

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	1
2. ΕΝΕΡΓΟΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	4
2.1 ΣΕΙΣΜΟΙ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΒΑΘΟΥΣ	4
2.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΙ ΣΕΙΣΜΟΙ – ΕΝΕΡΓΑ ΡΗΓΜΑΤΑ	5
3. ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΑΡΡΗΞΕΙΣ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	13
4. ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΘΕΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	18
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	22
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	23
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΣΤΗΝ ΙΣΧΥΟΥΣΑ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ.....	25

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η περιοχή μελέτης παρουσιάζει έντονο ανάγλυφο, πυκνό σύστημα ασυνεχειών και ενεργών ρηγμάτων.

Η ύπαρξη ενεργού ρήγματος στη στενή και ευρύτερη περιοχή μελέτης έχει μεγάλη σημασία σύμφωνα με τον ΕΑΚ 2000/04. Γι' αυτό είναι αναγκαίο να διατυπωθούν συγκεκριμένες (αυστηρά καθορισμένες) προδιαγραφές ασφαλείας, άμεσα συνδεδεμένες με τη γεωδυναμική συμπεριφορά του ευρύτερου χώρου της Κρήτης και του Νοτίου Αιγαίου, και ιδιαίτερα των σεισμικά ενεργών ρηγμάτων της γειτονικής και της περιοχής μελέτης όπως:

1. Απόσταση ασφαλείας έργου από το ίχνος του ενεργού ρήγματος,
2. Σημασία της γεωμετρίας (πολυπλοκότητας) του ρήγματος στην κατασκευή,
3. Αναμενόμενη δραστηριότητα (σεισμική ή ασεισμική) του ρήγματος και μέγεθος επιφανειακών μετατοπίσεων, και
4. Συνολική επίδραση στην κατασκευή.

Σημαντικό ρόλο προς την κατεύθυνση αυτή κατέχουν τα ποσοτικά μορφοτεκτονικά αποτελέσματα και κυρίως τα δεδομένα από τις παλαιοσεισμολογικές εκσκαφές κατά μήκος των ρηγμάτων, η αναγνώριση παλαιοσεισμικών γεγονότων (σεισμική ιστορία των ρηγμάτων), ο υπολογισμός του ρυθμού ολίσθησης (slip rate), της μέσης περιόδου επαναλήψεως ισχυρών σεισμών (recurrence interval) και του χρόνου που παρήλθε από το τελευταίο μεγάλο σεισμικό γεγονός (elapsed time).

Οι προδιαγραφές του ΟΑΣΠ που αφορούν τη σύνταξη Νεοτεκτονικών χαρτών κατατάσσουν τα ρήγματα στις παρακάτω κατηγορίες:

Σεισμικά, τα ρήγματα για τα οποία υπάρχουν ασφαλή ιστορικά στοιχεία ότι συνδέονται με συγκεκριμένους σεισμούς.

Ενεργά, τα ρήγματα που έχουν δράσει από το Ανώτερο Πλειστόκαινο μέχρι σήμερα (αποδεδειγμένα στο Ολόκαινο). Προσδιορίζονται κυρίως με γεωλογικές μεθόδους και θεωρούνται «ικανά» (capable), δηλαδή «εν δυνάμει» για μελλοντική σεισμική δραστηριότητα.

Πιθανά ενεργά, αυτά που έδρασαν από το Ανώτερο Πλειόκαινο, και για τα οποία δε διαθέτουμε στοιχεία που να αποδείχνουν ότι λειτούργησαν και πέραν του Ανώτερου Πλειστόκαινου, και

Άγνωστης (ή απροσδιόριστης) δραστηριότητας, τα ρήγματα που έχουν δράσει πριν το Ανώτερο Πλειόκαινο και γενικά εμφανίζονται ως ανενεργές δομές.

Τα ρήγματα που βρίσκονται πλησίον της θέσης μελέτης χαρακτηρίζονται **ως ενεργά και πιθανά ενεργά**, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

Απόσταση από ενεργό ρήγμα:

Η απόσταση ασφαλείας από αποδεδειγμένο ενεργό ρήγμα είναι ένα ανοιχτό θέμα παγκοσμίως και απασχολεί συνεχώς και την ελληνική επιστημονική κοινότητα και τον

τεχνικό κόσμο της χώρας όταν σχεδιάζονται μεγάλα τεχνικά έργα (προδιαγραφές, μικροζωνικές μελέτες).

Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ-2000) «δεν επιτρέπεται η δόμηση κτισμάτων σπουδαιότητας Σ3 και Σ4 (δημόσια κτίρια ή κτίρια που στεγάζουν εγκαταστάσεις μεγάλης οικονομικής αξίας) στην άμεση γειτονία σεισμοτεκτονικών ρηγμάτων που χαρακτηρίζονται ως σεισμικά ενεργά». Ο χαρακτηρισμός των ρηγμάτων γίνεται με βάση σειсмоϊστορικά και σεισμοτεκτονικά δεδομένα και λαμβάνεται υπόψη και το πιθανό μέγεθος (μετατόπιση) τυχόν σεισμικής διάρρηξης. Απαγορεύεται η δόμηση κτισμάτων σπουδαιότητας Σ2 (συνήθη κτήρια κατοικιών, γραφείων, ξενοδοχείων κ.λπ.) επί «σεισμικώς ενεργών ρηγμάτων». Στις σχετικές μελέτες εκτός από τις διεθνείς προδιαγραφές, πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη η εμπειρία από τα αποτελέσματα και τις επιπτώσεις των σεισμών στη χώρα μας ή από περιοχές με παρόμοιο σεισμοτεκτονικό καθεστώς.

Δόμηση πάνω σε ρήγματα:

Η καλύτερη λύση κατασκευής οποιασδήποτε ανωδομής είναι η αποφυγή δόμησης πάνω στα ρήγματα. Όταν όμως αυτό είναι ανέφικτο για πολλούς πρακτικούς λόγους προχωράει ο σχεδιασμός και η κατασκευή του έργου με ειδικές προδιαγραφές. Στις περιπτώσεις που δεν μπορεί να αποφευχθεί η δόμηση πάνω σε ρήγματα έχει αναπτυχθεί τεχνογνωσία για την αποφυγή ή την ελαχιστοποίηση των αστοχιών. Τα προβλήματα αυτά ανάλογα με την περίπτωση και την σπουδαιότητα της κατασκευής λύνονται είτε με εξειδικευμένη θεμελίωση, είτε με εξυγίανση του εδάφους.

Παράλληλα, κατά την σεισμική κίνηση, μπορούν να παρατηρηθούν φαινόμενα κατολισθήσεων και καταπτώσεων βράχων. Ένα άλλο φαινόμενο που μπορεί να παρατηρηθεί σε παράκτιες περιοχές είναι η βύθιση περιοχών κάτω από την θάλασσα. Στον ΕΑΚ-2000 τίγονται επιγραμματικά ο έλεγχος της ευστάθειας πρανών που πρέπει να βασίζεται σε κατάλληλη γεωτεχνική και γεωλογική διερεύνηση (Τεχνικογεωλογική-Νεοτεκτονική).

Τέλος, στην Υπουργική Απόφαση 723/15-7-1998 για μελέτες γεωλογικής καταλληλότητας για οικοδόμηση οικισμών, βιομηχανικών περιοχών, ζωνών τουριστικής ανάπτυξης κ.ά. προβλέπονται μεταξύ πολλών άλλων γεωλογικών εργασιών και σεισμοτεκτονικές μελέτες.

Ποσοτική Ανάλυση των Ενεργών Ρηγμάτων και των Τεκτονικών Πρανών:

Μορφολογία των πρανών των ρηγμάτων (Fault scarp morphology). Ως πρανές (slope) γενικά ορίζεται μια πλαγιά (κλιτύς) βουνού ή λόφου. Τεκτονικό ή ρηξιγενές πρανές ορίζεται η παραμόρφωση στη γήινη επιφάνεια λόγω της τεκτονικής δράσης, σεισμικής ή ασεισμικής, κυρίως κατά μήκος ενός ενεργού ρήγματος ή το μορφοανάγλυφο μιας ζώνης διάρρηξης.

Η κλίση των πρανών που δημιουργούνται από διάρρηξη (ρήγμα) είναι ένας πολύ χρήσιμος γεωμορφολογικός δείκτης της ενεργού τεκτονικής και ένα χρήσιμο εργαλείο στην αναγνώριση πρόσφατων και ενεργών ρηγμάτων στην ύπαιθρο.

Η **Γεωμορφολογική-Μορφοτεκτονική Ανάλυση** πραγματοποιείται με τη χρήση δορυφορικών Εικόνων ή/και Αεροφωτογραφιών), καθώς και τη χρήση ψηφιοποιημένων χαρτών μεγάλης κλίμακας για τη δημιουργία τρισδιάστου (3D) μοντέλου Ανάγλυφου, για την ανάλυση των Τεκτονικών Πρανών και των πλευρικών Κορημάτων

Η **Σεισμοτεκτονική Ανάλυση** περιλαμβάνει χαρακτηρισμό Ενεργών-Ανενεργών Ρηγμάτων, Σχέση τους με τα ρήγματα της ευρύτερης περιοχής, Υπολογισμούς αναμενόμενου πιθανού Μεγέθους Σεισμού, Πρόδρομη εκτίμηση της Σεισμικής Επικινδυνότητας, Ορισμό Ζωνών Ασφαλείας Δόμησης.

Προϋπόθεση για την εξειδικευμένη μελέτη ενεργότητας των ρηγματων αποτελεί:

Χαρτογράφηση μεγάλης κλίμακας όπου αποτυπώνονται όλα τα τεκτονικά στοιχεία περιμετρικά της περιοχής ενδιαφέροντος.

Ο χάρτης αυτός σε οριστικό στάδιο μελέτης αποτελεί σημαντικό βοήθημα προκειμένου να επιλεγεί η βέλτιστη λύση, με βάση τεχνικογεωλογικά κριτήρια.

Για τη σύνταξη του χάρτη προαπαιτείται να έχουν ολοκληρωθεί η προκαταρκτική (προ-μελέτη) γεωλογική μελέτη, η γεωλογική οριζοντιογραφία, η γεωλογική μηκοτομή και οι γεωλογικές διατομές, (με στοιχεία γεωτρήσεων εάν υπάρχουν) καθώς και οι άλλοι θεματικοί χάρτες αν υπάρχουν.

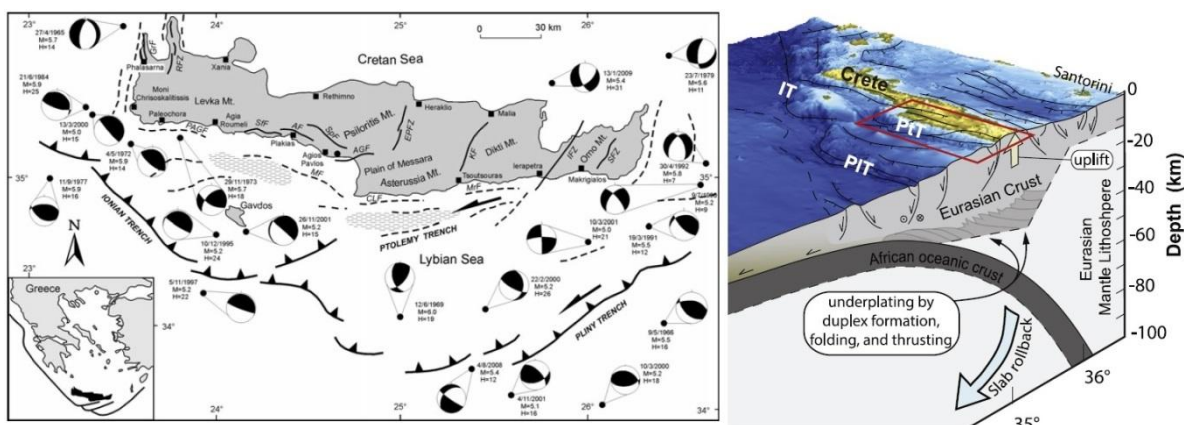
Στο χάρτη καταγράφονται διεύθυνση και κλίση στρωμάτων, σχιστότητα, ρηξιγενείς ζώνες και ρήγματα παλαιότερα, νεότερα, ενεργά, ανενεργά, πιθανώς ενεργά, υπολογισμός αλμάτων, πτυχές, άξονες πτυχών, μεσο-μακροδομές, μεγαδομές.

Γίνεται λεπτομερής τεκτονική ανάλυση της αλπικής και μεταλπικής παραμόρφωσης (γεωμετρική, κινηματική, δυναμική, χρονική ανάλυση).

Γεωμορφολογικά στοιχεία και ιδιαίτερα διαδικασίες μεταβολής αναγλύφου (ζώνες καταπτώσεων, κατολισθήσεων άμεσα συνδεδεμένες ή χωρίς άμεση σύνδεση με τη δραστηριότητα των ρηγμάτων, ερπυσμοί, κώνοι κορημάτων, αναβαθμίδες, επιφάνειες ισοπέδωσης).

2. ΕΝΕΡΓΟΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η νήσος Κρήτη τοποθετείται στο νότιο τμήμα του Ελληνικού Τόξου και αποτελεί μια περιοχή έντονης τεκτονικής και σεισμικής δραστηριότητας. Οι ελαστικές τάσεις που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή της Κρήτης είναι εφελκυστικές για τους επιφανειακούς σεισμούς (βάθος $h < 60$ Km), ενώ για τους σεισμούς ενδιάμεσου βάθους ($h > 60$ Km) οι τάσεις είναι συμπιεστικές. Το πεδίο των εφελκυστικών τάσεων της περιοχής παρουσιάζει μια διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ έως Δ-Α. Το είδος της διάρρηξης στους επιφανειακούς σεισμούς είναι κανονικό, δηλαδή το ένα τέμαχος βυθίζεται ως προς το άλλο. Μόνο σε σεισμούς με βάθος μεγαλύτερο των 40 Km υπάρχουν περιπτώσεις αναστροφής διάρρηξης, δηλαδή διάρρηξης όπου το ένα τέμαχος ανυψώνεται σε σχέση με το άλλο. Τέτοιου είδους διάρρηξη (αναστροφή) παρουσιάζουν οι σεισμοί ενδιάμεσου βάθους με επικράτηση της κατακόρυφης συνιστώσας.

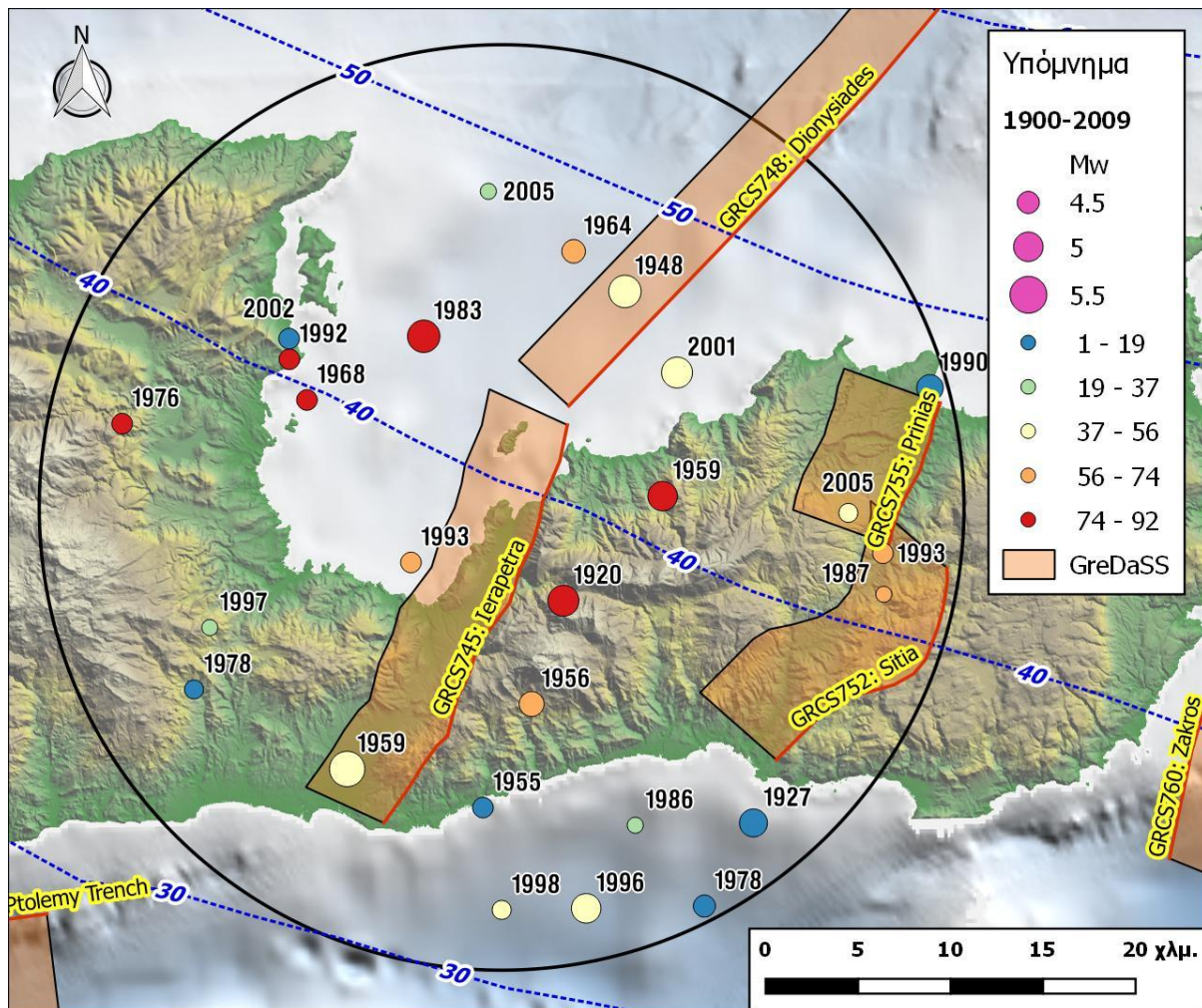


Σχήμα 1. Αριστερά: Οι κύριες τεκτονικές δομές της Κρήτης και μηχανισμοί γένεσης πρόσφατων σεισμών (Caruto et al. 2010). Δεξιά: Η θέση της Κρήτης στο γεωδυναμικό καθεστώς του Αιγαίου και την υποβυθιζόμενη Αφρικανική πλάκα (από Gallen et al. 2014).

2.1 ΣΕΙΣΜΟΙ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΒΑΘΟΥΣ

Στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος, παρατηρείται σημαντική δραστηριότητα με σεισμούς ενδιάμεσου βάθους (30-90 km). Οι σεισμοί αυτοί σχετίζονται άμεσα με την καταβυθιζόμενη Αφρικανική Πλάκα και συνήθως πρόκειται για σεισμούς με συμπιεστικούς μηχανισμούς γένεσης. Στην περιοχή μελέτης, σε μια ακτίνα 25 km, εντοπίζονται οι παρακάτω ενόργανοι σεισμοί για την περίοδο 1900 – 2011 (Makropoulos et al. 2012), με μεγέθη M_w 4 έως 5.5, η πλειοψηφία των οποίων έχει ενδιάμεσο βάθος (χρωματική κλίμακα στο Σχ.2). Όσον αφορά την ιστορική σεισμικότητα, οι περισσότερες αναφορές είναι σχετικά με την περιοχή της Ιεράπετρας στα νότια. Ιστορικοί σεισμοί που προκάλεσαν ισχυρές βλάβες και εντάσεις στην περιοχή της Ιεράπετρας είναι του 1508, 1780 και 1815 και πιθανώς πρόκειται για σεισμούς ενδιάμεσου βάθους (Guidoboni 1994, Parazachos & Parazachou 1997). Οι σεισμοί ενδιάμεσου βάθους αποτελούν έναν όχι καλά προσδιορισμένο παράγοντα στον σεισμικό κίνδυνο, λόγω έλλειψης πλήρους εικόνας και στοιχείων για τη ρηξιγενή παραμόρφωση σε αυτό το βάθος. Εκτιμάται ότι στην περιοχή μελέτης υπάρχει πιθανότητα σεισμών ενδιάμεσου βάθους μεγέθους $M_w > 6$, χωρίς όμως να είναι γνωστή

η περίοδος επανάληψης τέτοιων σεισμών, με εντάσεις όμως και εδαφικές επιταχύνσεις που δεν αναμένεται να είναι ισχυρότερες από έναν ισχυρό επιφανειακό σεισμό.

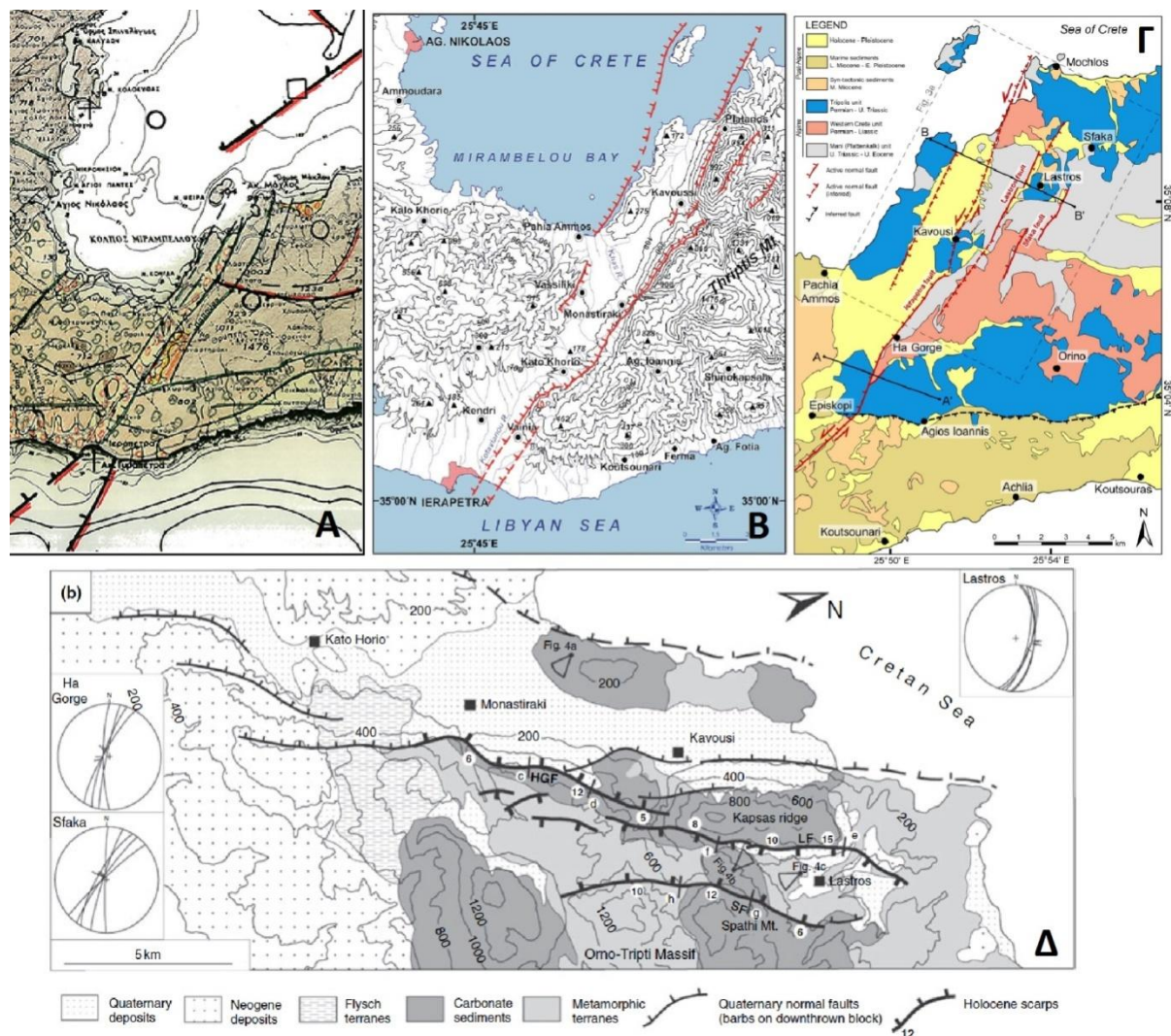


Σχήμα 2. Ενόργανη σεισμικότητα στην περιοχή μελέτης για $M_w > 4$, για την περίοδο 1900-2011, από τον επικαιροποιημένο κατάλογο των Makropoulos et al (2012). Στο σχήμα επίσης απεικονίζονται οι σειсмоγόνες πηγές από τη βάση GreDaSS (Caruto & Pavlides 2013) και οι ισοβαθείς καμπύλες της ζώνης υποβύθισης του Αιγαίου από την βάση SHARE (Basili et al. 2013).

2.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΙ ΣΕΙΣΜΟΙ – ΕΝΕΡΓΑ ΡΗΓΜΑΤΑ

Η κύρια τεκτονική δραστηριότητα στη νήσο Κρήτη αποτελείται από επιφανειακούς σεισμούς και μετατοπίσεις οι οποίοι σχετίζονται με μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες κατά μήκος του νησιού. Η περιοχή μελέτης ανήκει στην κύρια Ρηξιγενή Ζώνη Ιεράπετρας - ΡΖΙ (Φυτρολάκης & Δερμιτζάκης 1996, Caruto et al. 2006,2010), με τον κωδικό GRC745 στο GreDaSS (Caruto & Pavlides 2013). Πιο λεπτομερώς, η Ρηξιγενής Ζώνη Ιεράπετρας (Σχήματα 3 – 4) αποτελείται από μια ομάδα παράλληλων κανονικών ρηγμάτων, διεύθυνσης ΒΒΔ-NNA, όπως το ρήγμα Ιεράπετρας στα νότια, το ρήγμα Χα (Ha Gorge Fault - HGF), το ρήγμα του Καβουσίου (KAV1), το ρήγμα Λάστρου και Σφάκας στα ανατολικά, το ρήγμα Ψείρας (PSI) και το ρήγμα κατά μήκος του ανατολικού κόλπου Μιραμπέλου (KAV2). Πρόκειται για κανονικά ρήγματα, κλίσης

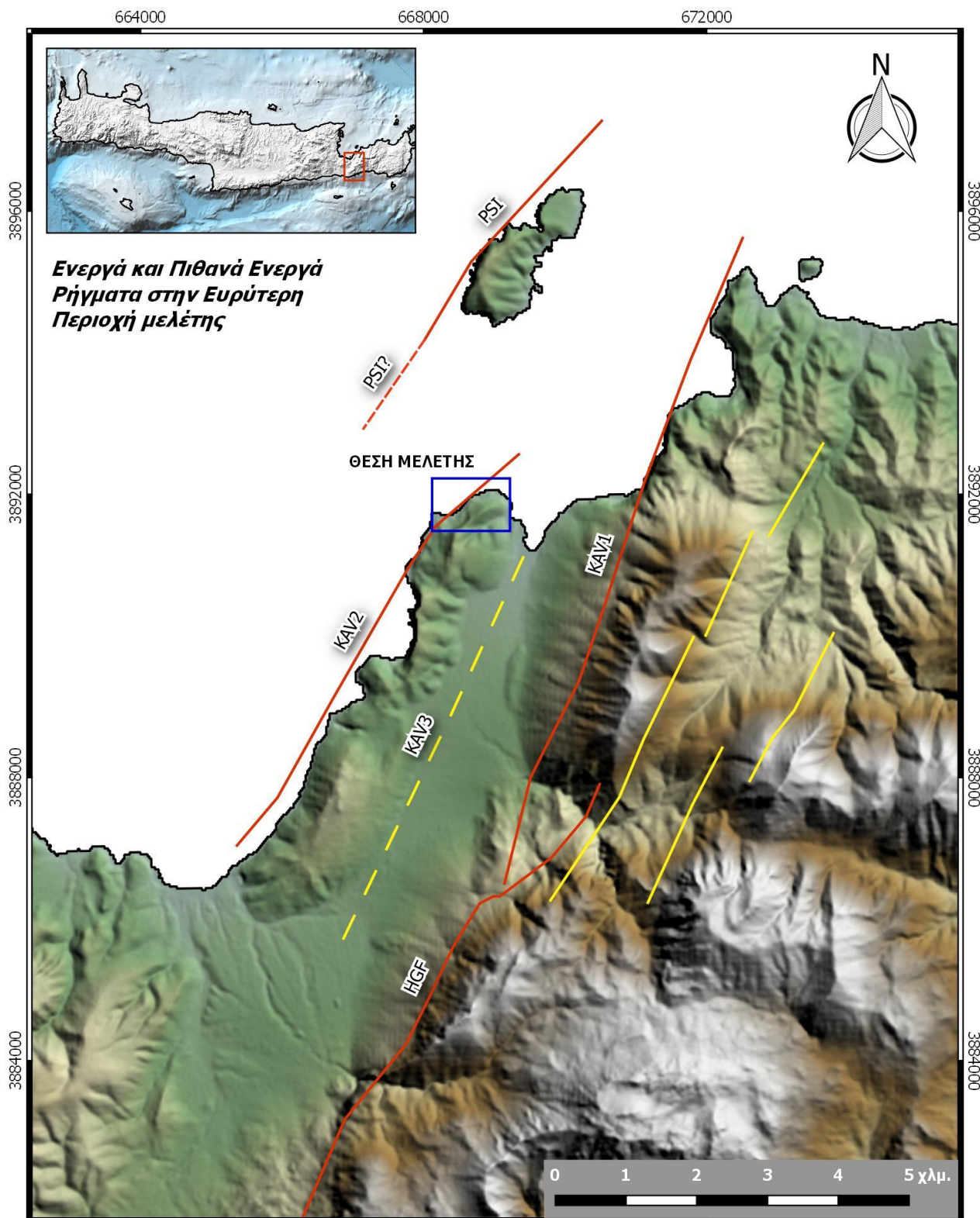
κυρίως προς δυτικά (HGF, KAV1, KAV2), που εμφανίζουν εφελκυσμό σε διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ, σε συμφωνία με το εφελκυστικό πεδίο τάσεων της ευρύτερης περιοχής (Caruto et al. 2010, Mountrakis et al 2012).



Σχήμα 3. Η ρηγιγενής ζώνη Ιεράπετρας με βάση δημοσιευμένες έρευνες για την περιοχή. Α: Φυτρολάκης & Δερμιτζάκης 1996, Β: Gaki-Papanastassiou et al. 2009, Γ: Mason et al. 2016, Δ: Caruto et al. 2006.

Στο δυτικό περιθώριο της λεκάνης του Καβουσίου, σε κάποιες πηγές (Φυτρολάκης & Δερμιτζάκης 1996, Mason et al. 2016) σημειώνεται η ύπαρξη ενός πιθανού ρήγματος (KAV3 στο σχήμα 4). Η πρωταρχική πηγή του ρήγματος αυτού θεωρείται ένα πιθανό ρήγμα που σημειώνεται στον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ – Φύλλο Κάτω Χωριο / Ιεράπετρα (ΙΓΜΕ 1959). Εκτιμάται ότι η ύπαρξη αυτού του ρήγματος αμφισβητείται και το ρήγμα αυτό δεν αποτελεί κύρια τεκτονική δομή, πιθανώς να υπάρχουν κάποια ρήγματα αντιθετικά στα ρήγματα Καβουσίου και Χα τα οποία όμως δεν αποτελούν σεισμολόγο πηγή.

Τα ρήγματα που σχετίζονται με την θέση μελέτης είναι το ρήγμα Ψείρας (PSI), το ρήγμα Καβουσίου (KAV1), το ρήγμα Χα (HGF) και το ρήγμα του ανατολικού κόλπου Μιραμπέλου (KAV2), το οποίο διέρχεται από την θέση μελέτης (Σχήμα 4). Το ρήγμα της Ψείρας, με μήκος που εκτιμάται σε τουλάχιστον 6 km, τοποθετείται στη δυτική πλευρά της Ν.Ψείρας και κατά μήκος της μορφολογίας του πυθμένα, η οποία σχηματίζει ένα σημαντικό υποθαλάσσιο πρηνές διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ έως ΒΒΔ-ΝΝΑ. Το συνολικό μορφολογικό άλμα εκτιμάται σε >400 μέτρα, παρατήρηση που ίσως δείχνει ένα μεγαλύτερο μήκος του ρήγματος.



Σχήμα 4. Τα κύρια ενεργά και πιθανά ενεργά ρήγματα της περιοχής μελέτης. Με κόκκινη γραμμή τα ρήγματα που επηρεάζουν την θέση μελέτης και εξετάζονται στο κείμενο.

Η τοποθέτηση της θέσης μελέτης σε απόσταση ~4 km από το ρήγμα Ψείρας και το γεγονός ότι βρίσκεται στο ανερχόμενο (footwall) τέμαχος του ρήγματος, εκτιμάται ότι θα έχει ως αποτέλεσμα μειωμένες εδαφικές κινήσεις στη θέση σε σχέση με την περιοχή

στα δυτικά, οι οποίες δεν αναμένεται να υπερβούν σημαντικά τις προβλεπόμενες από τον ΝΕΑΚ.

Το ρήγμα του Χα (Ha Gorge Fault) τοποθετείται κατά μήκος της δυτικής πλαγιάς του Όρους Θρύπτης και σχηματίζει ένα απότομο μορφολογικό πρσανές, με εμφανή τη σημαντική δραστηριότητα κατά το Μ-Α. Πλειστόκαινο. Κατά μήκος του ρήγματος Χα, παρατηρούνται καθαρές ρηξιγενείς επιφάνειες (καθρέπτες) με ύψος 6 – 12μ, που υποδεικνύουν πρόσφατη τεκτονική δραστηριοποίηση τα τελευταία 22.000 χρόνια (Caruto et al. 2006). Το ρήγμα του Χα εμφανίζει μήκος 9 km, είναι κανονικό και κλίνει προς δυτικά. Επειδή το ρήγμα τοποθετείται νότια της θέσης μελέτης, εκτιμάται ότι πιθανός σεισμός κατά μήκος του ρήγματος δεν θα οδηγήσει σε ισχυρότερες εντάσεις από ενδεχόμενη δραστηριοποίηση του ρήγματος Καβουσίου, το οποίο βρίσκεται αμέσως ανατολικά της θέσης.



Σχήμα 5. Πανοραμική άποψη της ρηξιγενοῦς ζώνης Ιεράπετρας στην περιοχή μελέτης. Απεικονίζονται τα ρήγματα Καβουσίου (KAV1), Χα (HGF) και το παράκτιο ρήγμα KAV2. Είναι χαρακτηριστική η έντονη μορφολογία κατά μήκος των ρηγμάτων KAV1 και KAV2, ένδειξη έντονης τεκτονικής δραστηριότητας κατά το Τεταρτογενές.

Το ρήγμα του Καβουσίου εμφανίζει την πιο εντυπωσιακή μορφολογία στην περιοχή. Το ρήγμα εκτείνεται σε ένα μήκος περίπου 9,5 km, από τον οικισμό Καβούσι στα νότια, έως το ακρωτήριο Μόχλος στα βόρεια. Το κατερχόμενο τέμαχος διαμορφώνει το βύθισμα της πεδιάδας του Καβουσίου και εμφανίζει αλλουβιακά ριπίδια, ηλικίας Πλειστόκαινου – Ολοκαίνου και σημαντικού πάχους-έκτασης στο ανατολικό περιθώριο. Στα βόρεια της πεδιάδας, όπου το ρήγμα συνεχίζει κατά μήκος της ακτής, είναι ορατή η ζώνη του ρήγματος και τα Πλειστοκαινικά ριπίδια σε φυσικές τομές (Σχήμα 6).



Σχήμα 6. Εμφάνιση σε τομή της ζώνης του ρήγματος Καβουσίου, οριοθετώντας το ασβεστολιθικό υπόβαθρο (Ενότητα Plattenkalk - Ls) και των Πλειστοκαινικών ριπιδίων (Qc). Στο ένθετο, το ρήγμα Καβουσίου σύμφωνα με Caputo et al. 2010.

Το ρήγμα Καβουσίου αποτελεί την πιο σημαντική σεισμική πηγή για την περιοχή μελέτης, καθώς:

- Ο μέγιστος αναμενόμενος σεισμός (Mw 6.4) είναι ο ισχυρότερος για τα ρήγματα που επηρεάζουν άμεσα τη θέση.
- Τα έντονα μορφολογικά χαρακτηριστικά του ρήγματος επιτρέπουν το χαρακτηρισμό του ως πιθανά ενεργό.
- Το επίκεντρο ενός πιθανού σεισμού αναμένεται να βρίσκεται κοντά στη θέση μελέτης, λόγω της κεκλιμένης μορφολογίας της επιφάνειας του ρήγματος σε βάθος 10-12 km.
- Οι εδαφικές κινήσεις και εντάσεις από δραστηριοποίηση του ρήγματος Καβουσίου αναμένεται να είναι ισχυρότερες στο κατερχόμενο τέμαχος του ρήγματος, δηλ. στην περιοχή της θέσης μελέτης.

Κατά μήκος της ανατολικής ακτής του κόλπου Μιραμπέλου και από τη θέση μελέτης, διέρχεται το παράκτιο ρήγμα KAV2. Το ρήγμα KAV2, με μήκος που εκτιμάται σε περίπου 6 km, έχει διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ έως ΒΔ-ΝΑ και ακολουθεί τη γενική διεύθυνση της ακτογραμμής. Η μη καθαρή μορφολογική εμφάνιση του ρήγματος ερμηνεύεται ως αποτέλεσμα της αλλοίωσης του μορφολογικού πρηνούς λόγω κατολισθήσεων και διάβρωσης από τη δράση του νερού. Στα άκρα του ρήγματος, νότια προς την Παχειά Άμμο και βόρεια προς τη θέση μελέτης, παρατηρείται μια στροφή της διεύθυνσης του ρήγματος προς ΒΔ-ΝΑ. Το ρήγμα KAV2 ερμηνεύεται ως παράλληλη δομή με τα ρήγματα Ψείρας και Καβουσίου. Αν και δευτερεύον ρήγμα της ΡΖΙ, θεωρείται ότι παρουσιάζει αυξημένη σεισμική επικινδυνότητα για τη θέση μελέτης, καθώς διέρχεται από αυτήν και ενδεχόμενη ενεργοποίηση, ακόμα και σε όχι πολύ

ισχυρό σεισμό, θα οδηγήσει σε αυξημένες εδαφικές κινήσεις και παραμορφώσεις σε μικρή απόσταση από το ίχνος του ρήγματος.

Με βάση τα γεωλογικά και τεκτονικά χαρακτηριστικά των ρηγμάτων που αναφέρθηκαν, και χρησιμοποιώντας τις εμπειρικές σχέσεις μήκους ρήγματος – μεγέθους που έχουν αναπτυχθεί για σεισμούς σε παγκόσμιο επίπεδο αλλά και για την περιοχή του Αιγαίου (Wells & Coppersmith 1994, Ambraseys & Jackson 1998, Pavlides & Caputo 2004), γίνεται υπολογισμός των μέγιστων αναμενόμενων μεγεθών σεισμού και μετατόπισεων για τα ρήγματα της περιοχής μελέτης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 που ακολουθεί.

A/A	ΡΗΓΜΑΤΑ	L/SRL ΜΗΚΟΣ (km)	Mw							MAX M (R)
			WC94 (R)	WC94 (R)	WC94 (R)	AJ98 (R)	PC04 (R)	PC04 (R)	PC04 (R)	
1	KAV1	9.6	6.8	6.2	5.6	6.2	6.7	6.4	5.8	6.4
2	KAV2	6.8	6.5	6.0	5.4	6.1	6.5	6.2	5.5	6.2
3	PSI	6.0	6.4	5.9	5.3	6.0	6.4	6.2	5.5	6.2
4	HGF	9.0	6.7	6.1	5.5	6.2	6.6	6.3	5.7	6.3

A/A	ΡΗΓΜΑΤΑ	MD						AD		
		WC94 (m)	WC94 (m)	WC94 (m)	PC04 (m)	PC04 (m)	PC04 (m)	WC94 (m)	WC94 (m)	WC94 (m)
1	KAV1	1.34	0.63	0.003	0.06	0.26	0.71	0.51	0.38	0.0003
2	KAV2	0.82	0.41	0.002	0.03	0.12	0.42	0.34	0.29	0.0002
3	PSI	0.82	0.41	0.002	0.03	0.12	0.42	0.34	0.29	0.0002
4	HGF	1.05	0.51	0.002	0.04	0.17	0.54	0.42	0.33	0.0003

Mw= Μέγεθος ροπής

L/SRL= Μήκος ρήγματος

MD= Μέγιστη μετατόπιση

AD= Μέση μετατόπιση

MAX M= Επιλεγμένο μέγιστο μέγεθος σεισμού

WC94= Wells & Coppersmith (1994)

PC04= Pavlides & Caputo (2004)

AJ98= Ambraseys & Jackson (1998)

Πίνακας 1. Υπολογισμός μέγιστου μεγέθους σεισμού και μέγιστης μετατόπισης. Με βάση τις εμπειρικές σχέσεις από Wells & Coppersmith 1994, Ambraseys & Jackson 1998, Pavlides & Caputo 2004.

Με βάση τα μεγέθη του Πίνακα 1, το μέγιστο αναμενόμενο μέγεθος για τα ρήγματα της περιοχής μελέτης είναι Mw 6.4 (ρήγμα Καβουσίου). Οι τιμές της μέγιστης μετατόπισης εκτιμώνται σε 0,3 έως 0,8 m, τιμές οι οποίες μειώνονται σε απόσταση από τα ρήγματα και εμφανίζονται μειωμένες προς τα άκρα του ρήγματος. Οι τιμές αυτές δεν παρουσιάζουν σημαντική διαφοροποίηση από αντίστοιχες παραμέτρους που αναφέρονται στην βιβλιογραφία (π.χ. Σχήμα 7 Caputo et al. 2006).

Table 1 Principal seismotectonic parameters obtained for the investigated faults.

Fault	<i>L</i> (km)	<i>D</i> (°)	<i>T</i> _{max} (m)	<i>S</i> (mm a ⁻¹)	<i>M</i>	<i>M</i> _{max}	MVD (cm)	MVD _{max} (cm)	<i>n</i>	RI (years)
Spili	16	65	10	0.8	6.6	6.8	46	86	22 ± 6	591 (812–464)
Lastros	11	60	15	1.3	6.4	6.6	31	56	48 ± 14	271 (382–210)
Sfaka	9	75	12	1.0	6.3	6.6	26	45	47 ± 14	276 (394–213)
Ha Gorge	8.5	80	12	0.9	6.3	6.5	24	42	50 ± 15	260 (371–200)
Kastelli	13.5	70	6	0.5	6.5	6.7	39	71	15 ± 5	867 (1300–650)

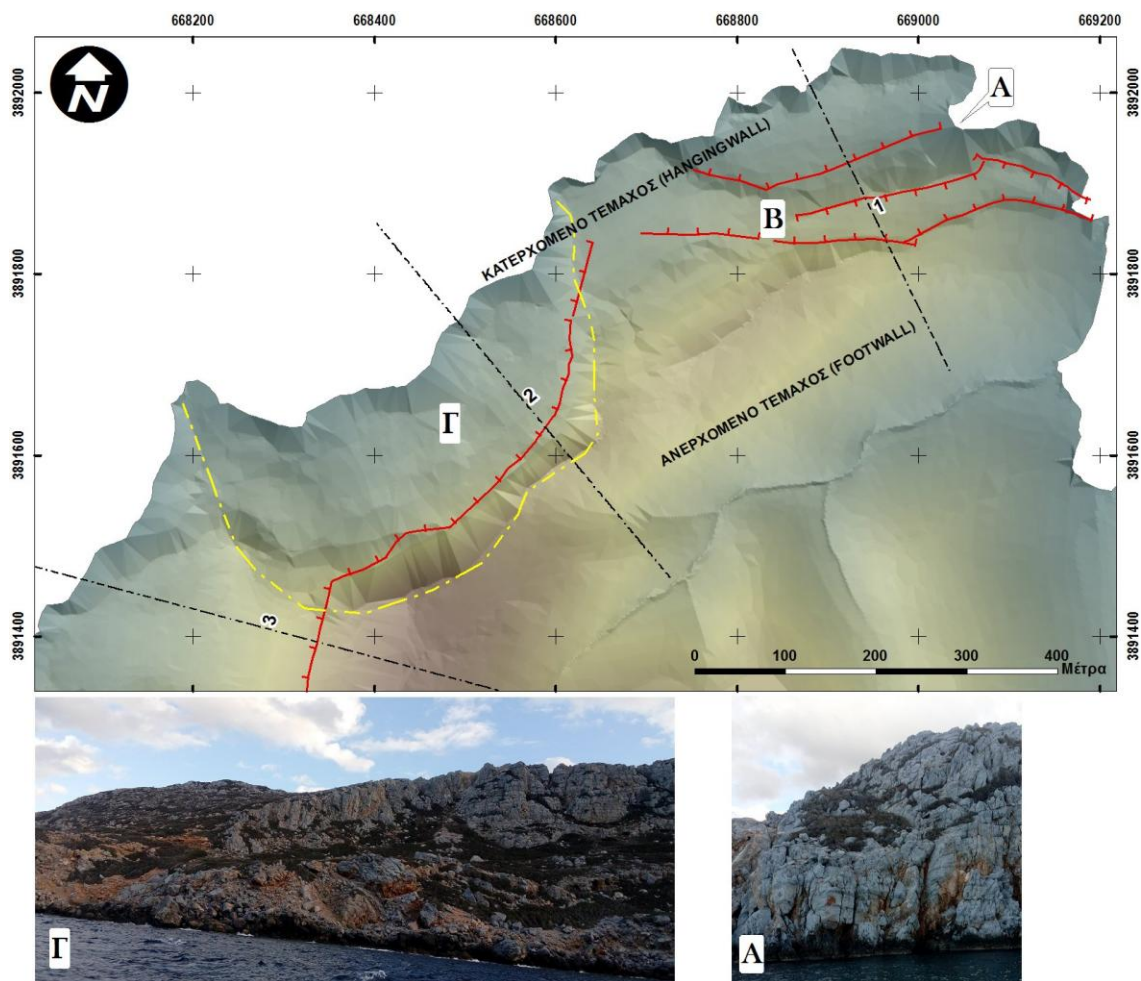
L, length of the mapped Holocene fault scarp; *D*, dip angle of the fault plane; *T*_{max}, maximum throw measured along the fault scarp (uncertainty ±30%, see text for discussion); *S*, long-term slip rate for the last 13 ka obtained from *T* and *D*; *M*, most likely magnitude (best-fit curve; uncertainty ±0.1) based on *L*; *M*_{max}, maximum possible magnitude (worst case scenario; uncertainty ±0.1) based on *L*; MVD, maximum vertical displacement (i.e. throw) as inferred from *M*; MVD_{max}, maximum vertical displacement as inferred from *M*_{max}; *n*: likely number of morphogenic earthquakes based on MVD and *T*; RI, mean recurrence interval for the last 13 ka based on *n* (uncertainty range in parenthesis). The values of *M* and *M*_{max}, MVD and MVD_{max} are obtained from the empirical relationships of Pavlides and Caputo (2004). The reported values are the preferred ones (see text for discussion on specific parameters, associated uncertainties and alternative estimates based on a different time period).

Σχήμα 7. Κύρια χαρακτηριστικά των ρηγμάτων Λάστρου, Σφακά και Χα της ΡΖΙ, σύμφωνα με Caputo et al. 2006.

3. ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΑΡΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η θέση μελέτης τοποθετείται στο βόρειο άκρο του υψώματος/ράχης στα δυτικά του Καβουσιού. Η επιμήκης ράχη κατά μήκος της ανατολικής ακτής του κόλπου Μιραμπέλου, αποτελεί το ανερχόμενο τέμαχος ενός παράκτιου ρήγματος (KAV2). Το ρήγμα αυτό, με βάση τα χαρακτηριστικά των αντίστοιχων ρηγμάτων της περιοχής και των επιφανειακών εμφανίσεων στη θέση μελέτης, είναι ένα κανονικό ρήγμα με κλίση προς δυτικά και μήκος περίπου 6 km. Με βάση τα γενικά χαρακτηριστικά των κανονικών ρηγμάτων στην περιοχή του Αιγαίου, η ζώνη του ρήγματος παρουσιάζει ένα συγκεκριμένο πλάτος, στο οποίο μπορεί να εμφανίζονται πολλαπλές ρηξιγενείς επιφάνειες πέραν της κύριας. Οι επιφάνειες αυτές βρίσκονται σε αποστάσεις μερικών μέτρων μεταξύ τους (συνήθως μέχρι 150-200 m) και είναι παράλληλες ή υποπαράλληλες, συνθετικές και αντιθετικές. Η ζώνη αυτή τοπικά μπορεί διαφοροποιείται και να περιλαμβάνει ρήγματα μικρού μήκους σε μεγάλη γωνία με τις κύριες επιφάνειες ή να αλλάζει απότομα η γωνία διεύθυνσης, συνήθως σε σημεία όπου γίνεται συνένωση ρηγμάτων.

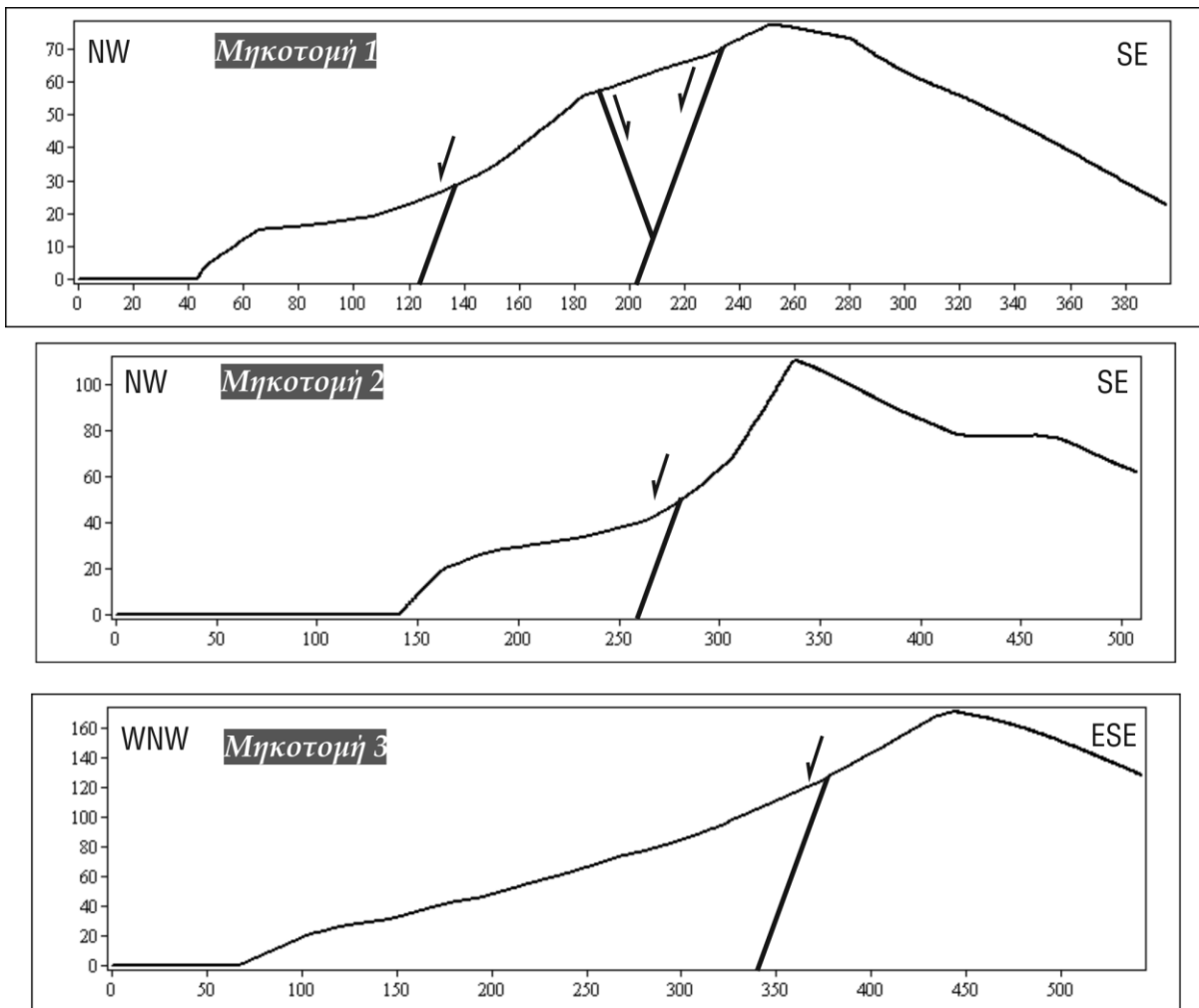
Στο Σχήμα 8 απεικονίζονται τα επιφανειακή ίχνη των νεοτεκτονικών ρηγμάτων στη θέση μελέτης, σύμφωνα με τη Μελέτη Γεωλογικής Καταλληλότητας. Εμφανίζεται και εδώ η περιπλοκότητα της ζώνης του ρήγματος που αναφέρθηκε προηγουμένως, με παράλληλες επιφάνειες στο δυτικό πρηνές του υψώματος. Το γεγονός ότι μεγάλο κομμάτι της ζώνης του ρήγματος KAV2 τοποθετείται υποθαλάσσια, δεν επιτρέπει τον ασφαλή χαρακτηρισμό ενός από τα ρήγματα που εντοπίζονται στη θέση ως την κύρια επιφάνεια του ρήγματος. Με βάση τις παρατηρήσεις στη θέση μελέτης και τη γνώση της δομής αντίστοιχων ρηγμάτων, θεωρείται ως πιθανότερο σενάριο, οι επιφάνειες που εμφανίζονται στο χερσαίο τμήμα της θέσης να είναι δευτερεύουσες επιφάνειες της ρηξιγενούς ζώνης, με την κύρια επιφάνεια να τοποθετείται σε μικρή αλλά απροσδιόριστη απόσταση από την ακτή.



Σχήμα 8. Λεπτομερής αποτύπωση των νεοτεκτονικών ρηγμάτων (κόκκινο – οδοντωτές γραμμές προς την διεύθυνση κλίσης) στη θέση μελέτης, σύμφωνα με τη Μελέτη Γεωλογικής Καταλληλότητας. Διακρίνεται η γενική διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ της ρηξιγενούς ζώνης. Α, Β και Γ θέσεις και φωτογραφίες που επισημαίνονται στο κείμενο. Με κίτρινη στικτή γραμμή απεικονίζεται το αμφιθεατρικό μέτωπο που διαμορφώθηκε από διαδοχικά κατολισθητικά επεισόδια. Με διακεκομμένη μαύρη γραμμή οι μηκοτομές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.

Ασφαλής χαρακτηρισμός της ρηξιγενούς δομής μπορεί να δοθεί μόνο με υποθαλάσσιες διασκοπήσεις κατά μήκος της ακτής για τον εντοπισμό άλλων ρηγμάτων, και με τη μελέτη παλαιοσεισμολογικών ερευνητικών ορυγμάτων στο επίγειο τμήμα προκειμένου να διερευνηθεί εάν η προέλευση των ρηξιγενών επιφανειών είναι καθαρά τεκτονική ή βαρυτική (παράδειγμα θέση Α στα Σχήματα 8 & 10).

Η κλιμακωτή δομή των ρηγμάτων είναι εμφανής στις μηκοτομές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 9. Στην 1^η τομή (θέση Β στο χάρτη του Σχήματος 8) εμφανίζεται και ένα αντιθετικό ρήγμα το οποίο σχετίζεται με τη νοτιότερη επιφάνεια της θέσης στην τομή. Φαίνεται επίσης ο διαμοιρασμός της μετατόπισης στις παράλληλες επιφάνειες, όπου η σταδιακή πτώση της μορφολογίας είναι ομαλότερη (Τομή 1) από τις θέσεις όπου υπάρχει μία επιφάνεια (Τομή 2).



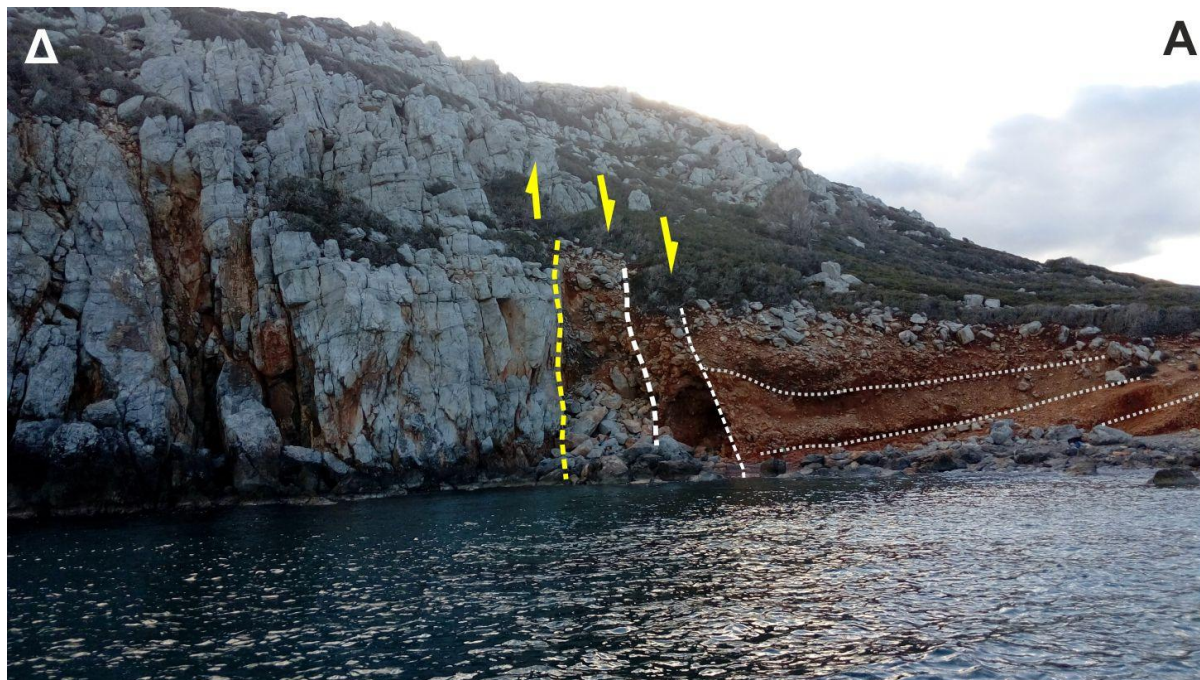
Σχήμα 9. Μηκοτομές της μορφολογικής επιφάνειας και τα ρήγματα κατά μήκος τους. Η θέση των μηκοτομών απεικονίζεται στο Σχήμα 8. Η μορφολογία προέρχεται από ένα ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου διακριτικότητας 0.5m/apixel με βάση τη λεπτομερή τοπογραφική αποτύπωση του οικοπέδου.

Στο κεντροδυτικό τμήμα του οικοπέδου (θέση Γ στο Σχήμα 8) παρουσιάζεται μια αμφιθεατρική διαμόρφωση του αναγλύφου, η οποία εκτιμάται ότι οφείλεται στην καταστροφή τμήματος του μορφολογικού πρσανούς στο ανερχόμενο τέμαχος σε διάφορα κατολισθητικά επεισόδια. Στη φωτογραφία της θέσης Γ στο σχήμα 8, είναι εμφανή τα μπλοκ του ασβεστολιθικού υποβάθρου που έχουν ολισθήσει πάνω στα Πλειστοκαινικά κορήματα.

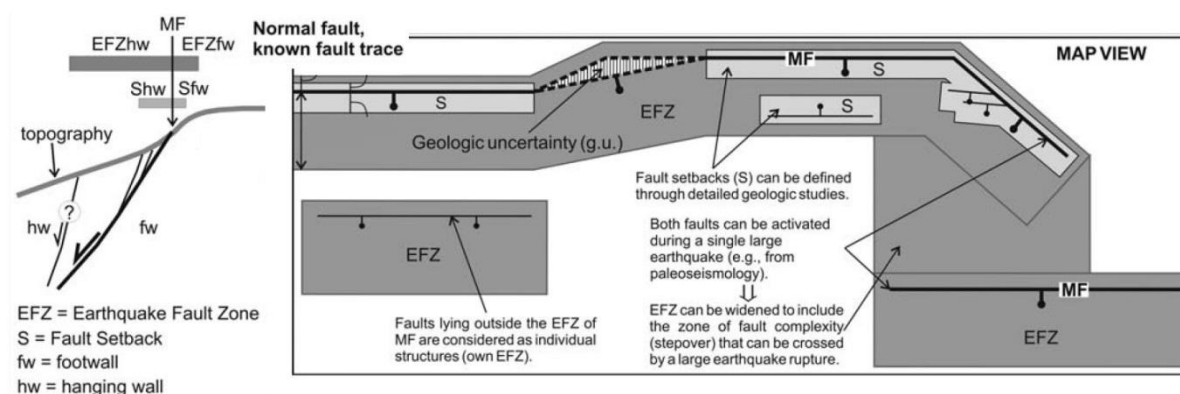
Για το οικόπεδο της θέσης μελέτης, εκτιμάται ότι ο κίνδυνος επιφανειακών διαρρήξεων και τεκτονικών μετατοπίσεων σχετίζεται μόνο με ενεργοποίηση του ρήγματος KAV2. Όπως σημειώνεται και στον πίνακα 1, για το ρήγμα αυτό υπολογίζεται ένα μέγιστο μέγεθος σεισμού Mw 6.2 και αντίστοιχα μέγιστη μετατόπιση 0,12-0,3 m (Pavlidis & Caputo 2004) ή 0,4-0,8 m (Wells & Coppersmith 1994). Οι τιμές αυτές της μετατόπισης είναι οι μέγιστες οι οποίες συνήθως συναντώνται κοντά στο κεντρικό τμήμα του ρήγματος. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4, η θέση μελέτης βρίσκεται στο βόρειο άκρο του ρήγματος KAV2. Με βάση τη γενική κατανομή της μετατόπισης κατά μήκος ενός κανονικού ρήγματος, η μέγιστη μετατόπιση κοντά στο κέντρο μειώνεται σταδιακά προς

τα άκρα, εως και μηδενίζεται. Με βάση τα παραπάνω, οι αναμενόμενες επιφανειακές διαρρήξεις στη θέση μελέτης εκτιμάται ότι δεν θα ξεπεράσουν τα **10-20 cm**.

Με βάση τη χαρτογράφηση των ρηγμάτων στη θέση του οικοπέδου, και την εκτίμηση των τεκτονικών χαρακτηριστικών του ρήγματος ΚΑΥ2, γίνεται οριοθέτηση των ζωνών επικινδυνότητας για επιφανειακές διαρρήξεις. Σε αρκετές πηγές γίνεται αναφορά σε παραδείγματα και εφαρμογές διαφόρων μεθοδολογιών για τη χάραξη τέτοιων ζωνών (Bryant and Hart 2007, Boncio et al. 2012). Συνήθως οι ζώνες (Σχήμα 11) διακρίνονται σε δύο: τις ευρείες ζώνες του ρήγματος (Earthquake Fault Zone, EFZ) και τις στενές ζώνες αστοχίας (fault Setback – S).



Σχήμα 10. Φυσική τομή ρήγματος στη θέση του οικοπέδου. Διακρίνεται η ζώνη του ρήγματος στο όριο με το ασβεστολιθικό υπόβαθρο και τα ερυθρά κορήματα στο κατερχόμενο τέμαχος. Είναι εμφανής η κλίση των κορημάτων προς την επιφάνεια του ρήγματος, αποτέλεσμα της βύθισης του κατερχόμενου τεμάχου.



Σχήμα 11. Αποτύπωση ζωνών επικινδυνότητας εδαφικής διάρρηξης σε κανονικό ρήγμα. Τροποποιημένο σχήμα από Boncio et al. (2012).

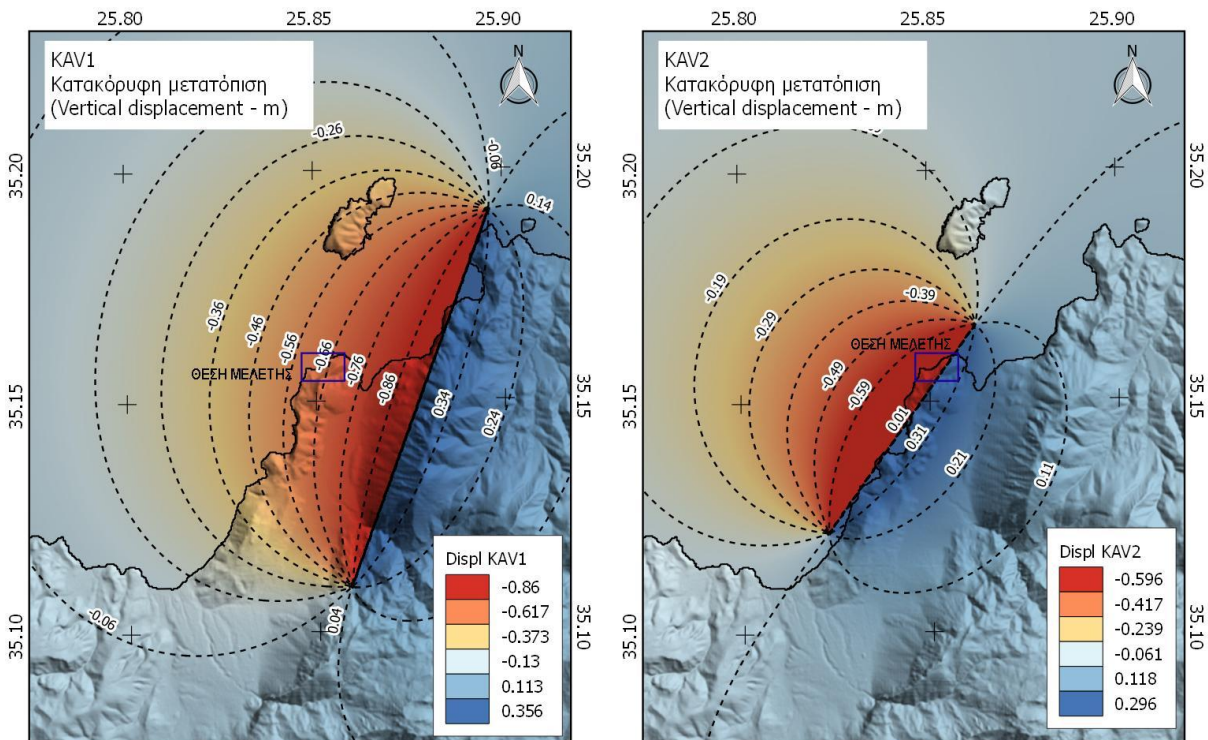
Στην περίπτωση της περιοχής μελέτης, θεωρείται ότι δεν είναι απαραίτητος ο ορισμός της ευρείας ζώνης του ρήγματος (EFZ) καθώς α) η περιορισμένη χερσαία εμφάνιση τμήματος της ρηξιγενούς ζώνης του ΚΑΥ2 δεν επιτρέπει τον ασφαλή καθορισμό αυτής της ζώνης, και β) η οριοθέτηση αυτής της ζώνης έχει εφαρμογή κυρίως σε περιοχές και θέσεις με επιφανειακά χαλαρά ιζήματα όπου μπορεί να μην υπάρχει επιφανειακή εμφάνιση ή η διάρρηξη να διαχέεται κοντά στην επιφάνεια. Αντίστοιχα, οι καλά ορισμένες επιφανειακές εμφανίσεις στο ασβεστολιθικό υπόβαθρο του οικοπέδου επιτρέπουν τον χαρακτηρισμό των στενών ζωνών αστοχίας (S) με μικρότερο εύρος από το προτεινόμενο. **Υιοθετείται μια ζώνη S συνολικού εύρους 10 m, δηλαδή 5m στο κατερχόμενο τμήμα των ρηγμάτων και 5 m στο ανερχόμενο.**

4. ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΘΕΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Με βάση τα χαρακτηριστικά των ρηγμάτων της περιοχής μελέτης όπως αναλύθηκαν παραπάνω, γίνεται υπολογισμός των αναμενόμενων εδαφικών παραμορφώσεων και των ισχυρών εδαφικών κινήσεων. Εξετάζονται δύο σενάρια, ένας σεισμός Mw 6.2 στο ρήγμα ΚΑΥ2 και ένας σεισμός Mw 6.4 στο ρήγμα Καβουσίου (ΚΑΥ1). Για τα ρήγματα, έγινε μια μοντελοποίηση της επιφάνειας σε τρεις διαστάσεις, χρησιμοποιώντας τιμή rake -80 (σύμφωνα με τα γενικά χαρακτηριστικά του εφελκυσμού της περιοχής), γωνία κλίσης 70 και 60 μοίρες αντίστοιχα, και βάθος 12 km.

Για τον υπολογισμό της εδαφικής παραμόρφωσης έγινε χρήση της μεθοδολογίας και των τύπων για την ελαστική παραμόρφωση σε ημι-χώρο από Okada (1992) με τη χρήση MATLAB και GMT. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 12. Για ενεργοποίηση του ρήγματος Καβουσίου, στη θέση μελέτης αναμένεται κατακόρυφη μετατόπιση – βύθιση μεταξύ 0,6-0,7 μέτρων. Για ενεργοποίηση του ρήγματος ΚΑΥ2 αναμένεται κατακόρυφη μετατόπιση – ανύψωση μεταξύ 0,1-0,2 μέτρων. Η παραμόρφωση αυτή, κατανέμεται σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης, **οπότε δεν αναμένεται να επηρεάσει τυχόν κατασκευές** οι οποίες δεν βρίσκονται τοποθετημένες ακριβώς στην ακτογραμμή (δυναμικά θα μπορούσαν να επηρεαστούν κατασκευές στην ακτογραμμή στο ΒΔ τμήμα της περιοχής μελέτης). Οι τιμές αυτές της μετατόπισης αφορούν την παραμόρφωση στο ανώτερο τμήμα του φλοιού οπότε οι απόλυτες τιμές τους αναμένεται να παρουσιάσουν μικρή διακύμανση λόγω πολυπλοκότητας του φαινομένου.

Για τον υπολογισμό των εδαφικών κινήσεων και της επιτάχυνσης, έγινε χρήση του λογισμικού OpenSHA (Field et al. 2003). Το λογισμικό αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό και την χαρτογράφηση των ισχυρών εδαφικών κινήσεων και εντάσεων για ορισμένες σεισμικές πηγές με βάση μια πληθώρα εμπειρικών σχέσεων παλινδρόμησης – regression (*GMPE - Ground-Motion Prediction Equations*). Στο OpenSHA προσφέρεται η επιλογή από μια πληθώρα GMPEs και γίνεται συνεχώς εμπλουτισμός με νέες. Για τους υπολογισμούς της παρούσας μελέτης έγινε εφαρμογή των GMPE από Abrahamson, Silva & Kamai (2014) και Boore, Stewart, Seyhan & Atkinson (2014). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 και στο Σχήμα 13.



Σχήμα 12. Υπολογιζόμενη εδαφική παραμόρφωση με βάση τις σχέσεις του Okada (1992), για σεισμό στο ρήγμα Καβουσίου (αριστερά) και στο ρήγμα KAV2 (δεξιά). Σε ενεργοποίηση του ρήγματος Καβουσίου αναμένεται βύθιση της θέσης μελέτης, ενώ για ενεργοποίηση του KAV2, στη θέση αναμένεται κυρίως ανύψωση.

Οι παράμετροι υπολογισμού για την σεισμική πηγή και τις σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν ως input στο OpenSHA:

IMR = Abrahamson, Silva & Kamai (2014); Tectonic Region = Active Shallow Crust; Component = RotD50

IMR = Boore, Stewart, Seyhan & Atkinson (2014); Tectonic Region = Active Shallow Crust; Component = RotD50

KAV1

Rupture Type = Finite source rupture; Magnitude = 6.4; Rake = -80.0; Set Fault Surface [Num. of Fault Trace Points = 5 ; Num. of Dips = 1 ; Fault Latitudes [Lat-1 = 35.1913 ; Lat-2 = 35.1607 ; Lat-3 = 35.1354 ; Lat-4 = 35.1232 ; Lat-5 = 35.1097] ; Fault Longitudes [Lon-1 = 25.8964 ; Lon-2 = 25.8805 ; Lon-3 = 25.8698 ; Lon-4 = 25.862 ; Lon-5 = 25.8576] ; Depths [Depth-1 = 0.0 ; Depth-2 = 12.0] ; Dips [Dip-1 = 60.0] ; Grid Spacing = 0.01 ; Finite Fault Type = Frankel's]

KAV2

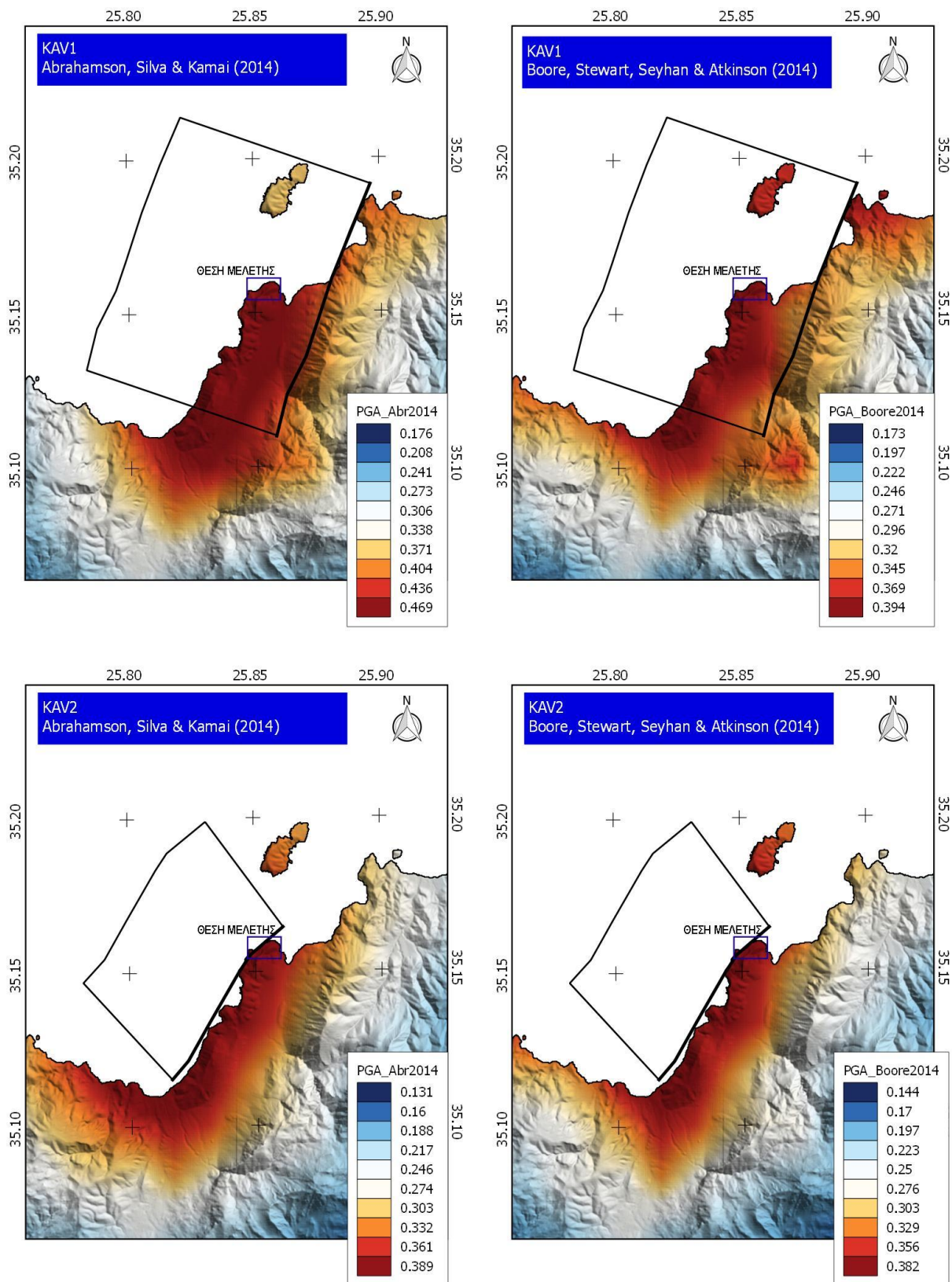
Rupture Type = Finite source rupture; Magnitude = 6.2; Rake = -80.0; Set Fault Surface [Num. of Fault Trace Points = 4 ; Num. of Dips = 1 ; Fault Latitudes [Lat-1 = 35.1644 ; Lat-2 = 35.1554 ; Lat-3 = 35.1212 ; Lat-4 = 35.1152] ; Fault Longitudes [Lon-1 = 25.8611 ; Lon-2 = 25.848 ; Lon-3 = 25.8226 ; Lon-4 = 25.8162] ; Depths [Depth-1 = 0.0 ; Depth-2 = 12.0] ; Dips [Dip-1 = 70.0] ; Grid Spacing = 0.01 ; Finite Fault Type = Frankel's]

		PGA (g)	
Ρήγμα Σεναρίου	Μέγεθος Mw	Abrahamson, Silva & Kamai (2014)	Boore, Stewart, Seyhan & Atkinson (2014)
KAV1	6.4	0.46	0.47
KAV2	6.2	0.47	0.46

Πίνακας 2. Τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης στη θέση μελέτης με βάση τα σενάρια υπολογισμού.

Οι τιμές που προκύπτουν (Πίνακας 2) είναι σχεδόν παρόμοιες για τα διαφορετικά σενάρια και σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν. Οι υψηλές τιμές για το σενάριο του ρήγματος KAV1 εκτιμάται ότι οφείλονται στη θεώρηση του επικέντρου κοντά στη θέση μελέτης. Η πιθανή, αλλά αδύνατον να τεκμηριωθεί στο παρόν στάδιο, μετατόπιση του επικέντρου προς τα άκρα του ρήγματος, μειώνει τις τιμές στα επίπεδα του 0,25-0,35g. Για το σενάριο του ρήγματος KAV2, οι υψηλές τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης οφείλονται στην άμεση γειτονία της θέσης με το επιφανειακό ίχνος της διάρρηξης, συνθήκη η οποία έχει παρατηρηθεί ότι αυξάνει την ισχύ των εδαφικών κινήσεων σε αντίστοιχους σεισμούς.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΤΕΚΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΜΩΝ (ΕΝΕΡΓΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΝ) ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΕΤΑΙ ΓΙΑ ΤΟΥΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΟΙΚΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΤΗ ΘΕΣΗ «ΧΥΛΟΦΤΕΣ-ΣΧΟΙΝΙΑΣ-ΘΟΛΟΣ» ΚΑΒΟΥΣΙΟΥ, ΔΗΜΟΥ ΙΕΡΑΠΕΤΡΑΣ



Σχήμα 13. Κατανομή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) σε g, για σεισμό Mw 6.4 στο ρήγμα Καβουσίου (επάνω) και για σεισμό Mw 6.2 στο ρήγμα KAV2 (κάτω). Εφαρμογή στο λογισμικό OpenSHA (Field et al. 2003). Με παραλληλόγραμμο απεικονίζεται η οριζόντια προβολή του ρήγματος (ελαφρώς απλοποιημένη για τη μοντελοποίηση).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η παρούσα μελέτη συμπληρώνει τη μελέτη γεωλογικής καταλληλότητας στο πλαίσιο των απαιτήσεων του Ελληνικού Αντισεισμικού κανονισμού (ΕΑΚ-2000) για τη δόμηση κτισμάτων σπουδαιότητας Σ2 (συνήθη κτήρια κατοικιών, γραφείων, ξενοδοχείων κ.λπ.), Σ3 και Σ4 (δημόσια κτίρια ή κτίρια που στεγάζουν εγκαταστάσεις μεγάλης οικονομικής αξίας) σε Γεινίαση Ενεργών Σεισμοτεκτονικών Ρηγμάτων.
- Τα ρήγματα που επηρεάζουν άμεσα τη θέση μελέτης, είναι τα ρήγματα Καβουσίου (**KAV1**) στα ανατολικά, και το παράκτιο ρήγμα **KAV2**, τμήμα του οποίου διέρχεται από την περιοχή μελέτης.
- Οι συν-σεισμικές μετατοπίσεις κατά μήκος των **εδαφικών διαρρήξεων**, που αναμένονται σε περίπτωση σεισμικής ενεργοποίησης του ρήγματος KAV2 στη θέση μελέτης, υπολογίζονται σε **λιγότερο από 10-20 cm**.
- Δεν αναμένονται προβλήματα από την κατακόρυφη μετατόπιση του εδάφους λόγω της μετατόπισης του ρήγματος σε μεγάλη κλίμακα.
- Η κατασκευή δόμησης προτείνεται να εξαιρεθεί εντός **μιας χαρακτηρισμένης ζώνης ακαταλληλότητας S συνολικού εύρους 10 m, δηλαδή εύρους 5 m στο κατερχόμενο τμήμα των ρηγμάτων και εύρους 5 m στο ανερχόμενο**.
- Η μέγιστη τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) στη θέση μελέτης υπολογίζεται σε **0,46-0,47g**, για ενεργοποίηση των ρηγμάτων KAV1 και KAV2. Η τιμή αυτή είναι ενδεικτική, καθώς πιο ακριβής υπολογισμός απαιτεί λεπτομερή Τεχνικο-Σεισμολογική μελέτη.
- Η σεισμική δράση σχεδιασμού στην άμεση γειτονία τέτοιων ρηγμάτων θα λαμβάνεται αυξημένη τουλάχιστον κατά 25% σε σχέση με την οριζόμενη στο κεφάλαιο 2 του αντισεισμικού κανονισμού. Για την περιοχή μελέτης, ο ΝΕΑΚ προβλέπει τιμή 0,24g (Ζώνη II). Με βάση τους υπολογισμούς της παρούσας μελέτης και τη διεθνή εμπειρία από αντίστοιχους σεισμούς, εκτιμάται ότι μια **τιμή σχεδιασμού 0,3g – 0,35g** θεωρείται ότι είναι επαρκώς ασφαλής για τις ανάγκες των σχεδιαζόμενων υποδομών και έργων.
- Τέλος, προτείνεται συμπληρωματικά, η ποσοτική μορφοτεκτονική ανάλυση και κυρίως η **παλαιοσεισμολογική μελέτη** κατά μήκος ορισμένων θέσεων των ρηγμάτων (στο οικόπεδο της μελέτης αλλά και κατά μήκος της περιοχής του συνολικού ρήγματος), για την αναγνώριση παλαιοσεισμικών γεγονότων (σεισμική ιστορία των ρηγμάτων), ο υπολογισμός του ρυθμού ολίσθησής τους (slip rate), της μέσης περιόδου επαναλήψεως ισχυρών σεισμών (recurrence interval) και του χρόνου που παρήλθε από το τελευταίο μεγάλο σεισμικό γεγονός (elapsed time), για να τεκμηριωθεί με μεγαλύτερη ασφάλεια η πιθανή δράση των ρηγμάτων.

Οι συντάξαντες



Σπυρίδων Παυλίδης

Καθηγητής Γεωλογίας Α.Π.Θ.



Βαλκανιώτης Σωτήρης

Δρ. Γεωλόγος

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Abrahamson, N.A., Silva, W.J., & R. Kamai. (2014) Summary of the ASK14 Ground Motion Relation for Active Crustal Regions. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1025-1055.

Ambraseys N.N., Jackson J.A., (1998) Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, 133, 2, 390-406

Basili R., Kastelic V., Demircioglu M. B., Garcia Moreno D., Nemser E. S., Petricca P., Sboras S. P., Besana-Ostman G. M., Cabral J., Camelbeeck T., Caputo R., Danciu L., Domac H., Fonseca J., García-Mayordomo J., Giardini D., Glavatovic B., Gulen L., Ince Y., Pavlides S., Sesetyan K., Tarabusi G., Tiberti M. M., Utkucu M., Valensise G., Vanneste K., Vilanova S., Wössner J. (2013). The European Database of Seismogenic Faults (EDSF) compiled in the framework of the Project SHARE. <http://diss.rm.ingv.it/share-edsf/>, doi: 10.6092/INGV.IT-SHARE-EDSF.

Boncio, P., Galli, P., Naso, G. & A. Pizzi (2012) Zoning Surface Rupture Hazard along Normal Faults: Insight from the 2009 Mw 6.3 L'Aquila, Central Italy, Earthquake and Other Global Earthquakes. *Bull Seism. Soc. America*, 102 (3), 918-935.

Boore, D.M., J.P. Stewart, E. Seyhan, and G.M. Atkinson (2014). NGA-West 2 equations for predicting PGA, PGV, and 5%-damped PSA for shallow crustal earthquakes, *Earthquake Spectra*, 30, 1057-1085.

Bryant, W. A., and E. W. Hart (2007). Fault-rupture hazard zones in California: Alquist–Priolo earthquake fault zoning act with index to earthquake fault zones maps. *Calif. Geol. Surv., Spec. Pub.* 42, 41 pp.

Caputo R. and Pavlides S. (2013) The Greek Database of Seismogenic Sources (GreDaSS), version 2.0.0: A compilation of potential seismogenic sources (Mw > 5.5) in the Aegean Region. <http://gredass.unife.it/>, doi: 10.15160/unife/gredass/0200,

Caputo, R., Monaco, C., Tortorici, L., (2006) Multiseismic cycle deformation rates from Holocene normal fault scarps on Crete (Greece). *Terra Nova* 18 (3), 181–190.

Caputo, R., Catalano, S., Monaco, C., Romagnoli, R., Tortorici, G., Tortorici, L., (2010) Active faulting on the island of Crete (Greece). *Geophys. J. Int.* 183, 111–126.

Field, E.H., T.H. Jordan, and C.A. Cornell (2003) OpenSHA: A Developing Community-Modeling Environment for Seismic Hazard Analysis, *Seismological Research Letters*, 74, no. 4, p. 406-419.

Gaki-Papanastassiou, K., Karymbalis, E., Papanastassiou, D., Maroukian, H., 2009. Quaternary marine terraces as indicators of neotectonic activity of the Ierapetra normal fault SE Crete (Greece). *Geomorphology* 104, 38–46

Gallen, S.F., Wegmann, K.W., Bohnenstiehl, D.R., Pazzaglia, F.J., Brandon, M.T., Fassoulas, C., (2014) Active simultaneous uplift and margin-normal extension in a forearc high, Crete, Greece. *Earth Planet. Sci. Lett.* 398, 11–24.

Guidoboni, E., 1994. Catalogue of ancient earthquakes in the Mediterranean area up to 10th century. Istituto Nazionale di Geofisica, Roma. 765pp

ΙΓΜΕ (1959) Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος κλίμακα 1:50.000, Φύλλο Κάτω Χωρίο – Ιεράπετρα. Αθήνα.

Makropoulos, K., Kaviris, G. and Kouskouna, V., (2012) An updated and extended earthquake catalogue for Greece and adjacent areas since 1900. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 1425-1430

Mason, J., Schneiderwind, S., Pallikarakis, A., Wiatr, T., Mechernich, S., Papanikolaou, I. & K. Reicherter (2016) Fault structure and deformation rates at the Lastros-Sfaka Graben, Crete. Tectonophysics, 683, 216-232.

Mountrakis, D., Kiliass, A., Pavlaki, A., Fassoulas, C., Thomaidou, E., Papazachos, C., Papaioannou, C., Roumelioti, Z., (2012) Neotectonic study of western Crete and implications for seismic hazard assessment. J. Virtual Explor. 42 (2), 1–35.

Okada, Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Amer., 82, 1018-1040,

Papazachos, B., Papazachou, C., (1997) Earthquakes in Greece. Zitti Publ., Thessaloniki. 304pp.

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

Φυτρολάκης Ν., Δερμιτζάκης Μ. (1985) Χάρτης Ενεργών Ρηγμάτων της ευρύτερης περιοχής της Ν. Κρήτης. ΟΑΣΠ, Αθήνα, 98p.

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

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΣΤΗΝ ΙΣΧΥΟΥΣΑ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

Ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ-2000) που είναι νόμος του κράτους (ΦΕΚ 613B/12-12-92 και η τροποποίηση και συμπλήρωση του ΦΕΚ781/18-6-2003) και ταυτόχρονα δίνει τις τεχνικές προδιαγραφές για την αντισεισμική δόμηση, διέκρινε τον ελληνικό χώρο σε τέσσερις **Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας** (I, II, III, IV) στο κεφάλαιο 2. Η τροποποίηση του ΕΑΚ-2004 χωρίζει την Ελλάδα σε **τρεις ζώνες: I, II, III** με τιμές σχεδιασμού σεισμικής επιτάχυνσης εδάφους $\alpha=0.16\text{ g}$, 0.24 g και 0.36 g αντίστοιχα (Σχ. 9.2).

Ενώ στο κεφάλαιο 5 ο ΕΑΚ-2000 τονίζει ότι:

«Το υπέδαφος, η τοπογραφία και η γενικότερη γεωλογία της περιοχής ενός δυναμικού έργου πρέπει να εξασφαλίζουν με επαρκή πιθανότητα ότι δε θα υπάρξει κίνδυνος εδαφικής διάρρηξης, αστάθειας πρανών, μεγάλων μόνιμων παραμορφώσεων ή εκτεταμένης ρευστοποιήσεως κατά τη διάρκεια σεισμικού κραδασμού». Ιδιαίτερα στην παράγραφο 5.1.2. «Γεινίαση Ενεργών Σεισμοτεκτονικών Ρηγμάτων», επισημαίνει τη σπουδαιότητα των ενεργών ρηγμάτων στη δόμηση με τη φράση: *«δεν επιτρέπεται η δόμηση κτισμάτων σπουδαιότητας Σ2, Σ3 και Σ4 στην άμεση γειτονία σεισμοτεκτονικών ρηγμάτων που θεωρούνται σεισμικώς ενεργά».* Τα ρήγματα αυτά μπορούν να εντοπιστούν και να χαρτογραφηθούν μόνο με τις εξειδικευμένες μεθόδους της Νεοτεκτονικής. *«Ο χαρακτηρισμός ρηγμάτων ως σεισμικώς ενεργών θα γίνεται με βάση σεισμοϊστορικά και σεισμοτεκτονικά δεδομένα λαμβάνοντας υπόψη και το πιθανό μέγεθος τυχόν σεισμικής διάρρηξης. Η επισήμανση και ο χαρακτηρισμός σεισμοτεκτονικών ρηγμάτων αποτελεί εν γένει αντικείμενο ειδικής μελέτης αναφερόμενης στην ευρύτερη περιοχή οικοδόμησης και όχι σε μεμονωμένα κτίρια».* *«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».*

«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. Στη μελέτη αυτή διερευνώνται οι επιπτώσεις της γεινίασης 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 (του αντισεισμικού κανονισμού)».

Οι ειδικές αυτές μελέτες δεν εξειδικεύονται στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό, αλλά από πλευράς της γεωλογικής συμβολής ουσιαστικά αναφέρονται σε σεισμοτεκτονικούς-νεοτεκτονικούς χάρτες και μελέτες, όπως γενικά περιγράφονται στα κεφάλαια αυτού του βιβλίου και όπως προκύπτουν από τη διεθνή κυρίως και ελληνική βιβλιογραφία, νεοτεκτονικής, σεισμοτεκτονικής, μορφοτεκτονικής, παλαιοσεισμολογίας και εκτίμησης σεισμικής επικινδυνότητας.

Επίσης στον ΕΑΚ-2000 θίγονται επιγραμματικά ο έλεγχος της *ευστάθειας πρανών* (§ 5.1.3) που πρέπει να βασίζεται σε κατάλληλη γεωτεχνική και γεωλογική διερεύνηση (Τεχνικογεωλογική-Νεοτεκτονική)

Στην Υπουργική Απόφαση 723/15-7-1998 για μελέτες γεωλογικής καταλληλότητας για οικοδόμηση οικισμών, βιομηχανικών περιοχών, ζωνών τουριστικής ανάπτυξης κ.ά. προβλέπονται μεταξύ πολλών άλλων γεωλογικών εργασιών και Σεισμοτεκτονικές Μελέτες.