεια στήριξης σε τμήματα του έργου, οφειλόμενη σε στατική καθίζηση και (ii) η απώλεια στήριξης σε ορισμένα τμήματα κατά τη διάρκεια σεισμικών δονήσεων που συνοδεύονται από δυναμικές καθιζήσεις. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο προσδιορισμός του μεγέθους και της γεωγραφικής κατανομής των πιθανών καθιζήσεων. Τα πορίσματα των επιμέρους ερευνών θα πρέπει να ενσωματώνονται στη μελέτη του έργου, και εάν οι συνθήκες είναι ιδιαίτερα δυσμενείς, αυτό να μετατίθεται.

4.3.2 Διαφορική διάβρωση

Η διαφορική διάβρωση κατά μήκος και εκατέρωθεν των ρηγμάτων ενισχύεται από: (i) τον κατακερματισμό των σχηματισμών, (ii) τη διαφοροποίηση της κυκλοφορίας των υπόγειων και των επιφανειακών υδάτων στα δύο ρηξιτεμάχη, (iii) τη διαφοροποίηση των μορφολογικών συνθηκών. Οι επιπτώσεις από την εκδήλωση της διαφορικής διάβρωσης σταδιακά έχουν σαν αποτέλεσμα: (i) την υποσκαφή των σχηματισμών θεμελίωσης, (ii) τη σταδιακή απώλεια στήριξης τμημάτων της κατασκευής και (iii) την πιθανή επιχωμάτωση τμημάτων του έργου λόγω των μεταφερομένων από τη διάβρωση υλικών. Σε ότι αφορά την αντιμετώπιση του προβλήματος συνιστώνται μια σειρά μέτρων, όπως: (i) έργα προστασίας από την επιφανειακή διάβρωση στην ευρύτερη περιοχή, (ii) αντιδιαβρωτική προστασία θεμελίωσης, (iii) έργα υποβιβασμού της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, κ.ά.

4.3.3 Κατολισθήσεις–Καταπτώσεις–Ανατροπές

Οι κύριοι παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων είναι: (i) οι μορφολογικές συνθήκες, (ii) η γεωμετρία των πετρωμάτων και των πρωτογενών δομών τους, (iii) οι τεκτονικές ασυνέχειες, (iv) ο βαθμός κατακερματισμού των πετρωμάτων, (v) η παρουσία και κυκλοφορία υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, (vi) οι ανθρώπινες παρεμβάσεις. Δεδομένου όμως ότι οι μορφολογικές ασυνέχειες συνδέονται ή οφείλονται συχνότατα σε ρήγματα ή ρηξιγενείς ζώνες, γίνεται αντιληπτό ότι τα φαινόμενα αυτά ενισχύονται

διότι: (i) η ρηξιγενής ζώνη προκαλεί κατακερματισμό των πετρωμάτων, (ii) στα εκατέρωθεν ρηξιτεμάχη δημιουργούνται διαφοροποιήσεις στην κίνηση των υπογείων υδάτων που οδηγούν σε υποβοήθηση των μετακινήσεων-ολισθήσεων κατά μήκος ασυνεχειών και (iii) οι διαδικασίες διάβρωσης – αποσάθρωσης στο ανερχόμενο τέμαχος τείνουν να εξομαλύνουν την υφιστάμενη μορφολογική ασυνέχεια. Τα φαινόμενα ενισχύονται σε περίπτωση σεισμικής διέγερσης. Η αντιμετώπιση των κατολισθητικών φαινομένων πρέπει να λαμβάνει υπόψη οπωσδήποτε τις ιδιαίτερες συνθήκες που διαμορφώνονται και αντιστοιχούν στα συνήθη έργα αντιμετώπισης κατολισθήσεων.

4.3.4 Έγκοιλα – ασυνέχειες

Η προκαλούμενη λόγω της διάρρηξης ασυνέχεια στα πετρώματα έχει ως αποτέλεσμα τον κατακερματισμό της προϋπάρχουσας δομής, ακόμα και την πλήρη αλευροποίηση των σχηματισμών. Έτσι είναι δυνατό να δημιουργηθούν έγκοιλα και λοιπές ασυνέχειες εξαιτίας της υπόγειας διάβρωσης από τα κυκλοφορούντα ύδατα κυρίως σε ανθρακικά πετρώματα. Στην περίπτωση εντοπισμού εγκοίλων, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη σοβαρά το ενδεχόμενο να μετατεθεί η θέση εκτέλεσης του τεχνικού έργου, ειδικότερα εάν βρίσκονται στη γειτονία ενεργού ή σεισμικού ρήγματος (Lekkas & Kranis 1994).

4.4 Προβλήματα σχετιζόμενα με σεισμική δραστηριότητα

Τα προβλήματα αυτού του είδους είναι και τα περισσότερο γνωστά, δεδομένης της άμεσης συσχέτισης ρήγματος – σεισμού και συνδέονται με τα ακόλουθα:

4.4.1 Μετατόπιση ρηξιτεμαχών

Η εμφάνιση του σεισμικού ρήγματος το οποίο προκαλεί μετατόπιση των εκατέρωθεν ρηξιτεμαχών στην επιφάνεια δεν είναι ιδιαίτερα συχνό φαινόμενο. Αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις στο πρόσφατο παρελθόν ήταν οι σεισμοί του Kobe (Ιαπωνία) το 1995, του Izmit και Duzce (Τουρκία) το 1999, της Taiwan το 1999 κ.α. Για τον ελλαδικό χώρο γνωστά σεισμικά ρήγματα είναι της Αταλάντης (σεισμοί του 1894), της Θεσσαλονίκης (σεισμοί του 1978), του Κορινθιακού κόλπου (σεισμοί του 1981) κ.α. Τα προβλήματα αλλά και οι κίνδυνοι σε περίπτωση μετατόπισης ρηξιτεμαχών στη βάση της θεμελίωσης ενός έργου παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εκδήλωση αστοχιών και στην ασφάλεια του έργουκατά την κατασκευή αλλά και τη λειτουργία του. Για το λόγο αυτό καθίσταται επιτακτικός ο εντοπισμός και χαρακτηρισμός ρηγμάτων που είναι δυνατό να ενεργοποιηθούν. Η διαδικασία

εντοπισμού – χαρακτηρισμού των ενεργών ρηγμάτων , όπως προαναφέρθηκε, είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και εμπεριέχει πάντα ποσοστό αβεβαιότητας.

4.4.2 Ενίσχυση Εντάσεων

Σε πολλούς σεισμούς παρατηρήθηκε ότι κατά μήκος των σεισμικών ρηγμάτων οι τιμές των εντάσεων λάμβαναν τις μέγιστες τιμές και γενικά παρουσίαζαν γραμμική ή επιμήκη κατανομή, η οποία ταυτιζόταν με το ίχνος του σεισμικού ρήγματος. Τέτοια φαινόμενα παρατηρήθηκαν τόσο στον Ελληνικό, όσο και στο διεθνή χώρο, ιδίως στις περιπτώσεις όπου τα σεισμικά ρήγματα έτεμναν αστικές πολεοδομικές μονάδες. Ενδεικτικά αναφέρονται οι σεισμοί του Αιγίου (1995), του Kobe (1995), του Izmit και του Duzce (1999) (Lekkas et al. 1996a, b, Lekkas 2000a).

4.4.3 Φαινόμενα κυματικής συμβολής – κατευθυντικότητας

Σε ορισμένες περιπτώσεις σεισμών παρατηρήθηκε ότι κατά μήκος του σεισμικού ρήγματος υφίσταται και ανισοκατανομή των εντάσεων, οι οποίες μειώνονται προς τη μία κατεύθυνση και αυξάνονται σημαντικά προς την άλλη. Το φαινόμενο έγινε περισσότερο κατανοητό όταν συνειδητοποιήθηκε ότι η σεισμική πηγή «μεταναστεύει» κατά μήκος του επιπέδου θραύσης. Το πλέον αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ήταν ο σεισμός του Kobe (1995) όπου κατά μήκος του σεισμικού ρήγματος οι εντάσεις καταγράφηκαν δραματικά αυξημένες προς το ένα άκρο (BA), ενώ ήταν πολύ μικρότερες στο άλλο (ΝΔ). Το φαινόμενο προκάλεσε διαμόρφωση του συχνοτικού περιεχομένου με αποτέλεσμα μεγάλες βλάβες προς τα ΒΑ μέσα στο Kobe και μικρές βλάβες προς τα ΝΔ στη νήσο Awaji (Lekkas & Kranis, 1997).

4.4.4 Ρευστοποιήσεις και σεισμικά ρήγματα

Σε πρόσφατους μεγάλους σεισμούς (Christchurch-2010, Αίγιο-1995) παρατηρήθηκε η ταυτόχρονη εκδήλωση σεισμικών ρηγμάτων και ρευστοποιήσεων. Τα φαινόμενα ρευστοποιήσεων δεν λαμβάνουν χώρα μόνο κατά μήκος των σεισμικών ρηγμάτων, αλλά η συνύπαρξη αυτών των δύο στοιχείων δημιουργεί, όπως είναι επόμενο, εξαιρετικά αρνητικές επιπτώσεις στα υπερκείμενα τεχνικά έργα (Εικόνα 4.2).



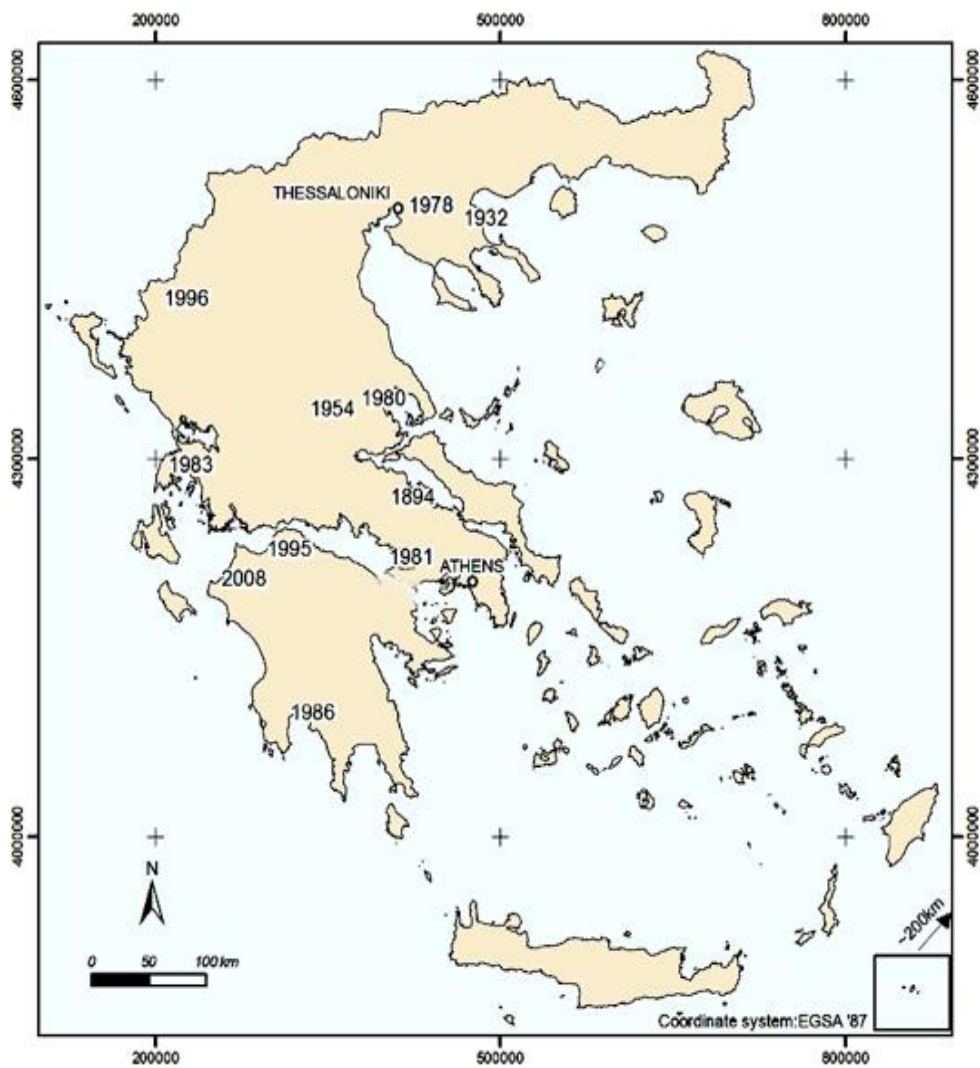
Εικόνα 4.3. Φαινόμενα ρευστοποίησης κατά το σεισμό του Christchurch Νέας Ζηλανδίας το 2010

5 ΤΟ ΠΛΑΤΟΣ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΣΥΝΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ – ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΟΥΣ

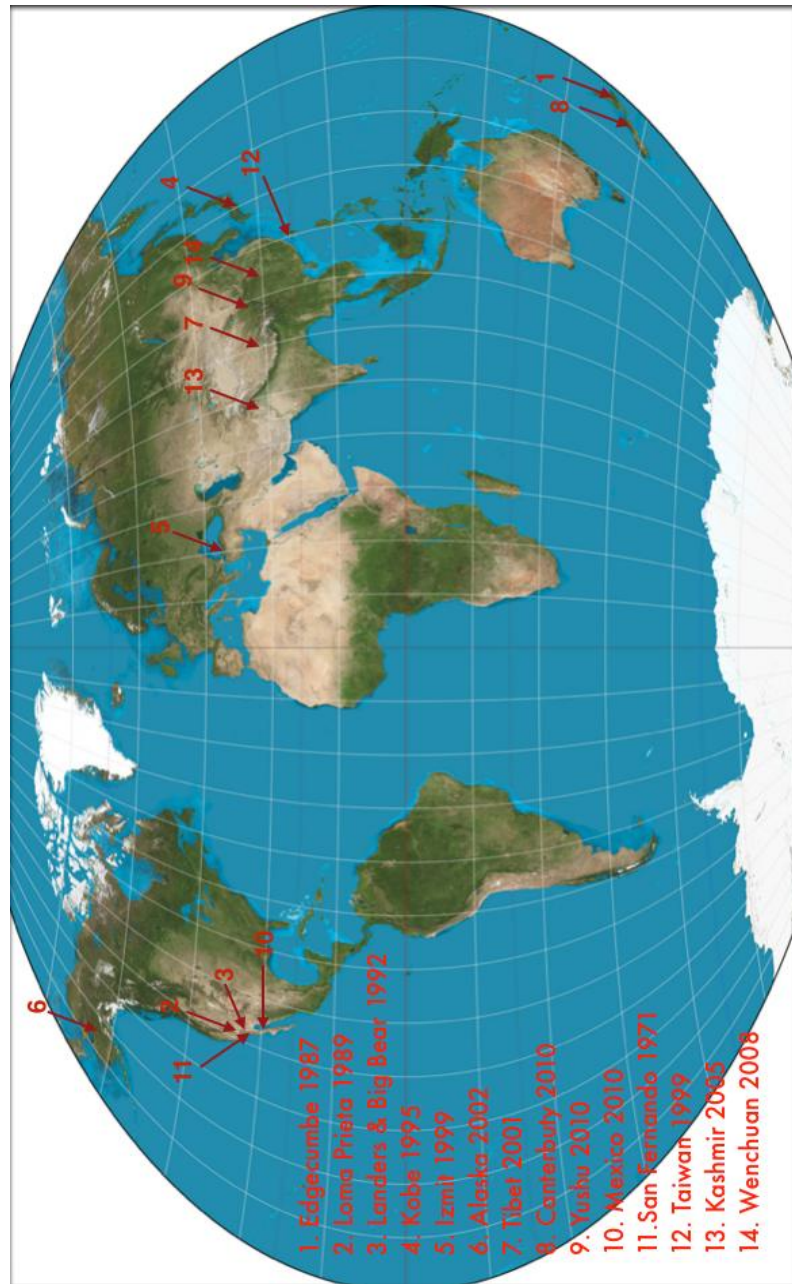
Ένας αριθμός σεισμικών διαρρήξεων από γεγονότα της Ελλάδας αλλά και διαφόρων άλλων χωρών της γης με έντονη σεισμικότητα μελετήθηκαν, με σκοπό τη διαπίστωση του πλάτους της ζώνης παραμόρφωσης και την εκτίμηση αντίστοιχων μεγεθών στην περίπτωση μελλοντικών σεισμών. Αν και δεν υπάρχουν συγκεκριμένες ποσοτικές σχέσεις που να συνδέουν το μέγεθος του σεισμού και το μήκος του ρήγματος με το πλάτος της ζώνης σεισμικής παραμόρφωσης κατά μήκος των ρηγμάτων, έχει δοθεί στους αντισεισμικούς κανονισμούς διαφόρων χωρών ενδεικτικά το πλάτος της ζώνης επίδρασης του ρήγματος και συνεπώς της ζώνης αποφυγής δόμησης. Συγκεκριμένα, ο αμερικανικός και ο γαλλικός αντισεισμικός κανονισμός ορίζουν ως επικίνδυνη ζώνη πλάτους 50m όταν η περιοχή προορίζεται για την κατασκευή συνήθως κτηρίων, 200m στην περίπτωση δημόσιων κτιρίων, 500-3000m για μεγάλα τεχνικά έργα και 8km για την εγκατάσταση πυρηνικών σταθμών.

Οι σεισμοί αναφέρονται ομαδοποιημένοι αναφορικά με το είδος του σεισμογόνου ρήγματος και με πρώτες τις περιγραφές των σεισμών της Ελλάδας. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν αποτελούν μια πρώτη προσπάθεια στο συγκεκριμένο θέμα, το οποίο δεν μπορεί να ολοκληρωθεί στο πλαίσιο μιας διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, μια λεπτομερής έρευνα θα έπρεπε να περιλαμβάνει και την εκτίμηση της επίδρασης των τοπικών γεωλογικών συνθηκών στο πλάτος της ζώνης εδαφικών διαρρήξεων, στοιχεία τα οποία δεν είναι εύκολα διαθέσιμα.

Στις εικόνες 5.1 και 5.2 δίνονται ο χάρτης της Ελλάδας και παγκόσμιος χάρτης αντίστοιχα με τις θέσεις των σεισμών που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.



Εικόνα 5.1. Χάρτης της Ελλάδας με τις περιοχές που σημειώθηκαν οι σεισμοί που αναφέρονται στη παρούσα διπλωματική: 1984-Αταλάντη, 1932-Ιερισσός, 1954-Σοφάδες, 1978-Θεσσαλονίκη, 1980-Αλμυρός Βόλου, 1981-Κορινθιακός κόλπος, 1983-Ακαρνανία-Λευκάδα, 1986-Καλαμάτα, 1989-Πάτρα, 1995-Αίγιο, 2008-Ανδραβίδα



Εικόνα 5.2 Παγκόσμιος χάρτης με τις τοποθεσίες των σεισμών που αναφέρονται στην παρούσα διπλωματική

5.1 Κανονικά ρήγματα

Οι σεισμοί που συνδέονται με τη δράση κανονικών ρηγμάτων είναι οι περισσότεροι σεισμοί στον ελληνικό χώρο, και αποτελούν περιπτώσεις μελέτης παγκοσμίως, αφού η ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου είναι μία από τις εντονότερα εφελκυστικές περιοχές παγκοσμίως. Την σημαντικότερη δομή αποτελεί ο Κορινθιακός κόλπος, στον οποίο ο ρυθμός επέκτασης φθάνει και τα 30mm/έτος σύμφωνα με πρόσφατες γαιωδειακές μετρήσεις (Avallone et al. 200.).

ΑΤΑΛΑΝΤΗ – 1894

Η περιοχή της Αταλάντης, βρίσκεται στην τεκτονική τάφρο του Βόρειου Ευβοϊκού κόλπου, η οποία διαμορφώθηκε στη διάρκεια του Τεταρτογενούς από τη δράση κανονικών ρηγμάτων διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ έως ΔΒΔ-ΑΝΑ. Πολλά από τα ρήγματα αυτά παρουσιάζουν μορφοτεκτονικά και γεωλογικά στοιχεία τα οποία υποδεικνύουν πρόσφατη δραστηριότητα και μπορούν να χαρακτηριστούν ως ενεργά, ορισμένα δε, συνδέονται με ισχυρούς σεισμούς κατά την ιστορική περίοδο.

Το ρήγμα της Αταλάντης, τμήμα μιας ευρύτερης ρηξιγενούς ενεργού ζώνης, είναι ένα ενεργό κανονικό ρήγμα διεύθυνσης Α-Δ έως ΑΝΑ-ΔΒΔ και κλίσης προς Β-ΒΑ. Το ρήγμα επηρεάζει ασβεστολιθικούς σχηματισμούς και νεογενή ιζήματα, ενώ ένα τμήμα του ακολουθεί το όριο του υποβάθρου με την αλλουβιακή πεδιάδα. Η σεισμική ακολουθία του 1894 περιελάμβανε δυο ισχυρούς σεισμούς με εκτιμώμενο μέγεθος $M_s = 6.6$ και $M_s = 7.0$ σύμφωνα με πολλούς ερευνητές, όπως αναφέρεται στους Παπαζάχο και Παπαζάχου (2003). Οι θέσεις εμφάνισης των σεισμικών διαρρήξεων του 1894 ακολουθούσαν το ίχνος του ρήγματος και σχεδόν ταυτίζονταν με αυτό (εικόνες 5.1 και 5.2).



Εικόνα 5.1. Φωτογραφία εποχής (Skourhos 1894) στην οποία φαίνεται η συνσεισμική μετατόπιση του 1894, κατά μήκος της ρηξιγενούς επιφάνειας στην Αλμύρα.

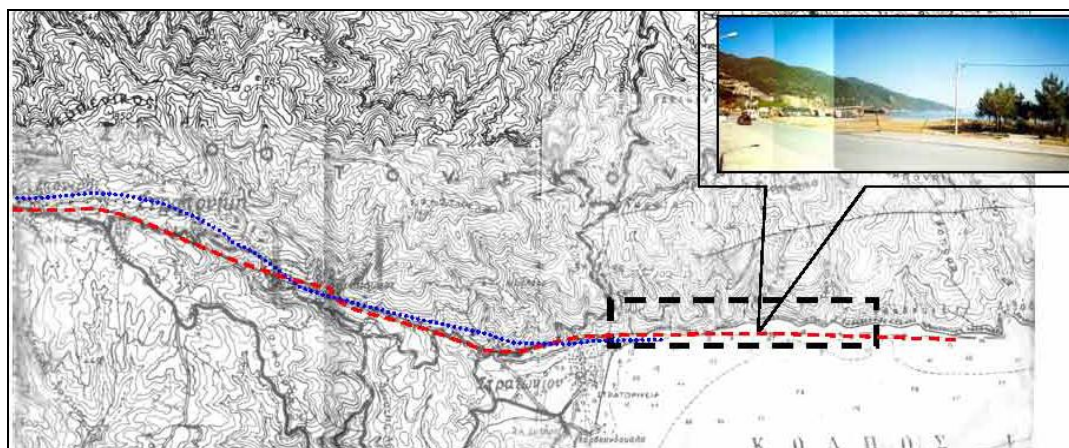


Εικόνα 5.2. Σκίτσο υπαίθρου στο οποίο απεικονίζονται εδαφικές διαρρήξεις του σεισμού του 1894 στην περιοχή της πόλης της Αταλάντης (από Skourhos 1894).

ΙΕΡΙΣΣΟΣ - 1932

Η σεισμική ακολουθία της Ιερισσού του 1932, με μέγεθος κύριου σεισμού ($M=7.0$) συνδέεται με την επαναδραστηριοποίηση του ρήγματος του Στρατωνίου, που είναι μια μεγάλη ρηξιγενής γραμμή γενικής διεύθυνσης Α – Δ και νότιας κλίσης, μήκους μεγαλύτερου των 30km περίπου. Στο μεγαλύτερο τμήμα του διαχωρίζει σχηματισμούς του γεωλογικού υποβάθρου, ενώ σε ορισμένες θέσεις κατά μήκος του, παρατηρούνται σημαντικές σε πάχος τεταρτογενείς αποθέσεις συνεκτικών πλευρικών κορημάτων, που πρέπει να οφείλονται στην νεοτεκτονική δράση του ρήγματος.

Τα ίχνη της νέας δραστηριοποίησης του ρήγματος στο σεισμό της Ιερισσού χαρτογραφήθηκαν από τους Μαραβελάκη (1933), Georgalas & Galanopoulos (1953) και πιο πρόσφατα από τους Pavlides & Trianos (1991). Στην εικόνα 5.3. δίνεται τοπογραφικός χάρτης της περιοχής, όπου εμφανίζεται το ίχνος του ρήγματος του Στρατωνίου καθώς και οι εδαφικές ρωγμές του σεισμού του 1932, οι οποίες ακολουθούν σε πολύ μικρή απόσταση, το ίχνος του ρήγματος.



Εικόνα 5.3. Χάρτης της ευρύτερης περιοχής όπου με κόκκινο χρώμα σημειώνεται το ρήγμα του Στρατωνίου και με μπλε οι κύριες εδαφικές ρωγμές κατά το σεισμό του 1932 (από Παυλίδη 2001).

ΣΟΦΑΔΕΣ - 1954

Κατά το σεισμό που έπληξε την ευρύτερη περιοχή Σοφάδων, με μέγεθος $M=7.0$, παρατηρήθηκαν διαρρήξεις του εδάφους σε διάφορα μέρη, απο τις οποίες η σημαντικότερη ήταν αυτή στην Εκκάρρα που είχε διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ, μήκος 5km και μετατόπιση του ανατολικού τμήματος κατά 30-70cm (Εικόνα 5.4). Στα άκρα της διάρρηξης ακολούθησε διάρρηξη με διεύθυνση Α-Δ και μετάπτωση του βορείου τμήματος κατά 1m περίπου. Παρατηρήθηκαν φαινόμενα επίσης ρευστοποίησης και υδρολογικές μεταβολές σε διάφορες θέσεις (Παπασταματίου και Μουγιάρης, 1986).

Οι εδαφικές ρωγμές εμφανίστηκαν μέσα σε μια ζώνη πλάτους μεγαλύτερης από 20m, ενισχυμένης όμως από φαινόμενα ολίσθησης της πλαγιάς. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το μικρό μήκος του ρήγματος σε σχέση με το μέγεθος του σεισμού και την αλλαγή της διεύθυνσης της εδαφικής διάρρηξης, θέτει προβληματισμούς ως προς την καθαρά τεκτονική φύση των εδαφικών ρωγμών.



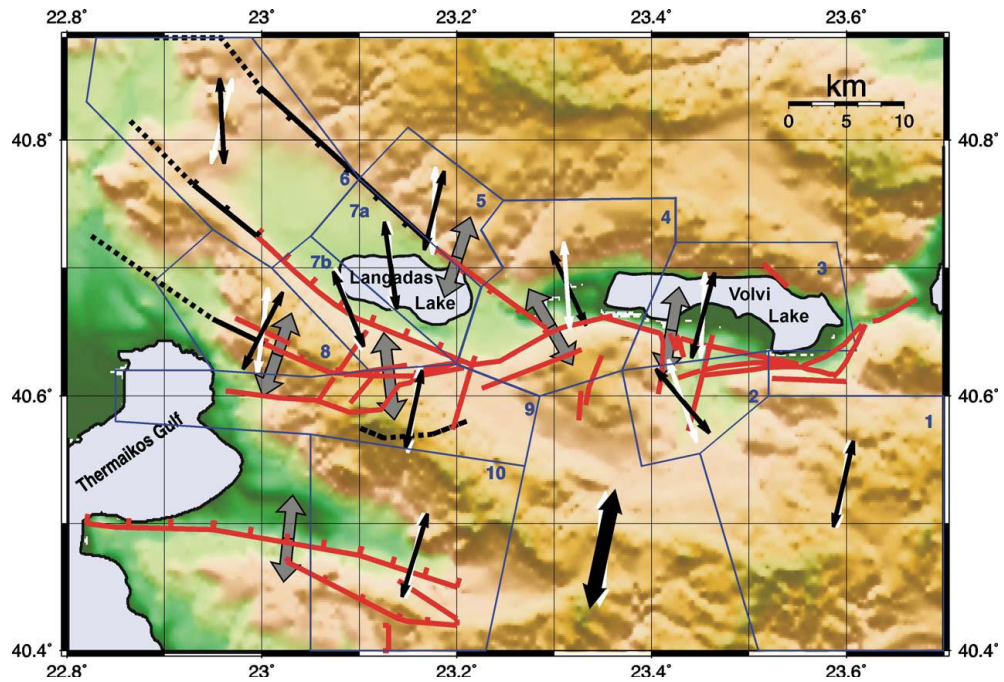
Εικόνα 5.4. Φωτογραφία εποχής στην οποία φαίνονται οι επιφανειακές ρωγμές του 1954, στην περιοχή της Εκκάρρας (από Παπασταματίου και Μουγιάρη, 1986).

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ– 1978

Η σεισμική ακολουθία που έπληξε την Θεσσαλονίκη το 1978, είχε επικεντρική περιοχή 25km βορειοανατολικά της πόλης της Θεσσαλονίκης, ανάμεσα στις λίμνες Λαγκαδά και Βόλβη (Εικόνα 5.5). Ξεκίνησε με πολλούς προσεισμούς, εκ των οποίων ο πιο ισχυρός είχε μέγεθος $M_s=5.7$ και κορυφώθηκε με τον κύριο σεισμό στις 20 Ιουνίου (με μέγεθος $M_s=6.5$), ενώ έντονη υπήρξε και η μετασεισμική δραστηριότητα. Οι σεισμοί συνοδεύτηκαν από τη δημιουργία εδαφικών διαρρήξεων (Εικόνα 5.6) που εκδηλώθηκαν μέσα στα νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα της λεκάνης, και σε ελάχιστες θέσεις στο προνεογενές υπόβαθρο (κυρίως σε σχιστόλιθους και γνεύσιους), όπου ακολούθησαν, σχεδόν σε επαφή, τα ίχνη προϋπαρόντων ρηγμάτων (Εικόνα 5.7).

Οι σεισμικές ρωγμές είχαν διεύθυνση $B60^\circ$ έως $B90^\circ$ και μέγιστη μετατόπιση 20cm. Κάποια σημεία παρουσίαζαν αριστερόστροφη ολίσθηση (μέγιστη μετατόπιση 10cm) ή δεξιόστροφη και δεξιόστροφη (μέγιστη μετατόπιση 5cm). Τοπικά οι ρωγμές δεν ξεπερνούσαν τις μερικές εκατοντάδες μέτρα σε μήκος, αλλά αποτελούσαν μέρος προϋπαρχόντων ρηγμάτων μήκους αρκετών χιλιομέτρων. Το πρώτο, είναι ένα κανονικό ρήγμα που κόβει τεταρτογενείς και νεογενείς αποθέσεις ή ακολουθεί το όριο ανάμεσα στις νεότερες αποθέσεις και το παλαιοζωικό υπόβαθρο. Έχει γενική διεύθυνση Α-Δ, βόρεια κλίση και μήκος περίπου 12km. Το δεύτερο ρήγμα, με διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ, είναι επίσης ένα κανονικό ρήγμα που έχει μήκος περίπου 8km, που διέρχεται από τεταρτογενείς αποθέσεις. Το ρήγμα αυτό έχει κλίση προς το Νότο και εμφανίζει αριστερόστροφη μετατόπιση.

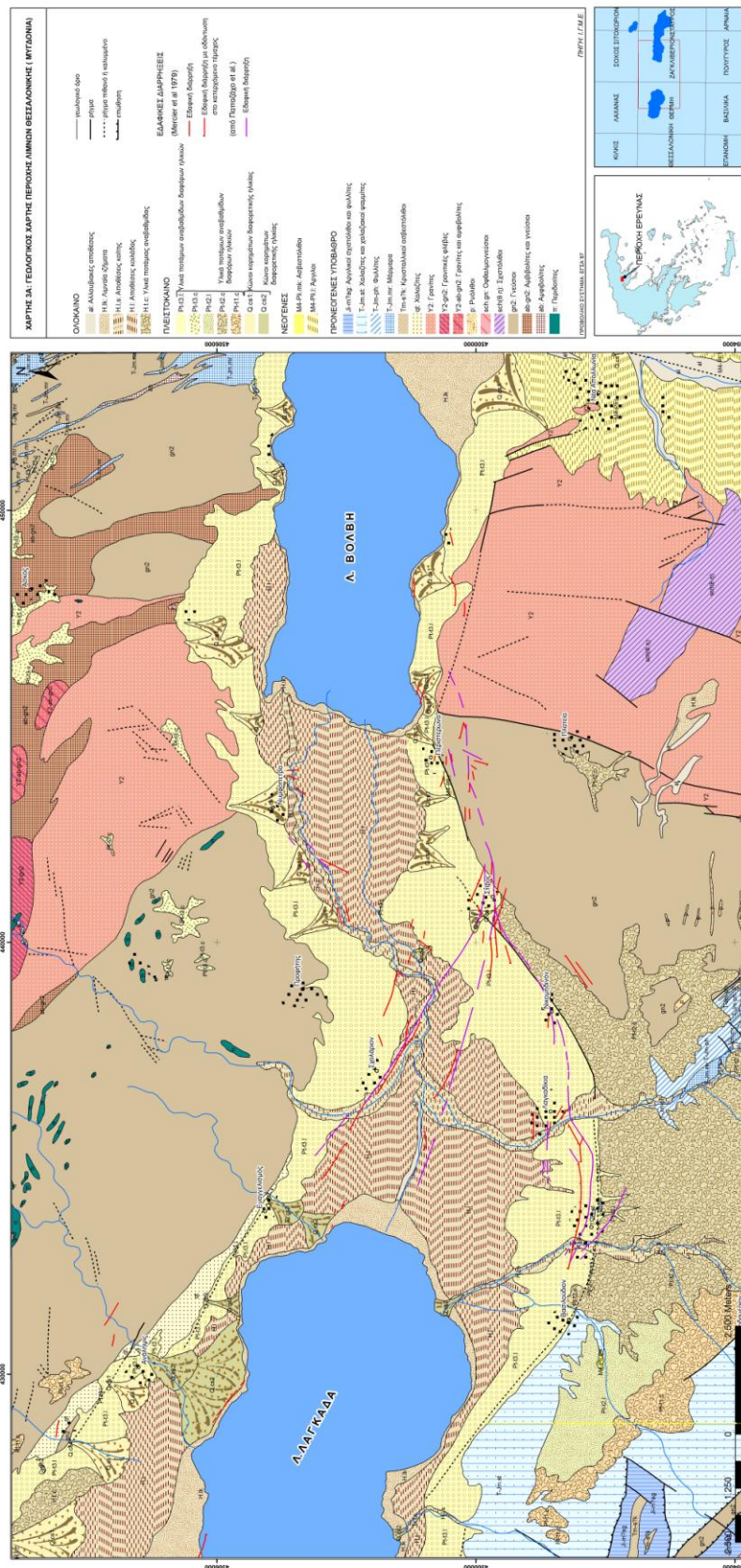
Ανάμεσα στα δύο προηγούμενα επανενεργοποιήθηκε και ένα τρίτο ρήγμα με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και κλίση προς Βορρά. Είναι ένα κανονικό ρήγμα με αριστερόστροφη συνιστώσα και μήκος περίπου 5km.



Εικόνα 5.5. Ρήγματα και τεκτονικές τάσεις στην περιοχή της λεκάνης της Μυγδονίας – περιοχή λιμνών Θεσσαλονίκης (από Vamvakaris et al. 2006)

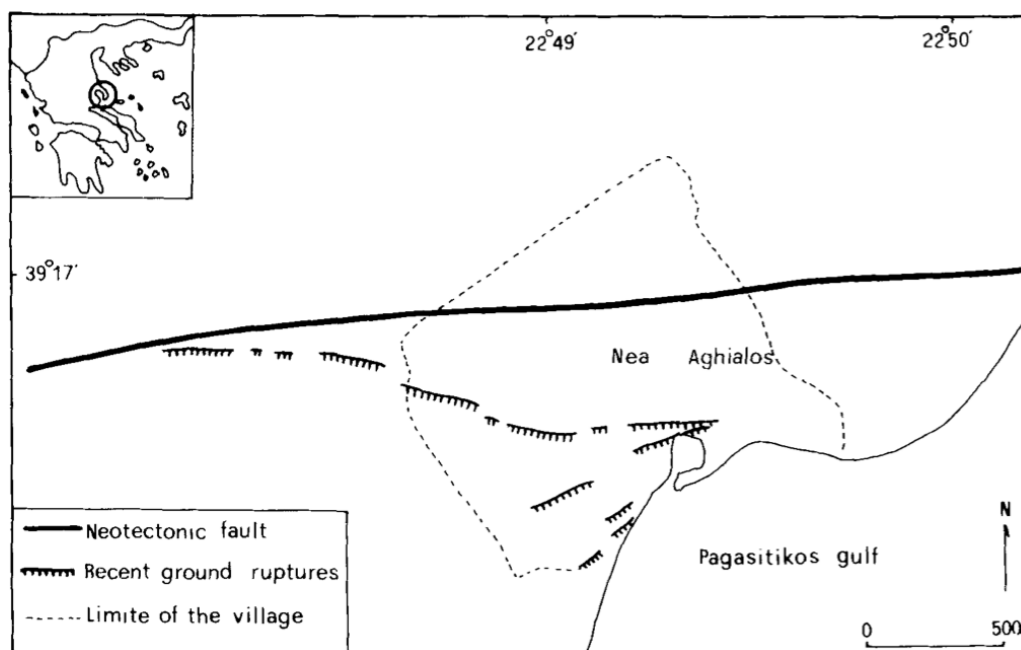


Εικόνα 5.6. Σεισμική διάρρηξη με το σεισμό του 1978 στην περιοχή Θεσσαλονίκης (από Mercier et al. 1979)

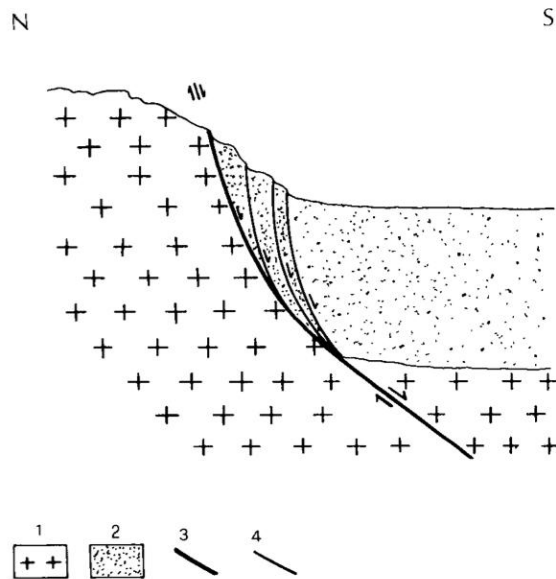


Εικόνα 5.7. Γεωλογικός χάρτης με τις σεισμικές διαρρήξεις της περιοχής Λιμών Θεσσαλονίκης (από Καλογερά 2011).

Τον Ιούλιο του 1980, σεισμική δόνηση μεγέθους $M=6.5$ με επίκεντρο τον Παγασητικό κόλπο και εστιακό βάθος 9km, προκάλεσε τη δημιουργία εδαφικών ρωγμών στην περιοχή της Νέας Αγκιάλου. Στην περιοχή εμφανίζεται σημαντικό νεοτεκτονικό ρήγμα με διεύθυνση Α-Δ και νότια κλίση, το οποίο οριοθετεί το προνεογενές υπόβαθρο (κυρίως σχιστόλιθοι και οφιόλιθοι) με την νεογενή-τεταρτογενή λεκάνη. Η ζώνη των επιφανειακών ρωγματώσεων δημιουργήθηκε στο κατερχόμενο τέμαχος του κύριου ρήγματος, σε απόσταση έως και 1,5km από το ίχνος του (Εικόνα 5.8). Η ερμηνεία που δόθηκε για τη θέση εμφάνισης των εδαφικών διαρρήξεων, δηλαδή μέσα στο κατερχόμενο τέμαχος μπροστά από το ίχνος του κύριου ρήγματος, συνοψίζεται στην Εικόνα 5.9. Εν τούτοις, από τους Parazachos et al. (1983) οι ρωγμές θεωρήθηκαν επιφανειακές εκδηλώσεις δευτερευόντων μικρών ρηγματών που δημιουργήθηκαν μέσα στα ιζήματα και είναι παράλληλα προς το σεισμογόνο ρήγμα, το οποίο όμως δεν παρατηρήθηκε στην επιφάνεια.



Εικόνα 5.8. Ίχνη νεοτεκτονικών ρηγματών και επιφανειακών ρωγματώσεων στην περιοχή της Νέας Αγκιάλου, κατά το σεισμό του 1980 (από Parazachos et al. 1983)



Εικόνα 5.9. Σχέση μεταξύ ενεργού κανονικού ρήγματος και παράλληλων εδαφικών ρωγματώσεων σε τομή. 1: υπόβαθρο, 2: αλλούβια, 3: κανονικό ρήγμα, 4: επιφανειακές ρωγματώσεις (από Parazachos et al. 1983)

ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ– 1981

Τον χειμώνα του 1981, στο ανατολικό άκρο του Κορινθιακού κόλπου μια σειρά από τρεις σεισμούς με εστιακά βάθη 3-5km (24 Φεβρουαρίου 1981 – $M_s=6.7$, 25 Φεβρουαρίου - $M_s=6.4$ και 4 Μαρτίου - $M_s=6.3$) προκάλεσαν την ενεργοποίηση ρηγματών στην χερσόνησο της Περαχώρας και στην περιοχή του Καπαρελίου (Εικόνα 5.10). Σύμφωνα με την μελέτη των Ταγμάζ et al (1991) το πρώτο σεισμικό γεγονός συνδέεται με ενεργοποίηση του ρήγματος στο χωριό Πίσσια (Εικόνα 5.11), ενώ το δεύτερο σεισμικό γεγονός αποδίδεται σε ενεργοποίηση του ρήγματος του Σχοίνου, όπως υποστηρίχτηκε και από τη μελέτη των Hubert et al (1996). Κατά τη νύχτα της 24ης προς 25ης Φεβρουαρίου, όταν έγιναν οι δύο κύριοι σεισμοί, ενεργοποιήθηκε τμήμα του ρήγματος μήκους 12-15km στο νότιο τμήμα του κόλπου των Αλκυονίδων. Οι κεντρικές επιφανειακές ρωγμές εμφανίζονται κατά κύριο λόγο συνεχόμενες, εκτός από ένα μικρό τμήμα νότια του οικισμού Πίσσια. Οι μετατοπίσεις φτάνουν τα 150cm αλλά συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 30-70cm. Οι ρωγμές συνήθως βρίσκονται στους ασβεστόλιθους, ή στα όρια τους με αλλούβιακες

αποθέσεις και κώνους κορημάτων, ενώ ασυνεχείς ρωγμές εμφανίζονται να διασχίζουν μια περιοχή αλλούβιων αποθέσεων νότια του οικισμού Περαχώρα.

Κατά το σεισμό της 4ης Μαρτίου εμφανίστηκαν ρηγματώσεις συνολικού μήκους 12km στο βόρειο τμήμα του κόλπου των Αλκυονίδων. Οι διαρρήξεις της 4ης Μαρτίου αποτελούνται από δύο συνεχόμενα τμήματα. Το πρώτο από αυτά ξεκινάει αμέσως νότια από το Καπαρέλλι και σχηματίζει μια συνεχόμενη ρωγμή μήκους 5km. Προέρχεται από επανενεργοποίηση ενός παλαιού ρήγματος. Οι μετατοπίσεις σε αυτό το τμήμα κυμαίνονται σε 50-70cm (Εικόνα 5.12).

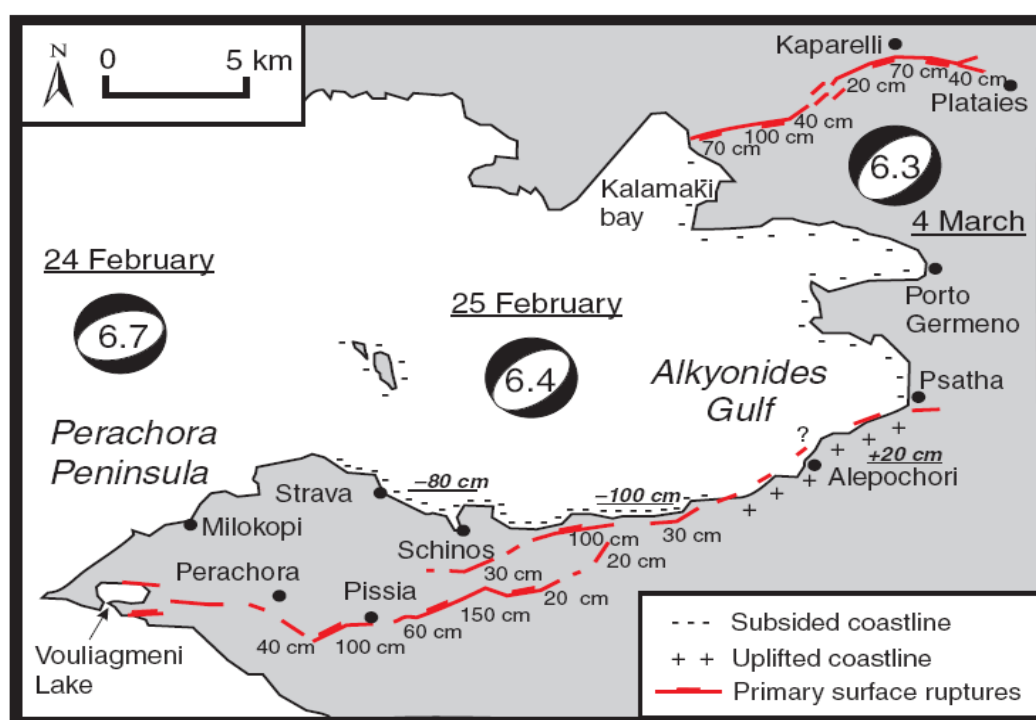


Fig. 5. The 1981 Alkyonides earthquake sequence, eastern Corinth Gulf. View of the epicentral region with emphasis on the primary surface ruptures and coastal uplift/subsidence. Sketch modified from Jackson *et al.* (1982), Mariolakos *et al.* (1982) and Hubert *et al.* (1996).

Εικόνα 5.10. Θέση των epicέντρων των σεισμών του 1981 και των ρηγμάτων στον ανατολικό Κορινθιακό κόλπο



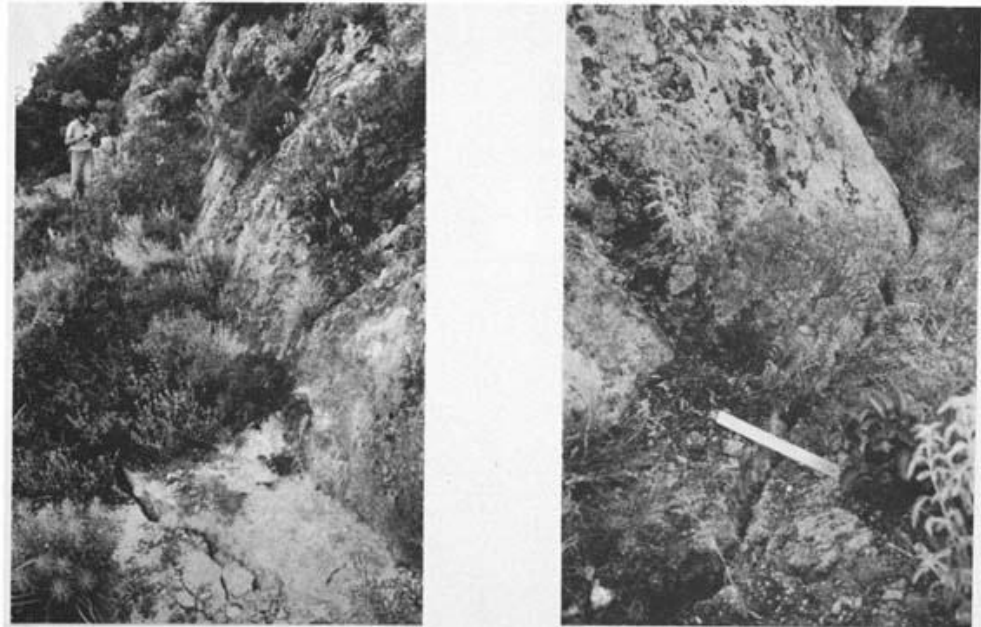
Εικόνα 5.11. Οι σεισμικές ρωγμές που δημιουργήθηκαν μπροστά από την κατοπτρική επιφάνεια του ρήγματος των Πισίων, στην περιοχή της Περαχώρας



Εικόνα 5.12. Η σεισμική διάρρηξη στην περιοχή Καπαρελλίου

ΚΑΛΑΜΑΤΑ – 1986

Ο σεισμός του 1986 στην Καλαμάτα, με μέγεθος $M=6.2$, συνδέθηκε με την επενάδραση ενός κανονικού ρήγματος με διεύθυνση περίπου Β- Ν και δυτική κλίση. Εδαφικές διαρρήξεις εμφανίστηκαν στην περιοχή του χωριού Ελαιοχώρι, μέσα στους ασβεστόλιθους, με μέγιστο μέγεθος μετατόπισης 18cm, σε μηδενική σχεδόν απόσταση από το ίχνος του ρήγματος (Εικόνα 5.13). Μεγαλύτερη διάχυση, σε μια ζώνη συνολικού πλάτους 200 m, λόγω της φύσεως των μη συνεκτικών γεωλογικών σχηματισμών, είχαν οι εδαφικές ρωγμές που παρατηρήθηκαν μέσα στις αλλουβιακές αποθέσεις της πεδιάδας της Καλαμάτας, οι οποίες όμως δεν έχουν άμεση γενετική σχέση με το σεισμικό ρήγμα.



Εικόνα 5.13. Σεισμικές διαρρήξεις στην περιοχή του Ελαιοχωρίου Καλαμάτας (από Lyon-Caen et al. 1988).

ΠΑΤΡΑ– 1989

Η πόλη της Πάτρας χτυπήθηκε τον Αύγουστο του 1989 από σεισμό μεγέθους $M=4.8$, ο οποίος προκάλεσε επιφανειακή ρηγμάτωση, ορατού μήκους 1500m (εικόνες 5.14, 5.15 και 5.16). Στην περιοχή της Πάτρας επικρατούν λεπτομερείς κυρίως προσχώσεις του Τεταρτογενούς οι οποίες καλύπτουν Πλειοστοκαινικά ιζήματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από δύο κύρια συστήματα ρηγμάτων διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ- ΝΑ.

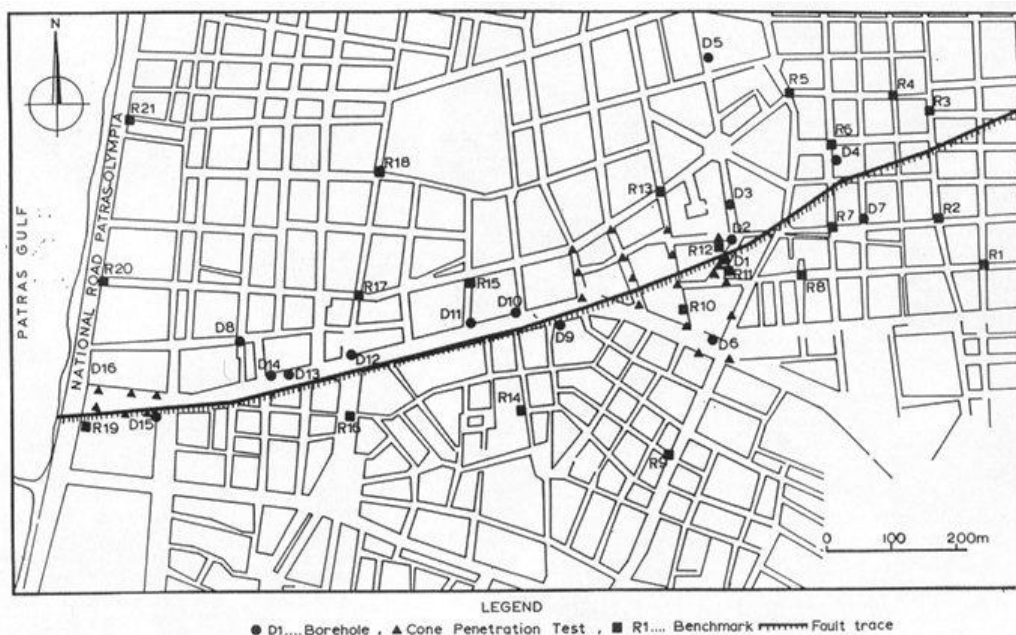


Εικόνα 5.14. Σεισμική διάρρηξη στην πόλη της Πάτρας

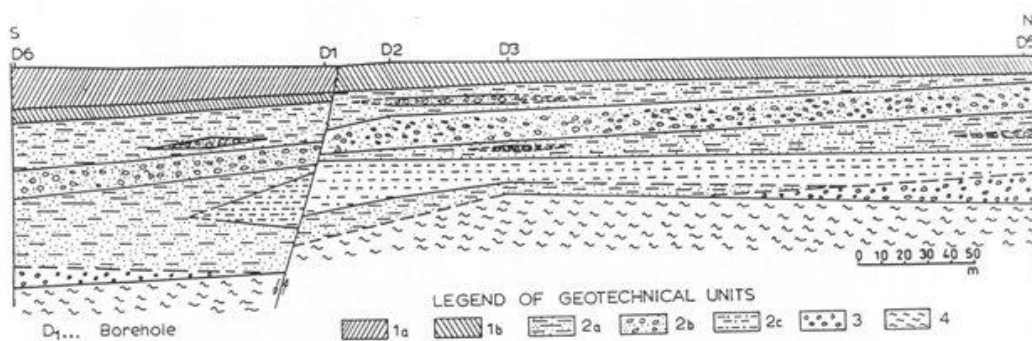


Εικόνα 5.15. Σεισμική διάρρηξη στην πόλη της Πάτρας

Σύμφωνα με τις γεωλογικές και γεωτεχνικές παρατηρήσεις που ακολούθησαν το σεισμό (Kalteziotis et al. 1991) οι εδαφικές διαρρήξεις συνδέονται στενά με την ανάδραση ενός κανονικού ρήγματος διεύθυνσης ΑΒΑ-ΔΝΔ (Εικόνα 5.17). Η ανάδραση του ρήγματος, σε συνδυασμό με τη σεισμική κίνηση, προκάλεσε βλάβες στα κτίρια κατά μήκος του, σε μια στενή ζώνη πλάτους 50m.



Εικόνα 5.16. Χάρτης με το ίχνος της σεισμικής διάρρηξης στην πόλη της Πάτρας (από Kalteziotis et al. 1991)



Εικόνα 5.17. Γεωλογική-γεωτεχνική τομή στην πόλη της Πάτρας όπου φαίνεται το ρήγμα που ανέδρασε με το σεισμό του 1989 (από Kalteziotis et al. 1991)

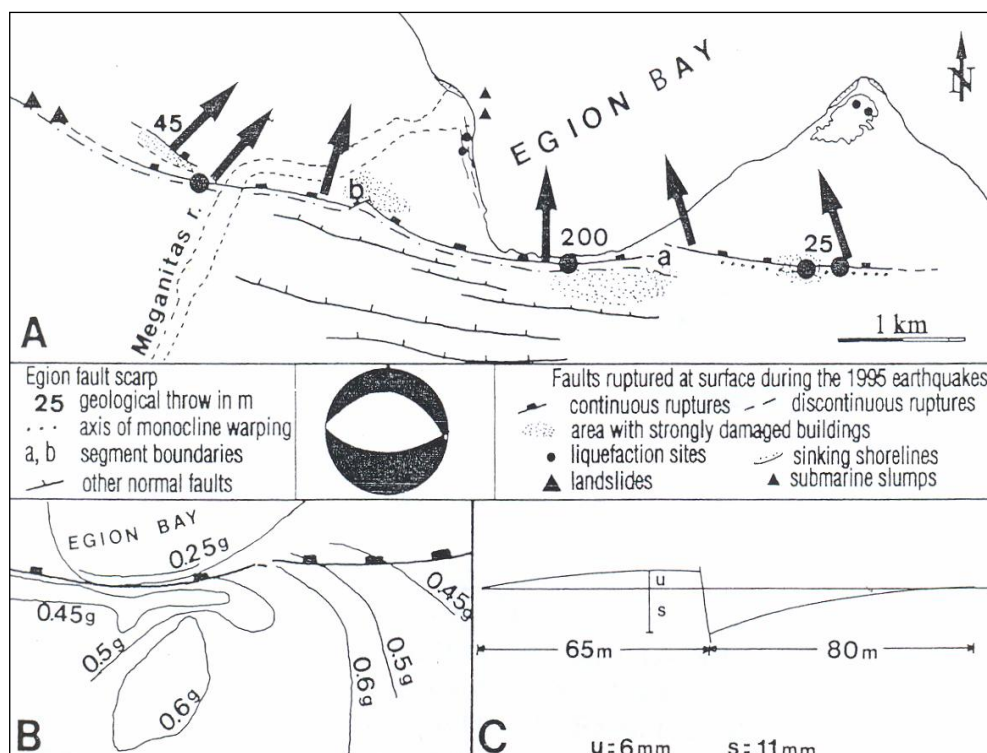
ΑΙΓΙΟ - 1995

Η περιοχή του Αιγίου, όπως και ολόκληρος ο Κορινθιακός κόλπος, παρουσιάζει μεγάλη σεισμικότητα, με συχνούς και καταστροφικούς σεισμούς. Ο σεισμός του 1995, με μέγεθος $M= 6.4$, συνοδεύτηκε από εδαφικές ρωγμές που παρουσίασαν ελάχιστη μετατόπιση, της τάξεως μερικών χιλιοστών έως 2-5cm (Εικόνα 5.18). Το ρήγμα του Αιγίου, με συνολικό μήκος 12km, είναι το βορειότερο χερσαίο ρήγμα μιας σειράς πέντε ρηγμάτων που οριοθετούν την λεκάνη του δυτικού Κορινθιακού κόλπου. Το κατακόρυφο άλμα του ρήγματος φτάνει από 25m ανατολικά της πόλης του Αιγίου, στα 200m στο κέντρο του ρήγματος (Εικόνα 5.19).



Εικόνα 5.18. Σεισμική διάρρηξη στην περιοχή του Αιγίου (από Rondoyanni et al. 2013)

Από την τοποθέτηση τοπογραφικών σταθμών κάθετα στο συνσεισμικό ίχνος του ρήγματος συμπεραίνεται ανύψωση της βάσης του ρήγματος και ταπείνωση της οροφής του. Αυτή η αναλογία ανύψωσης βάσης /ταπείνωσης της οροφής είναι 1:2.



Εικόνα 5.19. **A.** Συνοπτικά δεδομένα των επιφανειακών διαρρήξεων κατά το σεισμό του Αιγίου. Τα έντονα βέλη δείχνουν τη διεύθυνση του ρήγματος του Αιγίου (Roberts και Κουκουβέλας, 1996) και οι έντονες κουκίδες δείχνουν επιλεγμένες περιοχές που έγιναν γεωδαιτικές μετρήσεις κοντά στο ρήγμα. Υπολογισμένα μέγιστα της επιτάχυνσης του εδάφους από την περιοχή του Αιγίου (Βουκονάλας et al, 1996). **C.** Συνοπτικά δεδομένα από τους Γεωδαιτικούς σταθμούς κατά μήκος του ρήγματος του Αιγίου. Η καταβύθιση της οροφής του ρήγματος ($s=11\text{mm}$) και η ανύψωση της βάσης του ρήγματος ($u=6\text{mm}$) δείχνει μια αναλογία $(s/u)\approx 2$ (από Κουκουβέλας, 1997)

5.2 Ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης

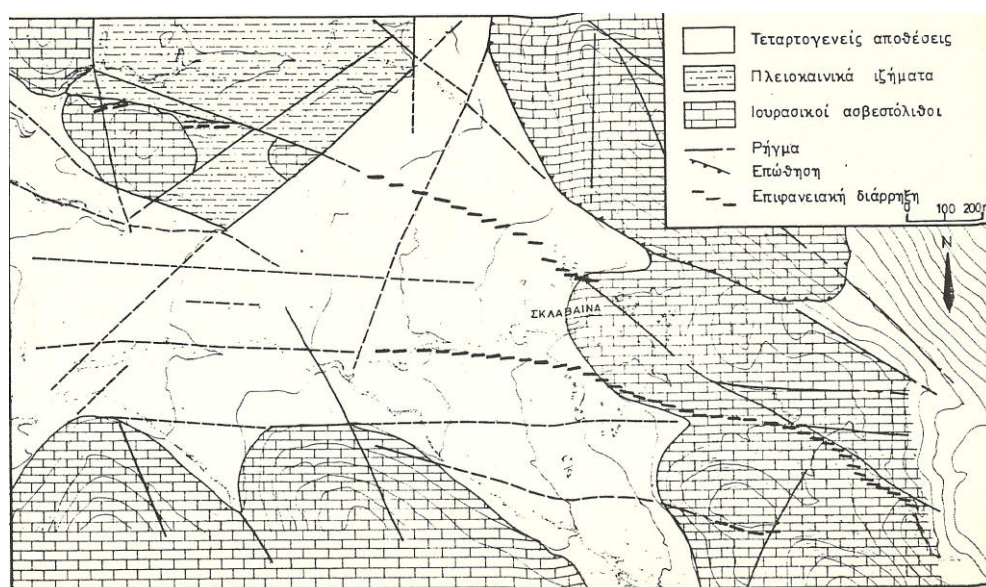
Από τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης που υπάρχουν στην Ελλάδα, τα περισσότερα και μεγαλύτερα βρίσκονται στον υποθαλάσσιο χώρο, οπότε οι εμφανίσεις εδαφικών διαρρήξεων αυτού του τύπου των ρηγμάτων περιορίζονται σε ελάχιστες, στην περιοχή του Ιονίου. Παγκόσμια, μερικά από τα σημαντικότερα ρήγματα που προξενούν ισχυρούς καταστροφικούς σεισμούς είναι ρήγματα οριζόντιας

ολίσθησης. Στο γεγονός αυτό οφείλεται και το ότι τα ρήγματα αυτά είναι τα περισσότερο μελετημένα, και οι αποστάσεις ασφαλείας, που έχουν αναφερθεί προηγουμένως, στη ζώνη των σεισμικών ρηγμάτων αφορούν τέτοιου τύπου δομές.

ΑΚΑΡΝΑΝΙΑ, 1983

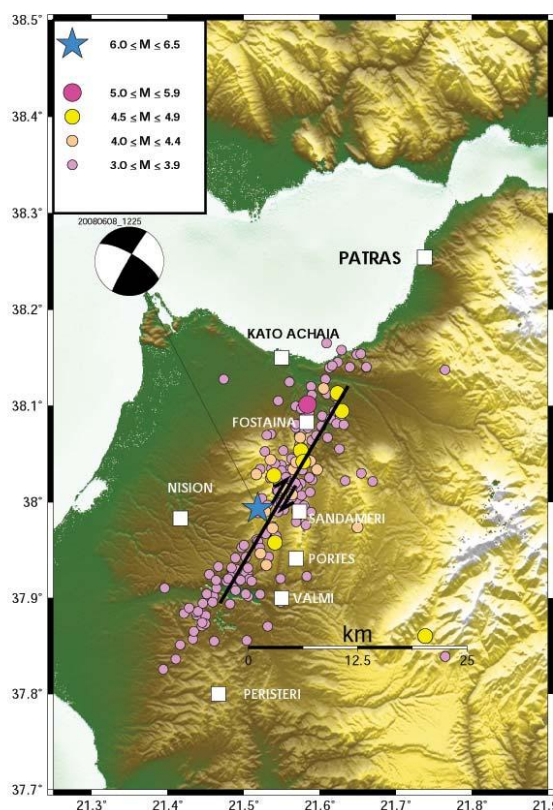
Το Μάρτιο του 1983 έγιναν δύο σεισμοί στην περιοχή της Ακαρνανίας, μεγέθους $M=5.4$ και $M=5.3$ αντίστοιχα. Ο πρώτος σεισμός είχε εστιακό βάθος περί τα 3km ενώ ο δεύτερος είχε βάθος 5km. Η επικεντρική περιοχή δομείται από μεσοζωϊκούς ασβεστόλιθους και μεταλλικά ιζήματα, που είναι μάργες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, ψαμμίτες και κροκαλοπαγή του Πλειόκαινου. Αυτοί καλύπτονται από σύγχρονες και πρόσφατες αποθέσεις από αργιλοαμμώδη υλικά πάχους μεγαλύτερου από 20m, ενώ εμφανίζονται και σημαντικού πάχους αλλουβιακές αποθέσεις.

Από τους σεισμούς αυτούς δημιουργήθηκαν δύο κύριες ζώνες επιφανειακών ρωγματώσεων, μήκους 1800m και 1700m και μια δευτερεύουσα της τάξης των 350m. Η κάθε ζώνη είχε 2-3m πλάτος και κλιμακωτή διάταξη (en echelon) αποτελούμενη από μικρές ρωγμές μήκους 3-4m. Η οριζόντια μετατόπιση στις ρωγμές ήταν μέχρι 10cm και η κατακόρυφη, πολύ μικρή, μέχρι 5cm.



Εικόνα 5.22. Χάρτης επιφανειακών ρωγματώσεων

Το 2008, ισχυρή σεισμική δόνηση μεγέθους $M=6.5$ με επίκεντρο 35km περίπου νοτιοδυτικά της Πάτρας, έγινε ιδιαίτερα αισθητή σε μεγάλο μέρος της χώρας. Το εστιακό βάθος του σεισμού, αν και υπολογίστηκε αρχικά στα 3km, στη συνέχεια, μετά από αξιολόγηση περισσότερων καταγραφών επανεκτιμήθηκε στα 31km. Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.39, η κατανομή των επικέντρων δείχνει να ακολουθεί μία ζώνη με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ η οποία είναι σε καλή συμφωνία με τον μηχανισμό γένεσης του σεισμού. Το μπλε άστρο δείχνει την θέση του επικέντρου ενώ τα άσπρα τετράγωνα τις θέσεις οικισμών στους οποίους παρατηρήθηκαν βλάβες. Η μαύρη γραμμή παριστάνει το ρήγμα του σεισμού όπως προκύπτει από τη κατανομή των επικέντρων.



Εικόνα 5.39. Γεωγραφική κατανομή των επικέντρων των μετασεισμών της Ανδραβίδας με μέγεθος $3.0 \leq M \leq 5.0$. Το επίκεντρο του κύριου σεισμού παριστάνεται με αστέρι ενώ δίνεται επίσης και ο μηχανισμός γένεσης. Τα άσπρα τετράγωνα παριστάνουν θέσεις όπου παρατηρήθηκαν βλάβες σε κατασκευές

Από το σεισμό προκλήθηκαν διάφορες ζώνες επιφανειακών ρωγματώσεων, στους νεογενείς και τεταρτογενείς σχηματισμούς. Μία απο αυτές, στο χωριό Νησί, είχε μήκος 6km και κάθετη μετατόπιση 25cm. Μια άλλη ζώνη, στο Μικροχώρι, είχε μήκος 4km πλάτος και 500m, ενώ και μια τρίτη ζώνη εμφανίστηκε κοντά στο χωριό Μιχόι (Εικόνες 5.40, 5.41 και 5.42). Λαμβάνοντας υπόψη ότι το πλάτος της ζώνης παραμόρφωσης στο Μικροχώρι είναι υπερβολικό μεγάλο σε σχέση με το μέγεθος του σεισμού και ιδιαίτερα με το μήκος του τμήματος του ρήγματος που ανέδρασε στην περιοχή αυτή, δημιουργείται μεγάλος προβληματισμός ως προς την τεκτονική φύση των συγκεκριμένων επιφανειακών διαρρήξεων.



Εικόνα 5.40. Επιφανειακή ρωγμάτωση με κάθετη μετατόπιση 25 cm και οριζόντια 10 cm



Εικόνα 5.41. Μέρος των επιφανειακών ρωγματώσεων στο χωριό Νησί



Εικόνα 5.43: Επιφανειακή ζώνη ρωγματώσεων Δυτικά του χωριού Μιχόι

EDGE CUMBE, ΝΕΑΣ ΖΗΛΑΝΔΙΑΣ - 1987

Ο σεισμός μεγέθους $M=6,3$ του 1987, είχε επίκεντρο 15km βορειοδυτικά από την πόλη του Edgcumbe της Νέας Ζηλανδίας και εστιακό βάθος 8km. Από το σεισμό προκλήθηκε ζώνη επιφανειακών ρωγματώσεων μήκους 7km, με μέγιστη κάθετη μετατόπιση 2m και το πλάτος της ζώνης 15m (Εικόνες 5.23, 5.24 και 5.25).



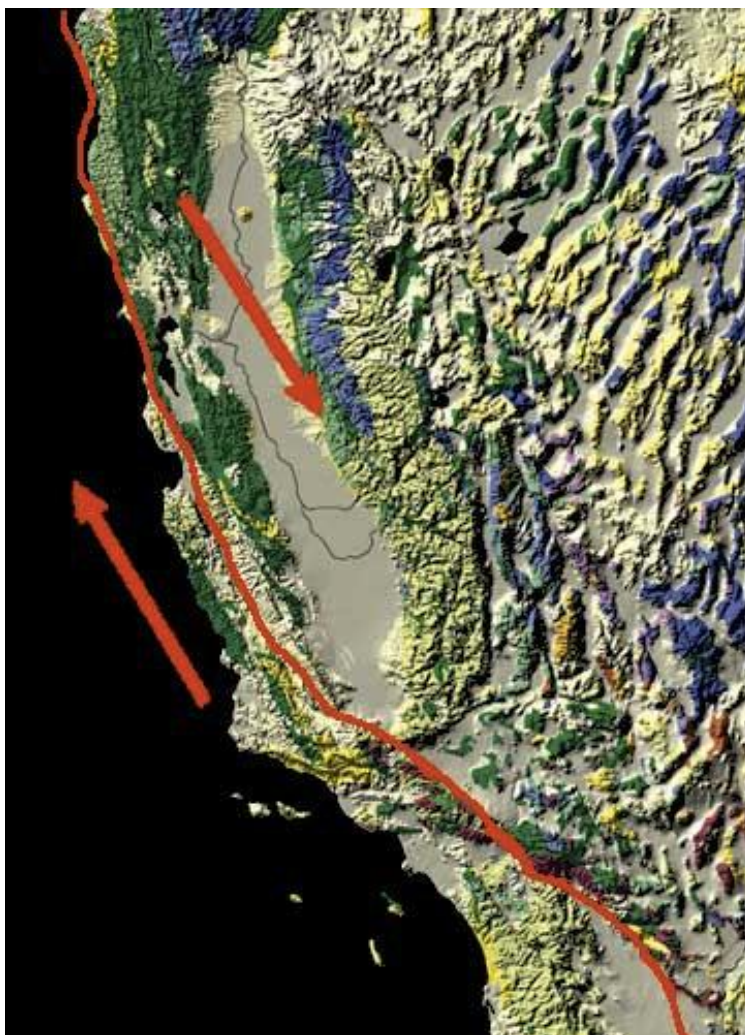
Εικόνα 5.25. Αεροφωτογραφία στην οποία φαίνεται η ανάπτυξη των σεισμικών διαρρήξεων στην περιοχή του Edgcumbe



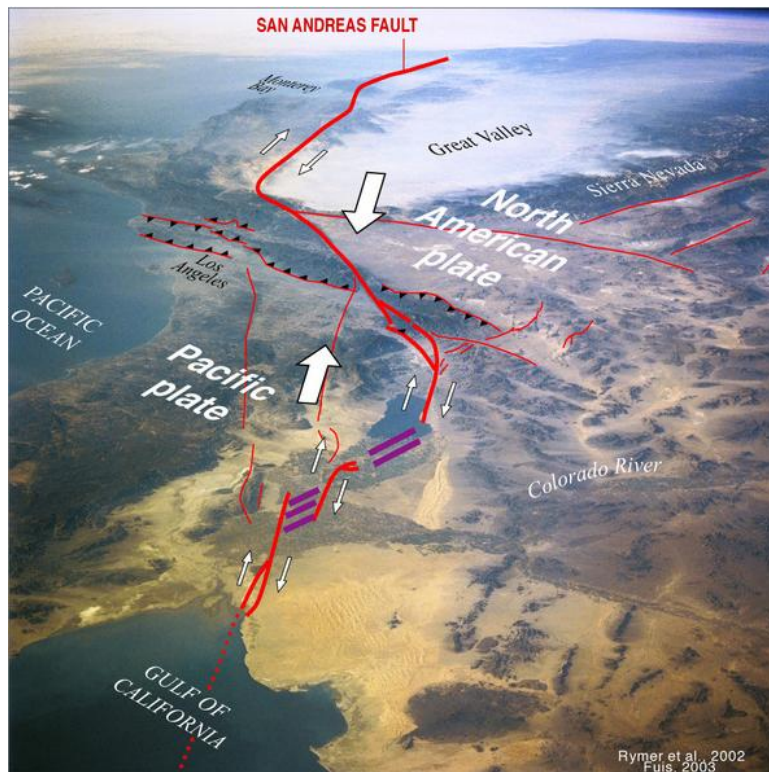
Εικόνα 5.23 και 5.24. Απόψεις των επιφανειακών ρωγματώσεων όπου διακρίνεται το μέγεθος της οριζόντιας και κάθετης μετατόπισης (οι άνθρωποι για κλίμακα)

LOMA PRIETA, 1989

Ο σεισμός της Loma Prieta Καλιφόρνιας, το 1989, είχε μέγεθος $M=7.1$. Το εστιακό βάθος ήταν 18km και το επίκεντρο πολύ κοντά στην πόλη Loma Prieta. Υπεύθυνο για το σεισμό αυτό ήταν το ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης του Αγ. Ανδρέα (San Andreas fault), το οποίο έχει συνολικό μήκος 1300km και αποτελεί όριο τεκτονικών πλακών. Με το σεισμό δημιουργήθηκε μια ζώνη επιφανειακών ρωγματώσεων μήκους 40km και πλάτους περίπου 4-5m κατά μήκος της οποίας η οριζόντια μετατόπιση έφθανε το 1.5m (εικόνες 5.26, 5.27, 5.28).



Εικόνα 5.26. Το ρήγμα San Andreas



Εικόνα 5.27. Επίκεντρο του σεισμού Loma Prieta και η ζώνη των σεισμικών ρωγματώσεων κατα μήκος του ρήγματος San Andreas



Εικόνα 5.28. Πλάτος των επιφανειακών ρωγματώσεων που δημιουργήθηκαν απο το σεισμό της Loma Prieta 1989

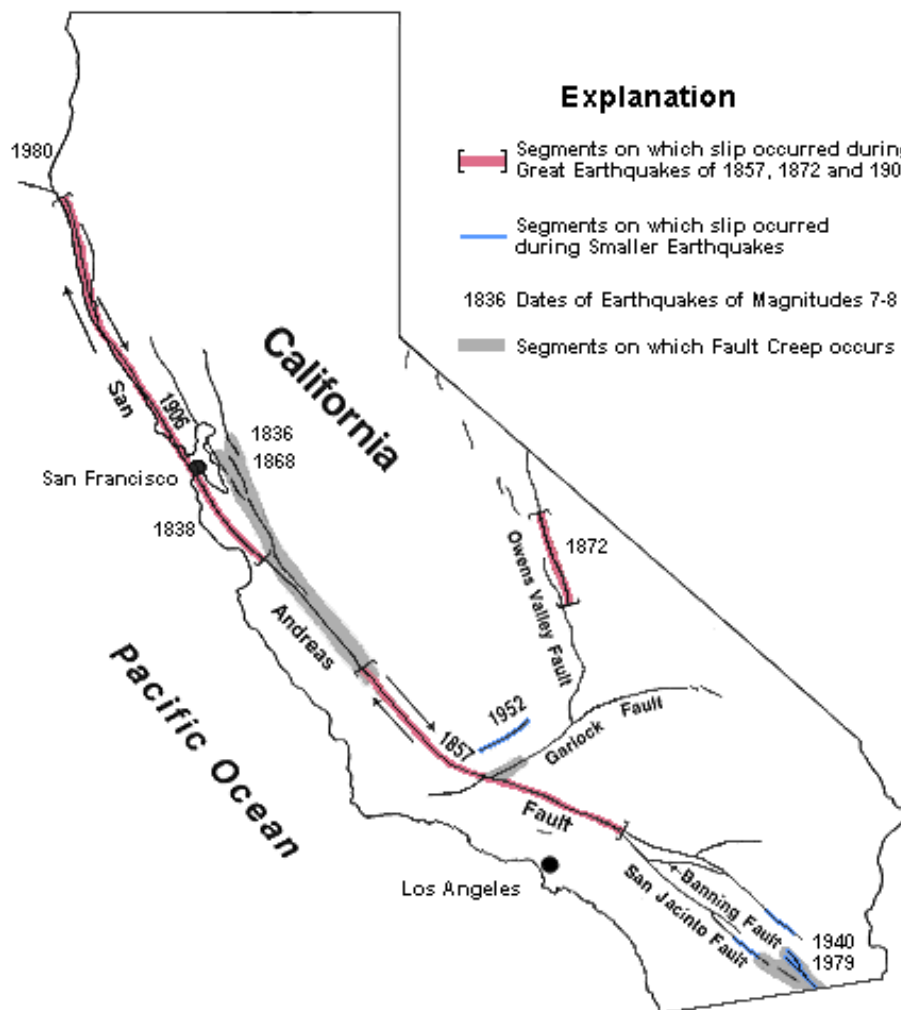
LANDERS AND BIG BEAR, 1992

Ο ισχυρότερος σεισμός των τελευταίων 40 χρόνων στην Αμερική, συνέβη στις 28 Ιουνίου 1992 στη βόρεια Καλιφόρνια, και προκλήθηκε και αυτός από το ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης του Αγ. Ανδρέα. Το μέγεθος του σεισμού ήταν $M=7,4$ και το εστιακό του βάθος 3,2km.

Από το σεισμό δημιουργήθηκε μια ζώνη επιφανειακών ρωγματώσεων μήκους 85km και πλάτους 3-36m, στην οποία η οριζόντια μετατόπιση ήταν της τάξεως των 6m (εικόνα 5.29).



Εικόνα 5.30 Επιφανειακές σεισμικές διαρρήξεις και αστοχίες σε δρόμους στη διέλευση του ρήγματος του σεισμού Landers and Big Bear

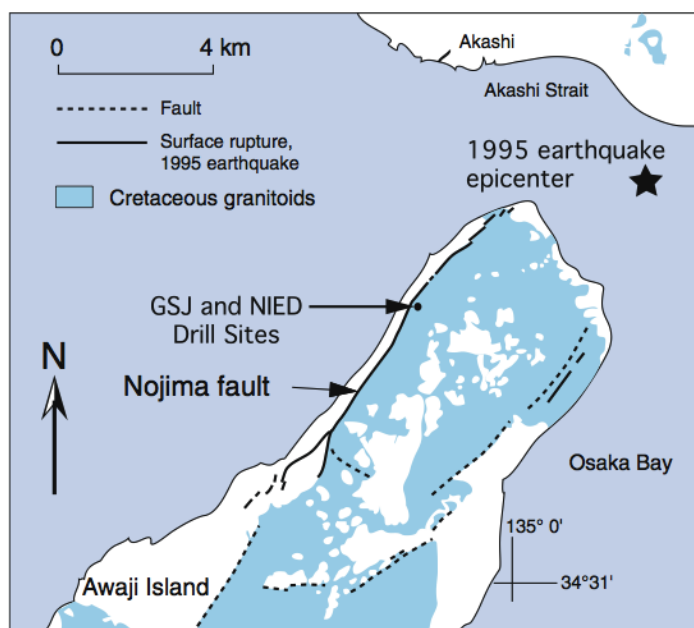


Εικόνα 5.31. Χάρτης του ρήγματος San Andreas με τις χρονολογίες των σεισμών κατά μήκος του. Με κόκκινο χρώμα τα τμήματα που ανέδρασαν και έδωσαν ισχυρούς σεισμούς, με γαλάζιο αυτά που συνδέονται με μικρότερους σεισμούς

ΚΟΒΕ ΙΑΠΩΝΙΑΣ, 1995

Ο σεισμός του Kobe του 1995, με μέγεθος $M=6,8$ και επίκεντρο 20km βόρεια από την πόλη του Kobe, είχε εστιακό βάθος 16km. Ήταν ένας «απρόβλεπτος» σεισμός, αφού στην περιοχή ο προηγούμενος σεισμός είχε να συμβεί τουλάχιστον 400 χρόνια. Έτσι έδωσε μαθήματα στους γεωεπιστήμονες ότι σε περιοχές με ενεργά ρήγματα μελλοντικοί σεισμοί πρέπει να θεωρούνται βέβαιοι, ακόμη και αν τα σεισμολογικά δεδομένα δείχνουν σεισμική ηρεμία για εκατοντάδες χρόνια. Αντίστοιχη περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί ο σεισμός της Αθήνας του 1999, ο οποίος επίσης προκάλεσε έκπληξη στην επιστημονική κοινότητα.

Το σεισμικό ρήγμα ήταν το ρήγμα Nojima, το οποίο έχει μήκος 9km (εικόνα 5.32). Με το σεισμό προκλήθηκε επιφανειακή διάρρηξη μήκους 9km, κατά μήκος της οποίας η μετατόπιση 7m. Το πλάτος της ζώνης εμφάνισης των εδαφικών ρωγμών έφθανε τα 30m.



Εικόνα 5.32. Χάρτης που απεικονίζει το ρήγμα Nojima, το επίκεντρο και τις επιφανειακές ρωγματώσεις που προκλήθηκαν από το σεισμό



Εικόνα 5.33. Καταστροφές σε αυτοκινητόδρομους (a,c) και σε κτίρια (b) με το σεισμό του Kobe.

IZMIT -DULCE, 1999

Ο σεισμός που έπληξε την βορειοδυτική Τουρκία το 1999 είχε μέγεθος $M=7.4$ και επίκεντρο 11km νοτιοανατολικά της πόλης Izmit, σε απόσταση 90km από την Κωνσταντινούπολη. Το εστιακό βάθος είναι 17km. Ο σεισμός προκλήθηκε από το σύστημα ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης της Βορείας Ανατολίας (North Anatolian Fault), το οποίο έχει συνολικό μήκος 1200km (Εικόνα 5.34) και παρουσιάζει μέσο μέγεθος οριζόντιας ολίσθησης 5,5m. (Εικόνα 5.35). Από το σεισμό, εκτός από τις υπόλοιπες έντονες εδαφικές παραμορφώσεις (ρευστοποιήσεις, κατολισθήσεις, κ.α.) προκλήθηκε μια ζώνη επιφανειακών διαρρήξεων μήκους 120km και πλάτους περίπου 200m.



Εικόνα 5.34. Χάρτης όπου παρουσιάζεται το σύστημα ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης της Τουρκίας



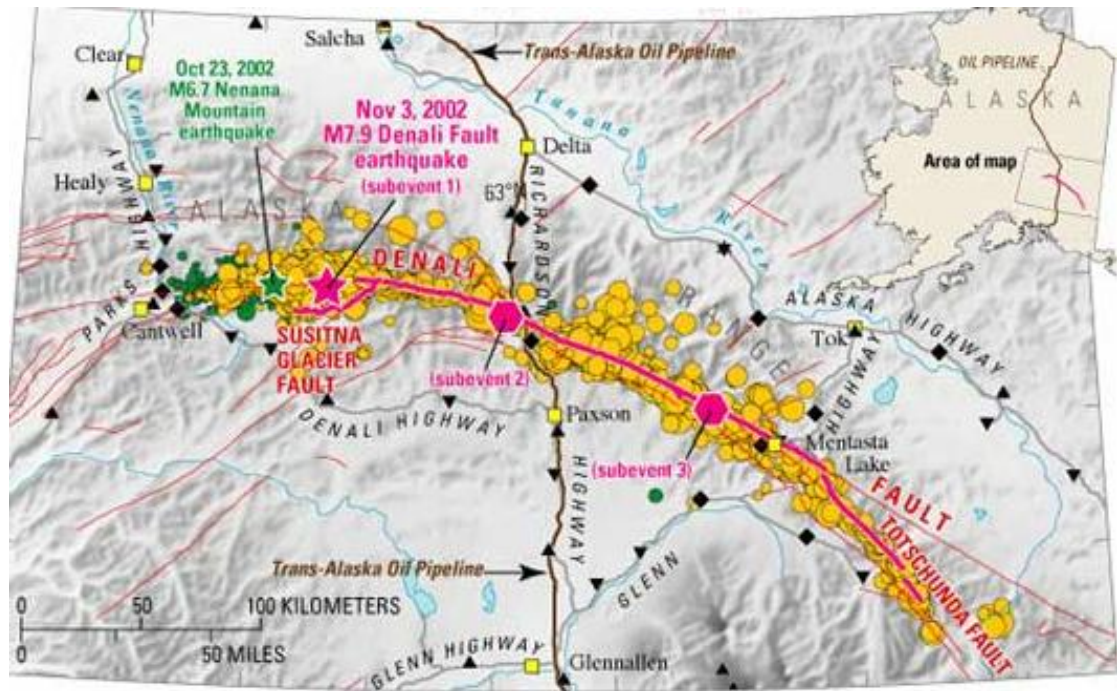
Εικόνα 5.34. Μετατόπιση του δρόμου και ζημιές σε σπίτια στις θέσεις ιέλευσης του σεισμικού ρήγματος του 1999



Εικόνα 5.36. Παραμόρφωση της σιδηροδρομικής γραμμής με το σεισμό του 1999, νοτιοανατολικά της πόλης Izmit

ALASKA, 2002

Το 2002 σημειώθηκε σεισμός μεγέθους $M=7.9$ με επίκεντρο 66km νοτιοανατολικά του Denali National Park της Αλάσκας (Εικόνα 5.37) και εστιακό βάθος ήταν 5km. Το ρήγμα Denali είναι ένα μεγάλο ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης, με συνολικό μήκος 700km. Με το σεισμό εκδηλώθηκαν επιφανειακές διαρρήξεις σε μια ζώνη μήκους 336km και πλάτους 100m (εικόνες 5.37 α και 5.37 β). Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η ανάδραση του ρήματος αυτού απέδειξε την αποτελεσματικότητα των σεισμοτεκτονικών μελετών, με την αξιολόγηση των ρηγμάτων και τον ασφαλή σχεδιασμό των τεχνικών έργων και των αγωγών ενέργειας (εικόνα 5.38).



Εικόνα 5.37α Χάρτης με το ρήγμα (Denali) και τα επίκεντρα των μετασεισμών κατά μήκος του.



Εικόνα 5.37β. Επιφανειακές διαρρήξεις με το σεισμό της Αλάσκας



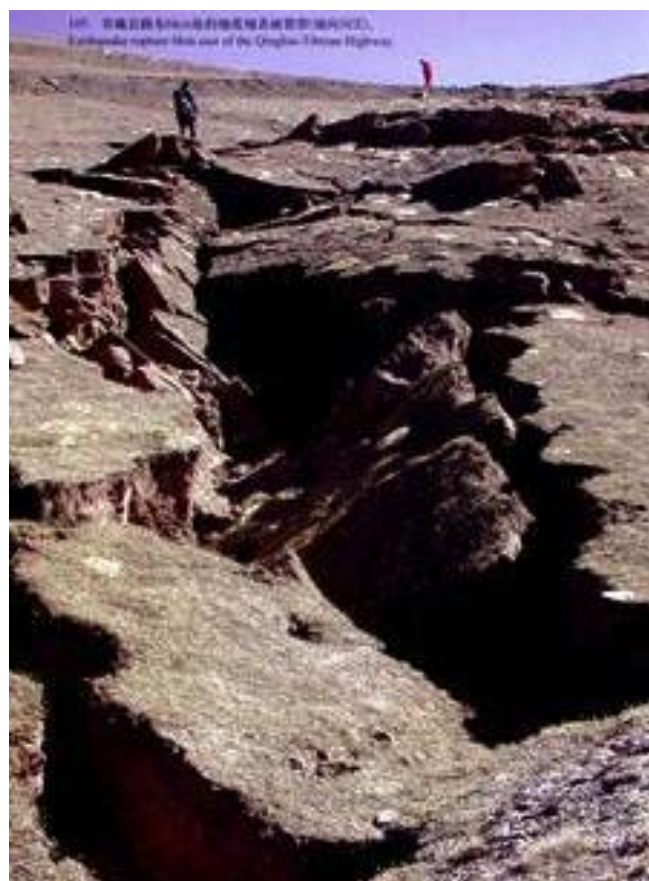
Εικόνα 5.38. Αντισεισμική κατασκευή αγωγού φυσικού αερίου στη περιοχή του ρήγματος Denali

ΘΙΒΕΤ - 2001

Το 2001 σημειώθηκε σεισμός μεγέθους $M=7,8$ με επίκεντρο στο βόρειο τμήμα του Θιβέτ και εστιακό βάθος 15km. Ο σεισμός συνδέεται με την ανάδραση του ρήγματος Kunlun, που είναι ένα μεγάλο αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης, με συνολικό μήκος μήκους 1500km (Εικόνα 5.44). Κατά τη διάρκεια του σεισμού δημιουργήθηκε μια ζώνη επιφανειακών ρωγματώσεων μήκους 400km και πλάτους 500m, όπου η οριζόντια μετατόπιση έφθανε και τα 10m.



Εικόνα 5.44. Δορυφορική φωτογραφία στην οποία φαίνονται τα κύρια ρήγματα στο πλατώ του Θιβέτ



Εικόνα 5.45. Φωτογραφία από την ύπαιθρο στην οποία φαίνεται η κλίμακα των επιφανειακών ρωγματώσεων του σεισμού του Θιβέτ

CANTERBURY ΝΕΑΣ ΖΗΛΑΝΔΙΑΣ - 2010

Ισχυρός σεισμός μεγέθους $M=7.1$ έπληξε στις 4/9/2010 την περιοχή του Christchurch-Canterbury Νέας Ζηλανδίας. Ο σεισμός, σύμφωνα με την Γεωλογική Υπηρεσία της Νέας Ζηλανδίας, είχε εστιακό βάθος 10km και συνοδεύτηκε από την εκδήλωση σεισμοτεκτονικής παραμόρφωσης που εμφανίστηκε μέσα στις ημισυνεκτικές τεταρτογενείς αποθέσεις της περιοχής. Πρόκειται για ένα αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης, με συνολικό μήκος 40km και πλάτος επιφανειακών ρωγματώσεων κυμαινόμενο από 10 έως 300m (Εικόνα 5.46).



Εικόνα 5.46. Γεωλογικός χάρτης τμήματος της περιοχής του Canterbury, δυτικά του Christchurch. Με γαλάζιο και πράσινο χρώμα απεικονίζεται το υπόβαθρο, με ιώδες τα ηφαιστειακά πετρώματα και με κίτρινο το κάλυμμα των τεταρτογενών ιζημάτων. Με λευκό χρώμα οι πολύ πρόσφατες ποτάμιες αποθέσεις (από Μαρίνο κ. α. 2010).



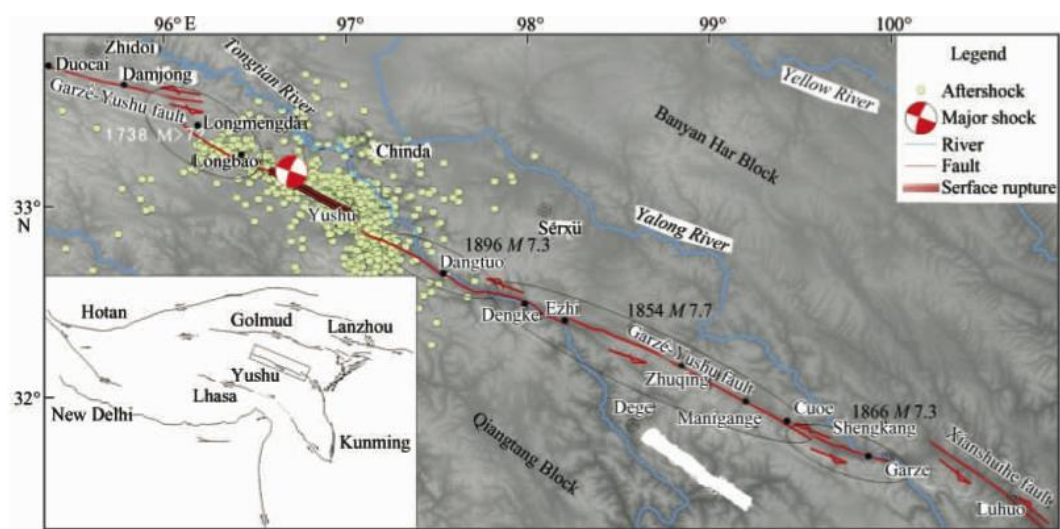
Εικόνα 5.47. Οριζόντια μετατόπιση δρόμου και δενδροστοιχίας στη διέλευση του ρήγματος στο Christchurch



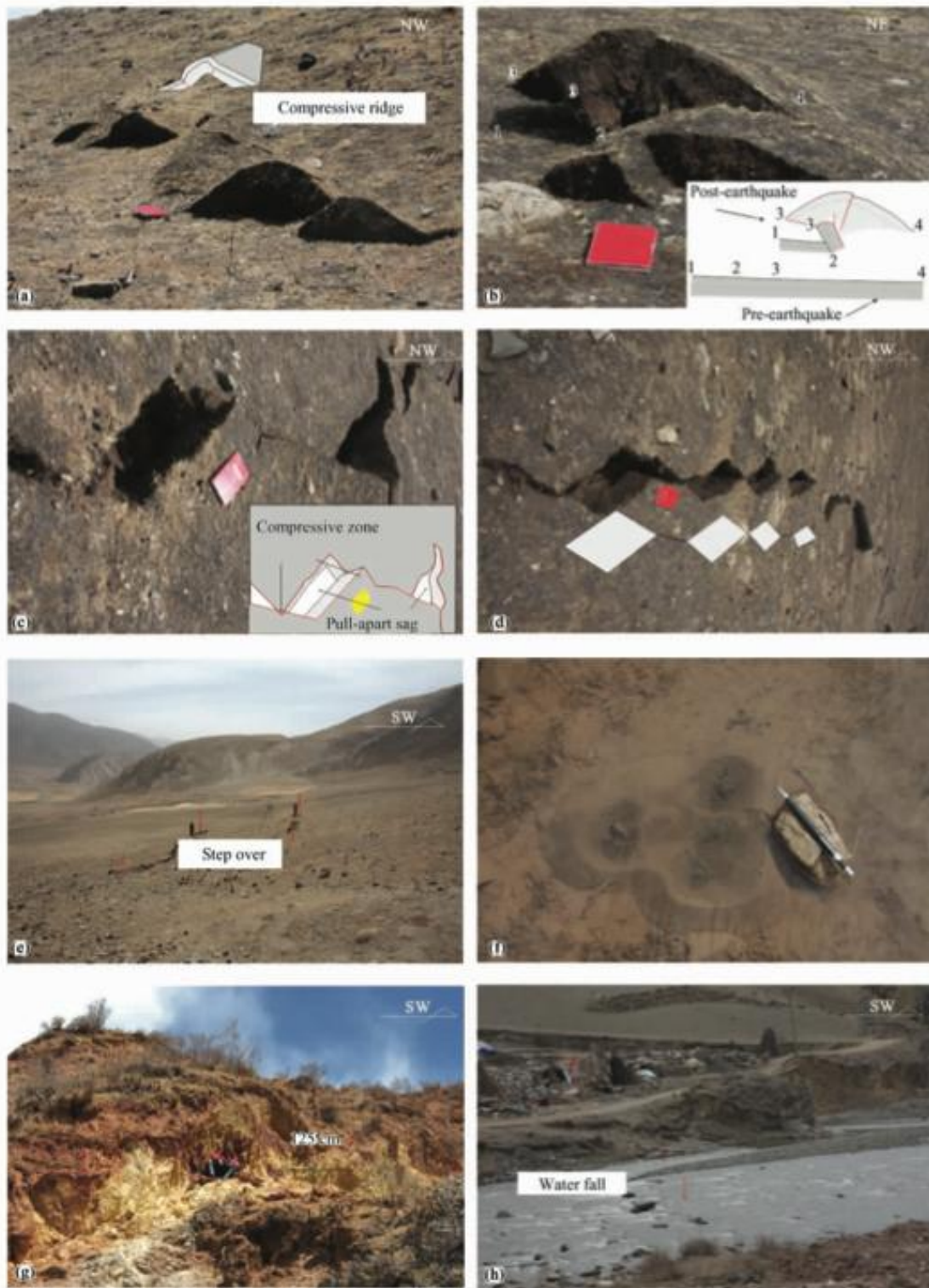
Εικόνα 5.48. Η ζώνη της εδαφικής παραμόρφωσης στην επιφανειακή εκδήλωση του σεισμικού ρήγματος του Canterbury

YUSHU KINA - 2010

Ο σεισμός του 2010 στην περιοχή Yushu της Κίνας είχε μέγεθος $M=7.1$ και εστιακό βάθος 14km. Το σεισμογόνο ρήγμα ήταν ένα αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης, με μικρή ανάστροφη συνιστώσα, που έχει μήκος 31km. Από το σεισμό δημιουργήθηκε μια ζώνη επιφανειακών ρωγματώσεων συνολικού μήκους περίπου 33km και πλάτος περί τα 50m (Εικόνες 5.49 και 5.50). Η ζώνη αυτή χωριζόταν σε τρία τμήματα όπου μεταξύ του βόρειου και μεσαίου τμήματος υπήρχε μια ζώνη μήκους 16km που δεν παρατηρήθηκε επιφανειακή διάρρηξη.

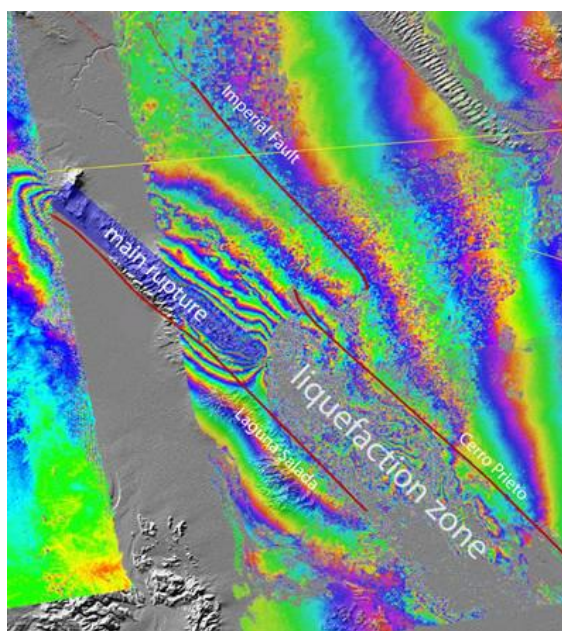


Εικόνα 5.49. Η σεισμοτεκτονική δομή (κόκκινη γραμμή) και τα επίκεντρα των σεισμών (κίτρινες τελείες) κατά μήκος του ρήγματος Yushu



Εικόνα 5.50. Βασικοί τύποι επιφανειακών ρωγματώσεων και εδαφικών παραμορφώσεων που δημιουργήθηκαν απο το σεισμό στη περιοχή Yushu

Το 2010 ισχυρός σεισμός μεγέθους $M=7.8$ και εστιακού βάθους 10km σημειώθηκε στην περιοχή Baja California του Μεξικού, 63km νοτιανατολικά της πόλης Calxico. Κατά μήκος του σεισμογόνου ρήγματος Laguna Salada παρατηρήθηκε οριζόντια μετατόπιση 3m (Εικόνα 5.51). Από το σεισμό προκλήθηκε επίσης μια ζώνη ρευστοποίησης 1080km² και μια ζώνη επιφανειακών ρωγματώσεων μήκους 120km και πλάτους 150m.



Εικόνα 5.51. Δορυφορική εικόνα στην οποία απεικονίζονται οι κροσσοί παραμόρφωσης της περιοχής Baja California, η κύρια διάρρηξη και μια πολύ εκτεταμένη ζώνη ρευστοποιήσεων



Εικόνα 5.52. Επιφανειακές διαρρήξεις του σεισμού του Μεξικού

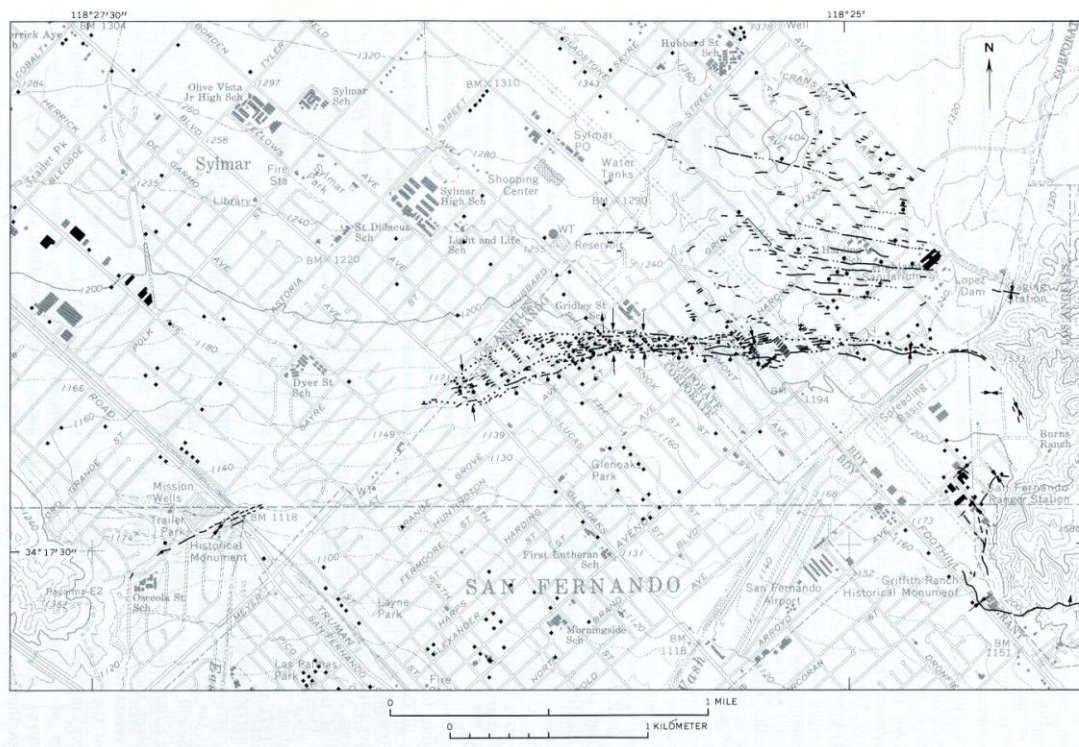
5.3 Ανάστροφα ρήγματα

Τα ανάστροφα ρήγματα, τα μεγαλύτερα από τα οποία απαντούν κυρίως σε περιοχές σύγκρουσης λιθοσφαιρικών πλακών, συνδέονται συνήθως με πολύ ισχυρούς σεισμούς και μεγάλες εδαφικές παραμορφώσεις. Στην Ελλάδα δεν έχουν καταγραφεί έως τώρα στην ξηρά σεισμικές διαρρήξεις που να συνδέονται αποδεδειγμένα με ανάστροφα ρήγματα.

SAN FERNANDO (Η.Π.Α.) - 1971

Ο σεισμός του San Fernando, το 1971, είχε μέγεθος $M=6,6$ και βάθος 13km. Το επίκεντρο του σεισμού ήταν 14km βόρεια της πόλης του San Fernando. Ο σεισμός αυτός προκλήθηκε από τη ζώνη ρημάτων του San Fernando, η οποία αποτελείται από ανάστροφα ρήγματα συνολικού μήκους 17km.

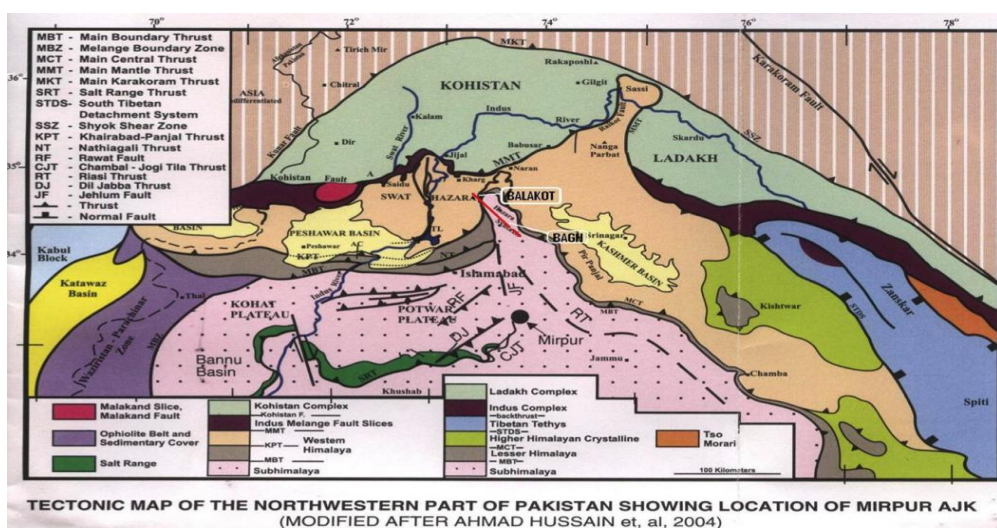
Με το σεισμό συνδέεται η εμφάνιση πάνω από 19km μη συνεχόμενων επιφανειακών ρωγματώσεων πλάτους 250m, το οποίο σε ορισμένα σημεία έφθασε τα 1250m (εικόνα 5.20).



Εικόνα 5.20. Χάρτης της περιοχής του San Fernando με τις σεισμικές διαρρήξεις που διασχίζουν κατοικημένες περιοχές. Είναι εμφανές ότι η πλειονότητα των ζημιών στα κτίρια συγκεντρώνεται κατά μήκος του ίχνους των διαρρήξεων αυτών

TAIWAN - 1999

Το 1999 σημειώθηκε σεισμός μεγέθους $M=7.6$, με επίκεντρο 150km νοτιοδυτικά της Ταιpei και εστιακό βάθος 8km. Ο σεισμός προκλήθηκε από το ανάστροφο ρήγμα Chelungru, μήκους 90km. Με το σεισμό εμφανίστηκε μια ζώνη επιφανειακών ρωγματώσεων μήκους 85km και πλάτους περίπου 120m, με κάθετη μετατόπιση της τάξεως των 8m (Εικόνα 5.53).



Εικόνα 5.53. Γεωλογικός χάρτης στον οποίο διακρίνεται το ρήγμα Chelongru (με γαλάζιο χρώμα) και τμήμα των επιφανειακών ρωγματώσεων (με κόκκινο χρώμα)



Εικόνα 5.54. Φωτογραφία από το σεισμό της Ταιwan, όπου διακρίνεται το πλάτος της ζώνης των επιφανειακών ρωγματώσεων



Εικόνα 5.55. Επιφανειακές ρωγματώσεις από το σεισμό της Taiwan

KASHMIR - 2005

Τον Οκτώβριο του 2005, σεισμός μεγέθους $M=7.6$, με επίκεντρο την πόλη Muzaffarabad του Κασμίρ και εστιακό βάθος 15km, προκλήθηκε από το ανάστροφο ρήγμα Balakot-Bagh (Εικόνα 5.56). Με το σεισμό εκδηλώθηκαν ζώνες επιφανειακών ρωγματώσεων μήκους 75km και πλάτους 300m, όπου παρατηρήθηκαν μετατοπίσεις της τάξεως των 7m (Εικόνα 5.57).



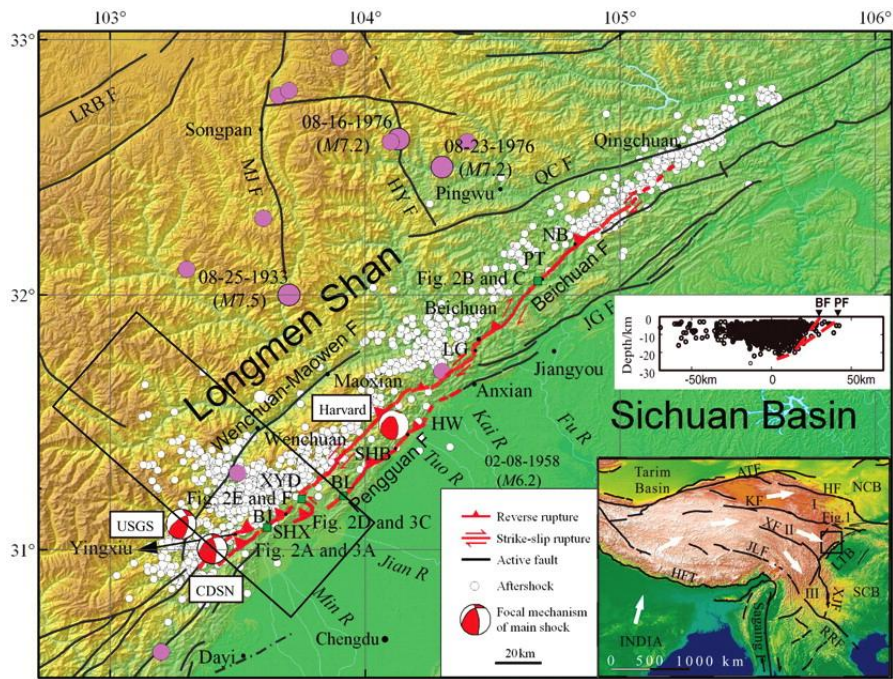
Εικόνα 5.56. Τεκτονικός χάρτης του βορειοδυτικού Pakistan με το ρήγμα Balakot (με γαλάζιο χρώμα) και τις σεισμικές διαρρήξεις (με κόκκινο χρώμα)



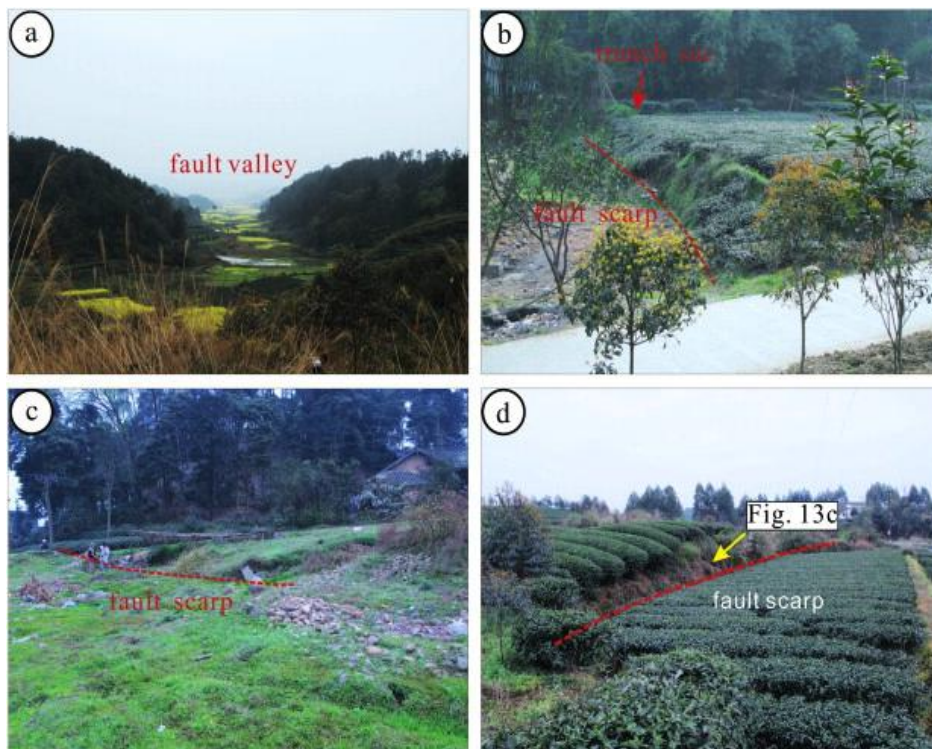
Εικόνα 5.57. Άποψη των σεισμικών διαρρήξεων που συνδέονται με το σεισμό του 2005 και το ρήγμα Balakot του βορειοδυτικού Pakistan

WENCHUAN - 2008

Ο σεισμός μεγέθους $M=7.9M$ που έπληξε το Wenchuan της Κίνας, το 2008, είχε επίκεντρο 80km ΒΔ του Chengdu και εστιακό βάθος 19km. Ο σεισμός συνδέεται με την ανάδραση τμήματος της ρηξιγενούς ζώνης Daxingxi, η οποία αποτελείται από ανάστροφα ρήγματα, με μικρή συνιστώσα οριζόντιας ολίσθησης, που βρίσκεται στην επαρχία Sichuan της Κίνας. Με το σεισμό συνδέεται η εκδήλωση επιφανειακών διαρρήξεων τόσο στις πρόσφατες αποθέσεις, όσο και σε σχηματισμούς του υποβάθρου. Αυτές ακολούθησαν μια ζώνη μήκους 240km, κατά μήκος του ρήγματος Beichuan και μια ζώνη μήκους 72km, κατά μήκος του ρήγματος Pengguan, που είναι δύο από τα τρία δευτερογενή υποπαράλληλα σκέλη του κύριου ρήγματος. Το πλάτος της ζώνης των επιφανειακών ρωγματώσεων κυμαινόταν από 10 έως 15m.



Εικόνα 5.58. Χάρτης της περιοχής Longmen Shan, με τα ίχνη των ρηγμάτων (μαύρες γραμμές) και τις σεισμικές διαρρήξεις (κόκκινες γραμμές)



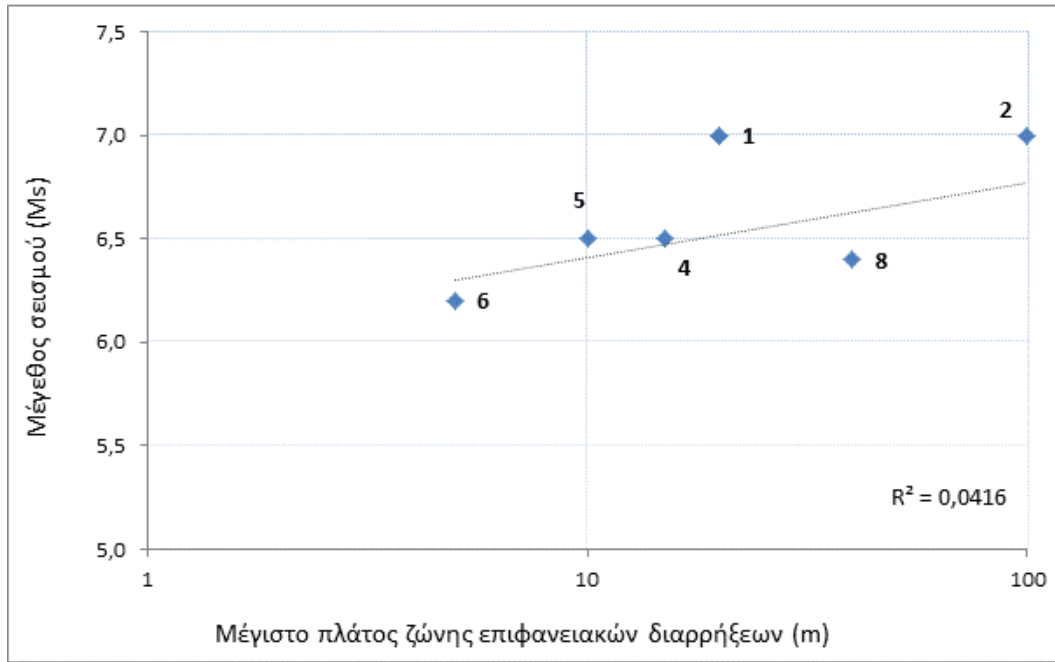
Εικόνα 5.59. (a) Φωτογραφία από την κοιλάδα του ρήγματος Daxingxi, (b), (c) και (d) φωτογραφίες από τη μετατόπιση κατά μήκος του ρήγματος

6 Στατιστική επεξεργασία - Διαγράμματα

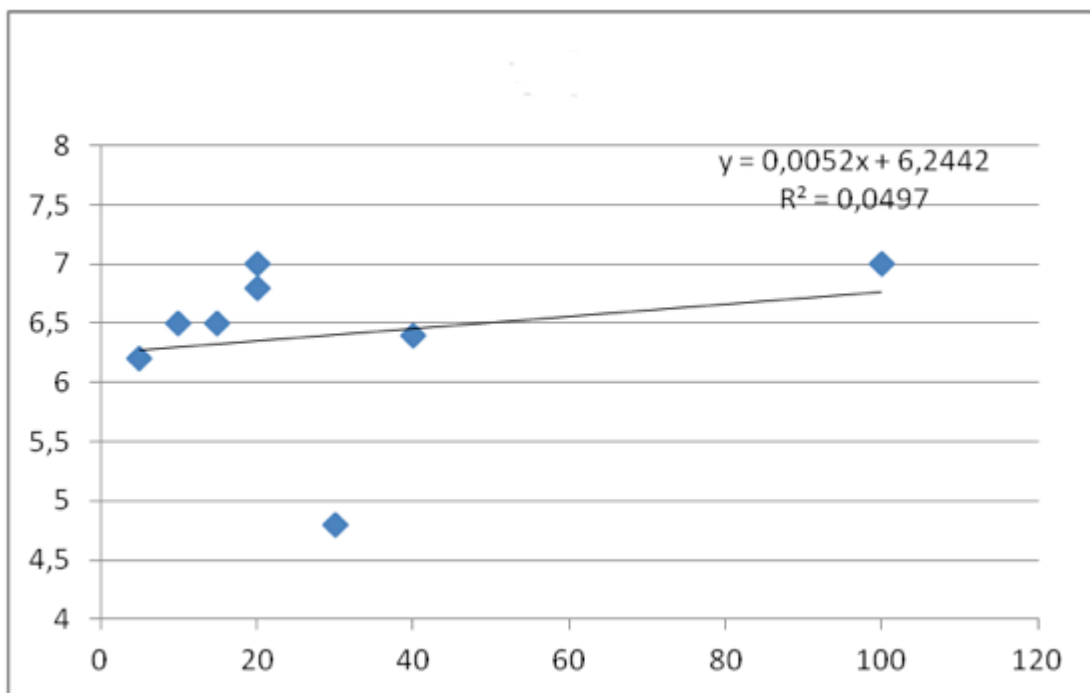
Στους πιο κάτω πίνακες παρουσιάζονται συνοπτικά τα στοιχεία από τους σεισμούς, που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, ανάλογα με τον τύπο του σεισμογόνου ρήγματος.

Σεισμοί (κανονικά ρήγματα)	A/A	Μέγεθος σεισμού (Ms)	Μέγιστο Πλάτος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων (m)	Μήκος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων (km)	Μέγεθος μετατόπισης (cm)
Αταλάντης 1894	1	7	20	40	30-120
Ιερισσού 1932	2	7	100	30	30-180
Σοφάδων 1954	3	7	20	5	30-70
Θεσσαλονίκης 1978	4	6.5	15	20	20
Κορινθιακού 1981	5	6.5	10	12-15	50-150
Καλαμάτας 1986	6	6.2	5	6.5	18
Πάτρας 1989	7	4.8	30	1.5	10
Αιγίου 1995	8	6.4	40	7	2-5

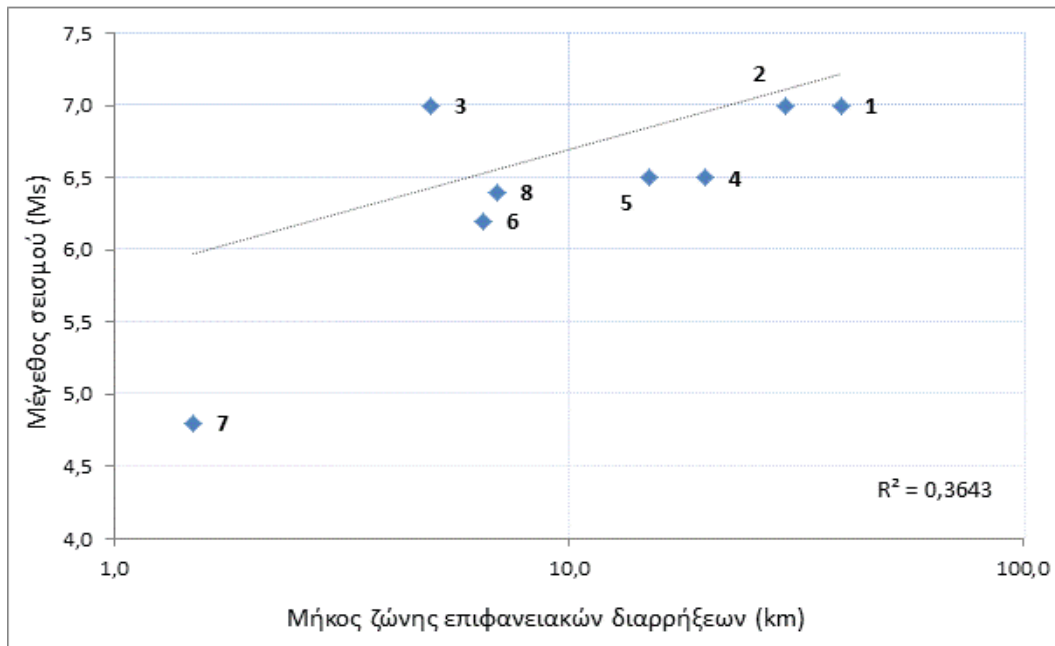
Εικόνα 6.1. Πίνακας με τα στοιχεία των σεισμών που προκλήθηκαν από κανονικά ρήγματα



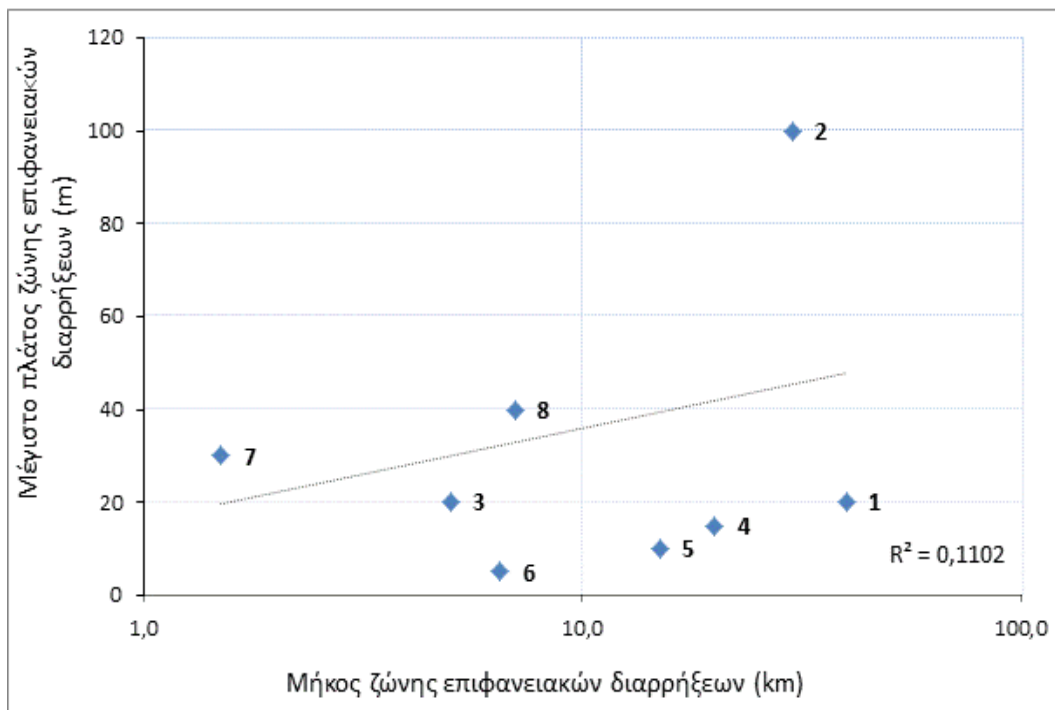
Εικόνα 6.2 Λογαριθμικό διάγραμμα συσχέτισης μεγέθους σεισμού με το μέγιστο πλάτος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων για κανονικά ρήματα



Εικόνα 6.2α Διάγραμμα συσχέτισης μεγέθους σεισμού με το μέγιστο πλάτος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων για κανονικά ρήματα



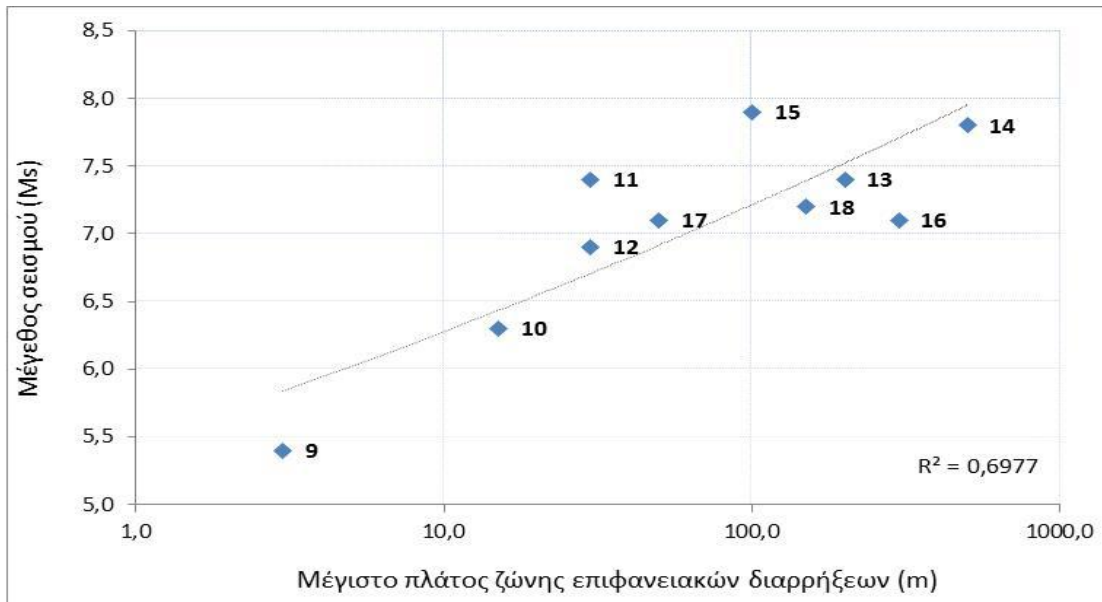
Εικόνα 6.3 Λογαριθμικό διάγραμμα συσχέτισης μεγέθους σεισμού με το μήκος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων για κανονικά ρήματα



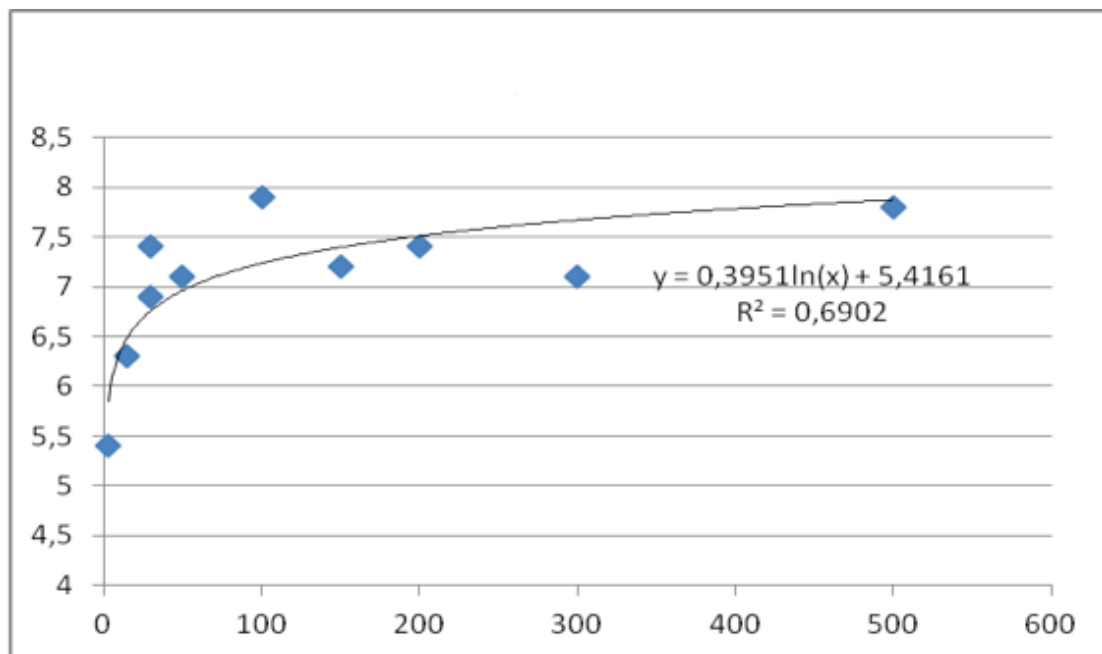
Εικόνα 6.4 Λογαριθμικό διάγραμμα συσχέτισης μέγιστου πλάτους ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων με το μήκος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων για κανονικά ρήματα

Σεισμοί (ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης)	A/A	Μέγεθος σεισμού (Ms)	Μέγιστο Πλάτος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων (m)	Μήκος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων (km)	Μέγεθος μετατόπισης (m)
Ακαρνανίας - Λευκάδας 1983	9	5.4	3	1.8	0,1
Edgecumbe Νέας Ζηλανδίας 1987	10	6.3	15	7	2
Landers και Big Bear 1992	11	7.4	30	85	6
Kobe 1995	12	6.9	30	9	7
Izmit 1999	13	7.4	200	120	5.5
Θιβέτ Κυλίμ 2001	14	7.8	500	400km	10
Αλάσκα 2002	15	7.9	100	336	9
Canterbury Νέας Ζηλανδίας 2010	16	7.1	30	40	5
Yushu 2010	17	7.1	2m	50km	-
Loma Prieta 1989	15	7.1	50	33	2.3
Μεξικού 2010	16	7.8	150	120	3

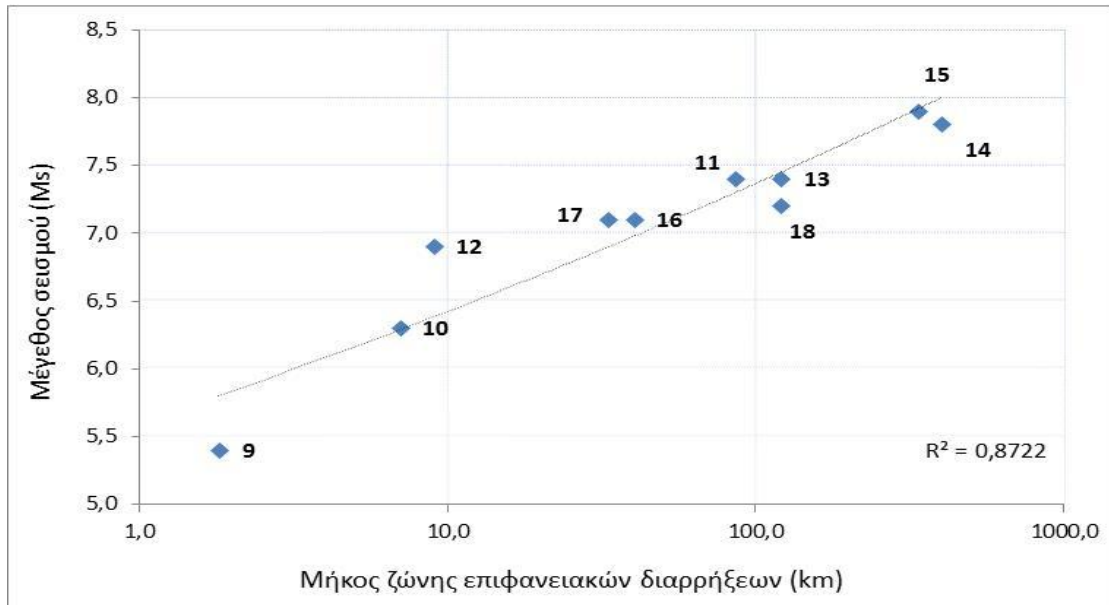
Εικόνα 6.5. Πίνακας με τα στοιχεία των σεισμών που προκλήθηκαν από ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης



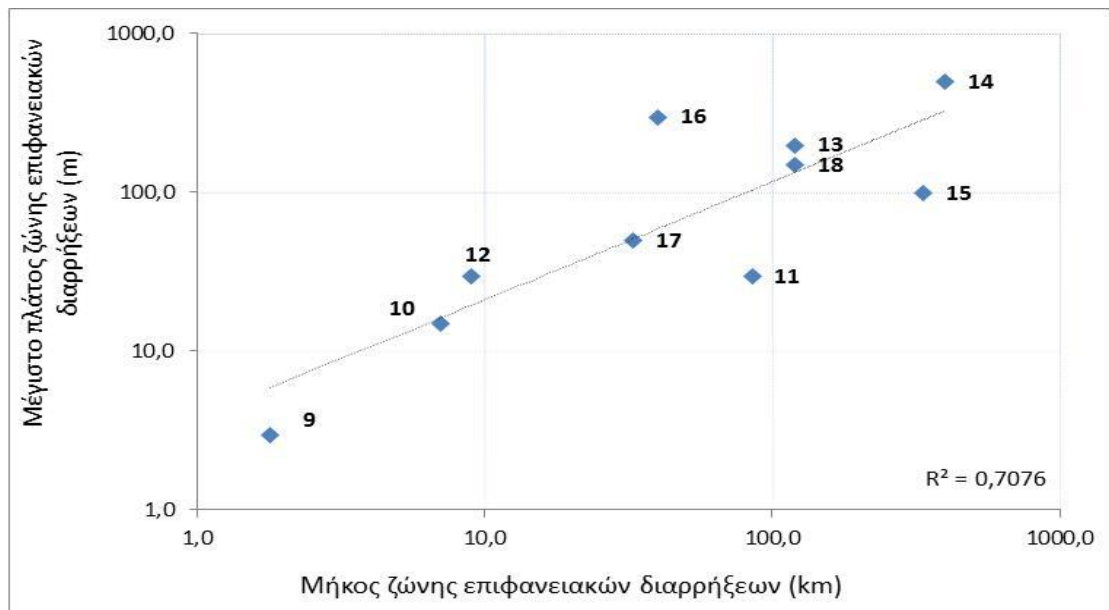
Εικόνα 6.6 Λογαριθμικό διάγραμμα συσχέτισης μεγέθους σεισμού με το μέγιστο πλάτος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης



Εικόνα 6.6α Διάγραμμα συσχέτισης μεγέθους σεισμού με το μέγιστο πλάτος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης



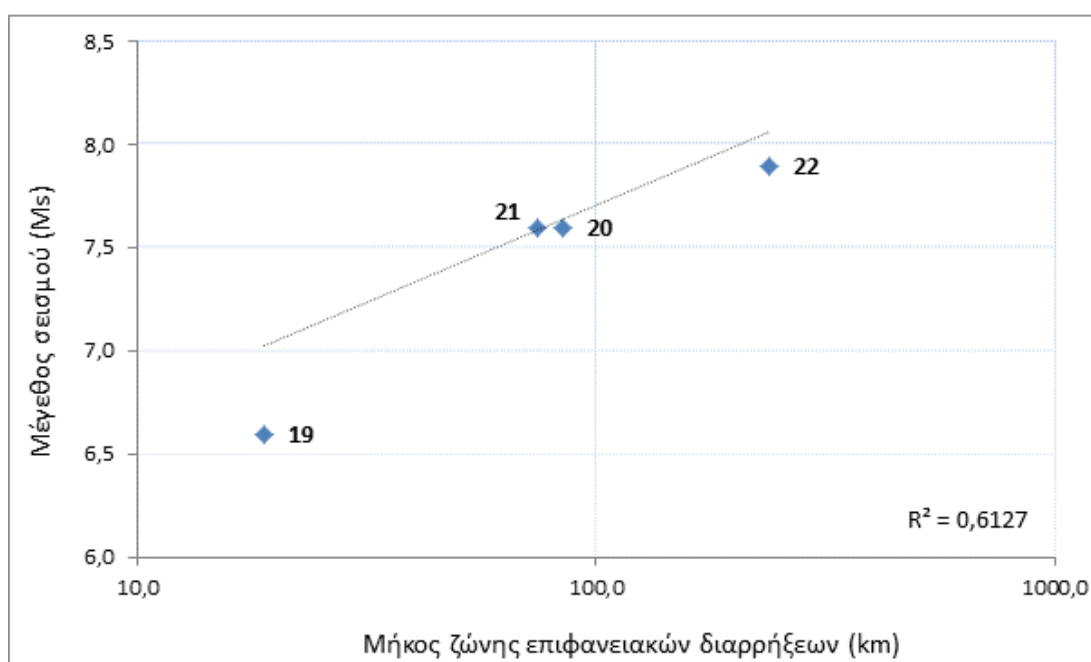
Εικόνα 6.7 Λογαριθμικό διάγραμμα συσχέτισης μεγέθους σεισμού με το μήκος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης



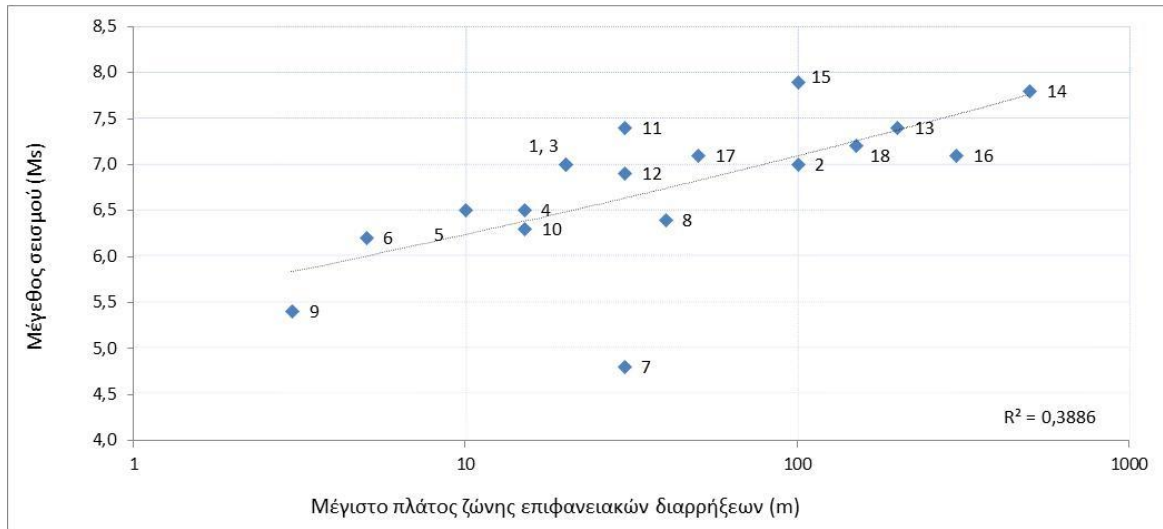
Εικόνα 6.8 Λογαριθμικό διάγραμμα συσχέτισης μέγιστου πλάτους ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων με το μήκος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης

Σεισμοί (ανάστροφα Ρήγματα)	A/A	Μέγεθος σεισμού (Ms)	Πλάτος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων (m)	Μήκος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων (km)	Μέγεθος μετατόπισης (m)
San Fernando 1971	19	6.6	250	19	2
Taiwan 1999	20	7.6	120	85	8
Kasmir 2005	21	7.6	300	75	7
Wenchuan 2008	22	7.9	15	240	6.5

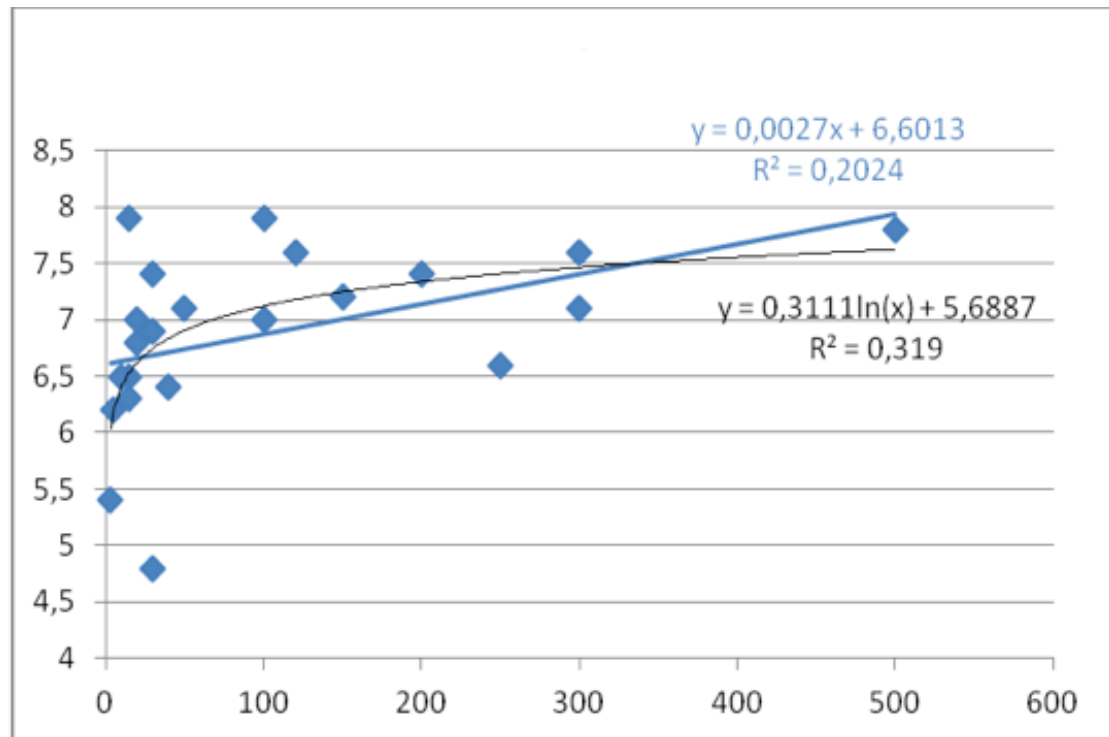
Εικόνα 6.9 Πίνακας με τα στοιχεία των σεισμών που προκλήθηκαν από ανάστροφα ρήγματα



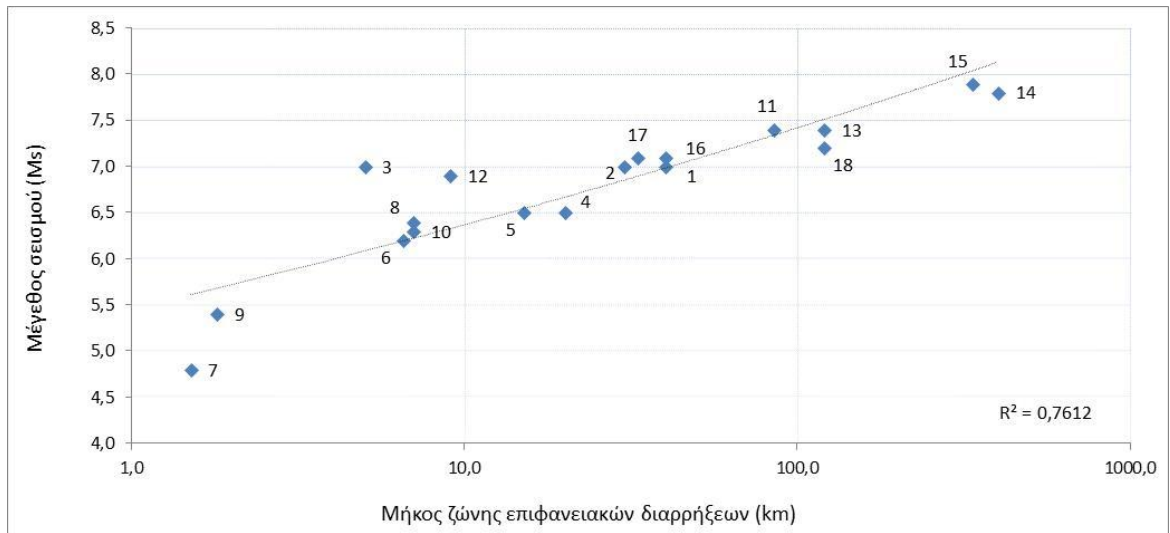
Εικόνα 6.10 Λογαριθμικό διάγραμμα συσχέτισης μεγέθους σεισμού με το μέγιστο πλάτος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων για ανάστροφα ρήγματα



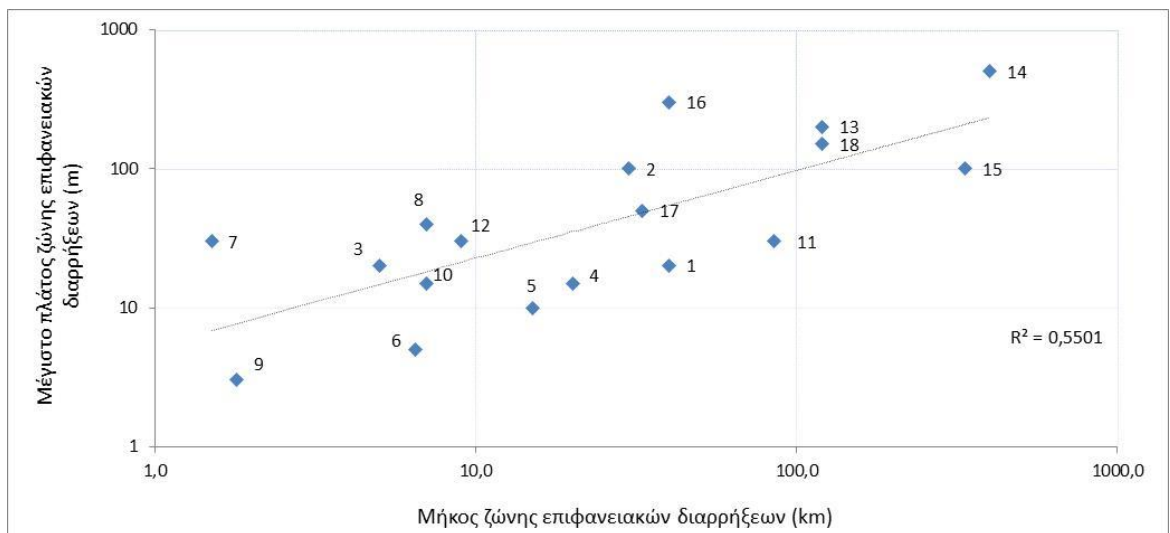
Εικόνα 6.11 Λογαριθμικό διάγραμμα συσχέτισης μεγέθους σεισμού με το μέγιστο πλάτος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων για όλους τους τύπους ρηγμάτων



Εικόνα 6.11α Διάγραμμα συσχέτισης μεγέθους σεισμού με το μέγιστο πλάτος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων για όλους τους τύπους ρηγμάτων



Εικόνα 6.12 Λογαριθμικό διάγραμμα συσχέτισης μεγέθους σεισμού με το μήκος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων για όλους τους τύπους ρηγμάτων



Εικόνα 6.13 Λογαριθμικό διάγραμμα συσχέτισης μέγιστου πλάτους ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων με το μήκος ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων για όλους τους τύπους ρηγμάτων

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Ο προσδιορισμός των ενεργών ρηγμάτων μιας περιοχής είναι καθοριστικής σημασίας για την αντισεισμική της προστασία. Ο βαθμός επικινδυνότητας των ενεργών ρηγμάτων μπορεί να καθοριστεί ποιοτικά και ποσοτικά, και σε συνδυασμό με τα σεισμολογικά στοιχεία να εκτιμηθεί σε ένα ικανοποιητικό βαθμό η μελλοντική τους δράση. Η μελέτη των ρηγμάτων περιλαμβάνει την αναγνώριση, την αποτύπωση και τον προσδιορισμό των γεωμετρικών και δυναμικών τους χαρακτηριστικών. Δεν περιορίζεται όμως μόνο σε αυτά, που αποτελούν μια διαδικασία επιβεβλημένη από τη νομοθεσία σε πολλές χώρες με έντονη σεισμικότητα, στις ευρωπαϊκές χώρες δε από τον Eurocode 8 και στην Ελλάδα επίσης από τις προδιαγραφές του Οργανισμού Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ). Η πρακτική που ακολουθείται παγκοσμίως, περιλαμβάνει επιπλέον τη συσχέτιση, με βάση εμπειρικές σχέσεις, μεταξύ του μεγέθους ενός σεισμού, του μήκους του ρήγματος και του μεγέθους της μετατόπισης κατά μήκος του ρήγματος.

Επιπρόσθετα, ένα ιδιαίτερο θέμα για τους μηχανικούς που σχεδιάζουν σε περιοχές ενεργών ρηγμάτων είναι και το πλάτος της ζώνης παραμόρφωσης ενός ενεργού ρήγματος, θέμα που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία. Στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό δεν αναφέρεται συγκεκριμένο πλάτος ζώνης παραμόρφωσης, και συνεπώς απαγόρευσης δόμησης, στα ενεργά ρήγματα. Ο Αντισεισμικός Κανονισμός των Η.Π.Α. (Καλιφόρνιας) ορίζει, με βάση την εμπειρία από παλαιότερους σεισμούς, ζώνη απαγόρευσης δόμησης συνολικού πλάτους 50m (25m εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος) στην περίπτωση συνήθως κατασκευών, 200m σε σχέση με τη θεμελίωση δημόσιων κτιρίων και 500-3000m για τα μεγάλα τεχνικά έργα.

Θεωρώντας ότι α) το πλάτος της ζώνης παραμόρφωσης δεν είναι αρκετά συγκεκριμένο και η διακύμανση του είναι μεγάλη, με αποτέλεσμα αντίστοιχους περιορισμούς στα τεχνικά κυρίως έργα, και β) αφορά στην πλειονότητά τους ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, που είναι και τα μεγαλύτερα ρήγματα παγκοσμίως (π.χ. San Andreas fault, North Anatolian fault), έγινε προσπάθεια συστηματικότερου

προσδιορισμού του, αναφορικά με ρήγματα και των τριών κατηγοριών (κανονικά, ανάστροφα και ρήγματα οριζόντιας ολισθήσεως). Τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν περιλαμβάνονται στους πίνακες που παρουσιάζονται στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Οι διαπιστώσεις που προκύψανε από την καταγραφή, την αξιολόγηση και τη στατιστική επεξεργασία των στοιχείων σχετικά με το πλάτος της ζώνης μέσα στην οποία αναπτύσσονται οι επιφανειακές συνσεισμικές διαρρήξεις, αναφέρονται παρακάτω. Σημειώνεται ότι οι σεισμοί που μελετήθηκαν είναι μικρού βάθους, επειδή σε τέτοιο είδους σεισμούς μπορεί να γίνει άμεση συσχέτιση με τις επιφανειακές διαρρήξεις.

Συμπερασματικά:

- Η επίδραση της γεωλογικής δομής κάθε περιοχής, σε ότι αφορά κυρίως τη λιθολογία των γεωλογικών σχηματισμών, φαίνεται ότι είναι σημαντική για το πλάτος της ζώνης παραμόρφωσης, όπως άλλωστε αντίστοιχα και το μέγεθος των επιφανειακών μετατοπίσεων.
- Στην περίπτωση της Ελλάδας, με βάση την υπάρχουσα γεωλογική πληροφόρηση, εξαιρέθηκαν από την αξιολόγηση στοιχεία ορισμένων σεισμών, για τους οποίους υπάρχει αμφιβολία για την τεκτονική φύση των επιφανειακών διαρρήξεων (π.χ. ρωγμές λόγω ρευστοποιήσεως, ολισθήσεων, συμπύκνωσης χαλαρών σχηματισμών κ.α.).
- Όταν οι σεισμικές ρωγμές εκδηλώνονται, όπως στις περισσότερες περιπτώσεις, κατά μήκος του ίχνους του ρήγματος που ενεργοποιήθηκε, το πλάτος της ζώνης παραμόρφωσης είναι περιορισμένο, της τάξεως των 10-30 m, και σπανιότερα φθάνει τα 50m, εκατέρωθεν του ρήγματος. Όταν οι διαρρήξεις εμφανίζονται πιο διάσπαρτες, σε ζώνη που φθάνει και τα 500 m, στην πλειονότητα των περιπτώσεων εκδηλώνονται σε μη συνεκτικές πρόσφατες γεωλογικές αποθέσεις.
- Όταν η ζώνη παραμόρφωσης εκτείνεται σε μερικά χιλιόμετρα, πρόκειται συνήθως για την ανάδραση όχι ενός ρήγματος, αλλά μιας ρηξιγενούς ζώνης (που αποτελείται από παράλληλα ρήγματα, ή από τη «διάσπαση» του ρήγματος προς την επιφάνεια σε πολλαπλά μικρότερα ρήγματα).

- Από τις τρεις κατηγορίες ρηγμάτων, τα ανάστροφα ρήγματα φαίνεται ότι εμφανίζουν το μεγαλύτερο πλάτος ζώνης μέσα στην οποία σχηματίζονται οι επιφανειακές διαρρήξεις.
- Στα οριζόντιας ολίσθησης ρήγματα, παρατηρείται κοντά στην επιφάνεια, διακλάδωση και διασπορά δευτερευουσών θραύσεων, με αποτέλεσμα την αύξηση του πλάτους της ζώνης παραμόρφωσης, παρότι επειδή διαδίδονται σχεδόν κατακόρυφα, θα αναμενόταν να είναι πιο περιορισμένο.
- Στα κανονικά ρήγματα, όταν επηρεάζουν σχηματισμούς του υποβάθρου, το πλάτος της ζώνης παραμόρφωσης είναι μερικά μέτρα, ενώ στην επαφή του υποβάθρου με πρόσφατες αποθέσεις το πλάτος της ζώνης αυξάνει, λόγω του σχηματισμού μικρότερων παράλληλων θραύσεων και ενίσχυση της ολίσθησης από φαινόμενα βαρύτητας.
- Τα στατιστικά διαγράμματα που παρουσιάζονται, αξιολογούνται μόνο από την άποψη της τάσης που δείχνουν σε ότι αφορά τη συσχέτιση του πλάτους της ζώνης παραμόρφωσης κατά μήκος ενός ενεργού ρήγματος, με το μέγεθος του σεισμού και το μήκος του ρήγματος. Είναι εμφανής η γενική τάση αύξησης του πλάτους της ζώνης παραμόρφωσης με το μήκος του ρήγματος, αλλά δεν είναι εφικτή η εξαγωγή συγκεκριμένης σχέσης. Σημεία στα διαγράμματα που εμφανίζουν μεγάλη διαφορά από τη γενική τάση, πιθανώς οφείλονται στην επίδραση των τοπικών γεωλογικών συνθηκών.
- Σημειώνεται ότι η παρούσα διπλωματική εργασία άπτεται ενός δύσκολου θέματος, όπου διαπιστώνεται, για μια ακόμη φορά, ότι η φύση συχνά εκπλήσσει. Σαν χαρακτηριστικά παραδείγματα μπορούν να αναφερθούν ο σεισμός του Wenchuan, με μέγεθος $M=7,9$, και εμφάνιση των επιφανειακών διαρρήξεων σε πολύ μικρή απόσταση (25m) από το ίχνος του ρήγματος και ο σεισμός του San Fernando, με μέγεθος $M=6,6$, όπου οι εδαφικές διαρρήξεις σχημάτισαν μια ζώνη πλάτους 250m.
- Λαμβάνοντας υπόψη όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, η συγκεκριμένη έρευνα πρέπει να συνεχιστεί με την αξιολόγηση ενός μεγάλου αριθμού σεισμών και κυρίως με την εισαγωγή του παράγοντα της λιθολογίας, ώστε να προκύψουν αξιόπιστες εμπειρικές σχέσεις που να συνδέουν το μέγεθος του σεισμού και το μήκος του ρήγματος με το πλάτος της ζώνης εμφάνισης των

επιφανειακών διαρρήξεων, σχέσεις εξαιρετικά χρήσιμες στον αντισεισμικό σχεδιασμό.

- Πρέπει ιδιαίτερα να τονισθεί όμως, ότι ενώ στα οριζόντια ολίσθησης ρήγματα το πλάτος της ζώνης «διαιρείται» εξίσου και από τις δύο πλευρές του ρήγματος, στα κανονικά ρήγματα η εκτίμηση αυτή πρέπει να γίνεται διαφορετικά. Επειδή, εκ της φύσεώς τους, τα κανονικά ρήγματα έχουν διαφορετική δυναμική και κινηματική, το μέγιστο της ζώνης παραμόρφωσης είναι προς την πλευρά του κατερχόμενου τεμάχους, στο οποίο εκδηλώνεται και η πλειονότητα των εδαφικών διαρρήξεων. Το στοιχείο αυτό πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στις αντίστοιχες εκτιμήσεις, στο πλαίσιο των μελετών των έργων στην Ελλάδα, όπου, με εξαίρεση τις ιόνιες ακτές, η πλειονότητα των ρηγμάτων είναι κανονικά.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Armijo R., Drakopoulos J., Baskoutass J., Delibassis N., Gaulon R., Kouskouna V., Latoussakis I., Markopoulos K., Papadimitriou P., Papanastasiou D. and Pedotti G. (1988). The 1986 Kalamata (South Peloponnesus) earthquake, detailed study of a normal fault. Evidences for East-West extension in the Hellenic Arc. *Journal of geophysical research*, 93, B12, 14.967-15.000.
- Ayoub F., Leprince S., Konca O., Helmberger D. (2006). The 2005 Kashmir earthquake. Seismic waveforms analysis. *Earth and Planetary Science Letters* 249, 514–528.
- Chuanyou L., Wenjun Z., Weitao W. (2011). Trenching exposures of the surface rupture of 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China: Implications for coseismic deformation and paleoseismology along the Central Longmen Shan thrust fault. *Journal of Asian Earth Sciences* 40, 825–843.
- Haeussler P., Schwartz D., Dawson T., Stenner H., Lienkaemper J., Cinti F., Montone P., Sherrod B., and Craw P. (2004). Surface Rupture of the November 2002 M7.9 Denali fault earthquake, Alaska and comparison to other strike-slip ruptures. USGS paper, 20 p.
- Jianming G., Jianjing Z., Baobao G., Bihong F., Pulong S., Jianguo D., Chao X., and Lei L. (2012). Coseismic surface rupture structures associated with 2010 Ms 7.1 Yushu Earthquake, China. *Seismological Research Letters*, 83, 1, 109-118.
- Kalteziotis N., Koukis G., Tsiambaos G., Sabatakakis N., Zervogiannis H. (1991). Structural damage in a populated area due to an active fault. Proc. 2nd Int. Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. Paper No LP28, 1709-1716.
- Kuo-Fong M., Chyi-Tyi L., Yi-Ben T., Tzay-Chyn S., Mori J. (1999) The Chi-Chi, Taiwan earthquake: Large surface displacements on an inland thrust fault. *EOS Transactions American Geophysical*, 80, 50, 605-620.
- Lekkas E., Loizos S., Skourtsos E. and Kranis H. (1996). Egio earthquake (15 JUNE 1995): An episode in the neotectonic evolution of Corinthiakos Gulf. PII: SO264-3707(97)00073-2.

- Lettis W., Bachhuber J., Witter R., Brankman C., Randolph C., Barka A., Page W. and Kaya A. (2002). Influence of releasing step-overs on surface fault rupture and fault segmentation: Examples from the 17 August 1999 Izmit earthquake on the North Anatolian fault, Turkey. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 1, 19–42.
- Lin A. and Nishikawa M. (2007). Coseismic lateral offsets of surface rupture zone produced by the 2001 Mw 7.8 Kunlun earthquake, Tibet from the IKONOS and QuickBird imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 28:11, 2431-2445, DOI: 10.1080/01431160600647233.
- Mavroulis S., Fountoulis I. and Lekkas E. (2010). Environmental effects caused by the Andravida (08-06-2008, ML = 6.5, NW Peloponnese, Greece) earthquake. *Geologically Active – Williams et al. (eds)*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-60034-7.
- Margaris B., Papaioannou C., Theodoulidis N., Savvaidis A., Klimis N., Makra K., Demosthenus M., Karakostas C., Lekidis V., Makarios T., Salonikios T., Athanasopoulos G., Mylonakis G., Papantonopoulos C., Efthymiadou V., Kloukinas P., Ordonez I., Vlachakis V., Stewart J. (2008). Preliminary report on the principal seismological and engineering aspects of the Mw = 6.5 Achaia-Ilia (Greece) earthquake on 8 June 2008, Unpublished report, ITSAK.
- Papastamatiou D., Mouyaris N. (1986). The earthquake of April 30, 1954, in Sophades (Central Greece). *Geophys. J. R. astr. SOC.*(1986) 87, 885-895.
- Papazachos C.B., Panagiotopoulos G.D., Tsapanos M.T., Mountrakis M.D. and Dimopoulos Ch.G. (1983). A study of the 1980 summer seismic sequence in the Magnesia region of Central Greece. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 75,155-168.
- Pavlides S., Tranos M. (1991). Structural characteristics of two strong earthquakes in the North Aegean: Ierissos (1932) and Agios Efstratios (1968). *Journal of Structural Geology*, 13, 2, 205-214.
- Pavlides S. and Caputo R. (2004). Magnitude versus faults' surface parameters: quantitative relationships for the Aegean. *Tectonophysics*, 380, 159-188.
- Rozos D., Koukis G. and Sabatakis N. (2006). Large-scale engineering geological map of the Patras city wider area, Greece. IAE2006, Paper number 241.
- Wang P., FU B., Zhang B., Kong P., Wang G. (2009). Relationships between surface ruptures and lithologic characteristics of the Wenchuan $M_S=8.0$ earthquake. *Chinese journal of Geophysics*, 52, 1, 75–84.

- Wells D, Coppersmith J. (1994). New empirical relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture area and surface Displacement, B.S.S.A., 84, 4, 974-1002.
- Whitcomb J., Allen C., Garmany J. and Hileman J. (1973). San Fernando Earthquake series, 1971, focal mechanisms and tectonics. Reviews of geophysics and space physics, 11, 3, 693-730.
- <http://www1.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/~sato/taiwan/>
- http://en.wikipedia.org/wiki/921_earthquake
- http://pasadena.wr.usgs.gov/office/hudnut/hudnut/nr_bssa.
- http://radar.tudelft.nl/~ahooper/Trisirisatayawong_et_al_Fringe_2011.pdf
- http://www.eos.ubc.ca/courses/eosc256/jan28_rebound_pdf.pdf
- <https://support.rms.com/publications/KobeRetro.pdf>
- <http://earthquake.usgs.gov/regional/nca/1906/18april/howlong.php>
- http://sepwww.stanford.edu/oldsep/joe/fault_images/BayAreaSanAndreasFault.html
- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795200000375>
- http://www.unavco.org/community_science/science_highlights/2010/M7.2-Baja.html
- http://en.wikipedia.org/wiki/2002_Denali_earthquake
- http://www.aeic.alaska.edu/Denali_Fault_2002/
- <http://igppweb.ucsd.edu/~agnew/Pubs/agnew.a69.pdf>
- http://www.agnet.org/library.php?func=view&id=20110718135304&type_id=3