

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ, ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΡΟΖΑΛΙΑ ΜΗΝΑ

**“ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ
ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ – ΠΛΑΤΑΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗΣ
ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΡΑΝΤΑΡ (ΜΤ InSAR) ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ
COPERNICUS (SENTINEL 1)”**



Επιβλέποντες – Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Στυλιανός Λόζιος, Αναπληρωτής Καθηγητής (ΕΚΠΑ)

Κωνσταντίνος Σούκης, Ε.Δι.Π. (ΕΚΠΑ)

Ισαάκ Παρχαρίδης, Καθηγητής (Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών)

Αθήνα, 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το πέρας αυτής της διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να απευθύνω θερμές ευχαριστίες στον Αναπληρωτή καθηγητή κ. Λόζιο Στυλιανό, στον ΕΔΙΠ κ. Σούκη Κωνσταντίνο, όπως επίσης και στον καθηγητή Χαροκοπέου Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Παρχαρίδη Ισαάκ για την καθοδήγησή τους και τις πολύτιμες συμβουλές τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσης διπλωματικής. Ευχαριστώ, επίσης, όλους τους συναδέλφους και συνεργάτες που βοήθησαν και αυτοί με τον τρόπο τους στην περάτωση της εργασίας. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για τη συνεχή υποστήριξή τους και ιδιαίτερα στους γονείς μου για την ανεκτίμητη βοήθειά τους.

ABSTRACT

Characterizing active faults and quantifying their activity are major concerns. Furthermore, monitoring of active faults in areas of high exposure both building store and population is of great importance and provides useful information to assess seismic hazards and risks. Geodetic measurements including GPS and leveling have provided valuable observations of crustal deformation however they don't have the high spatial resolution needed to detect surface creep on individual faults in detail. Combining interferometric results and geological field work can lead to a better understanding of fault movement and the ground deformation that it causes and thus contribute to seismic hazard assessment. The main target of this dissertation is to detect potential displacement along the Kaparelli fault and/or subsidiary faults in the area by the synergy of geological field observations and MTInSAR novel technique which is a well-documented technique for the characterization of ground motions over large spatial areas and is capable of detecting movements with metric resolution and millimetric accuracy.

The study area is part of the Corinth rift and more specifically it is located in Kaparelli – Plataies area (west Beotia, Greece). Surface topography and geomorphology of the Corinth rift are clearly associated with seismic activity along large normal faults. The 1981 earthquake sequence was characterized by shallow earthquakes (<10km) and magnitudes greater than 6R. The third shock ruptured the Kaparelli fault which was activated during that period and produced extensive ground deformation. In a larger scale this fault is a segment of a normal fault zone that is situated to the north of Parnitha Mountain, which represents the boundary between fast-slipping normal faults in Corinth-Perachora regions and slow-slipping faults in Beotia, Attica. The Kaparelli fault is an ~E-W, south dipping normal fault with an active fault plane dipping at about 60°. It presents a complex geometry with numerous hard-linked segments, each one having a few hundred meters length. Field observations include a fault scarp height model (based on field data) and a map of the fault trace based on detailed field measurements.

For the MTInSAR technique a rich dataset of 92 ascending and 55 descending SLC Sentinel 1 A & B scenes covering the period October 2014 to November 2018 were processed using the SARPROZ s/w following the Persistent Scatterers Interferometry technique (PSI).

MTInSAR results show that the Kaparelli-Plataies area is more or less stable with detected ground deformation not exceeding 2mm/year. On the other hand, several linear cryptic structures are exposed. These are not related to any known fault and they could represent secondary faults. The identification of the nature of those structures is part of a future work.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο χαρακτηρισμός ενεργών ρηγμάτων και η ποσοτικοποίηση της δραστηριότητάς τους αποτελούν μείζονος σημασίας ζητήματα. Επιπλέον, η παρακολούθηση ενεργών ρηγμάτων σε περιοχές υψηλής έκθεσης, τόσο των κτιρίων όσο και του πληθυσμού παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την αξιολόγηση σεισμικών κινδύνων. Οι γεωδαιτικές μετρήσεις, συμπεριλαμβανομένου του GPS, έχουν προσφέρει πολύτιμες παρατηρήσεις σχετικά με την παραμόρφωση στον φλοιό της γης. Ο συνδυασμός συμβολομετρικών αποτελεσμάτων και γεωλογικών εργασιών πεδίου μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη κατανόηση της κινηματικής των ρηγμάτων και της παραμόρφωσης εδάφους που προκαλούν και, συνεπώς, συμβάλλει στην αξιολόγηση του σεισμικού κινδύνου. Ο κύριος στόχος της παρούσας διατριβής είναι η ανίχνευση πιθανής μετατόπισης κατά μήκος του ρήγματος του Καπαρελλίου ή/και των δευτερευόντων ρηγμάτων στην περιοχή με τη συνέργεια των γεωλογικών παρατηρήσεων πεδίου και της καινοτόμου τεχνικής MTInSAR, η οποία είναι μια καλά τεκμηριωμένη τεχνική για τον χαρακτηρισμό των κινήσεων εδάφους σε μεγάλες περιοχές και είναι σε θέση να ανιχνεύει κινήσεις με μετρική ανάλυση και ακρίβεια χιλιοστομέτρου.

Η περιοχή μελέτης είναι τμήμα της Κορινθιακής τάφρου και συγκεκριμένα βρίσκεται στην περιοχή Καπαρέλλι - Πλαταιές (δυτική Βοιωτία, Ελλάδα). Η επιφανειακή τοπογραφία και η γεωμορφολογία της Κορινθιακής τάφρου συνδέονται σαφώς με τη σεισμική δραστηριότητα κατά μήκος μεγάλων κανονικών ρηγμάτων. Η σεισμική ακολουθία του 1981 χαρακτηρίστηκε από σεισμούς μικρού βάθους (<10 km) και μεγέθη μεγαλύτερα από 6R. Το τρίτο σεισμικό γεγονός της ακολουθίας προκάλεσε τη διάρρηξη του ρήγματος του Καπαρελλίου και προκάλεσε εκτεταμένη παραμόρφωση εδάφους. Σε μεγαλύτερη κλίμακα, αυτό το ρήγμα αποτελεί τμήμα μιας ζώνης διάρρηξης με κανονικό χαρακτήρα, που βρίσκεται βόρεια της οροσειράς της Πάρνηθας. Η ζώνη αυτή αντιπροσωπεύει το όριο μεταξύ των ταχείας ολίσθησης κανονικών ρηγμάτων στις περιοχές Κορίνθου - Περαχώρας και των βραδείας ολίσθησης ρηγμάτων στη Βοιωτία Αττικής. Το ρήγμα του Καπαρελλίου είναι ένα ~ A-Δ κανονικό ρήγμα, με μία επιφάνεια διάρρηξης που κλίνει με περίπου 60° προς νότο. Παρουσιάζει μια πολύπλοκη γεωμετρία με πολλά τμήματα να παρουσιάζουν hard-link, καθένα από τα οποία έχει μήκος μερικές εκατοντάδες μέτρα. Οι παρατηρήσεις στο πεδίο περιλαμβάνουν τη σημειακή αποτύπωση της κατοπτρικής επιφάνειας και του ίχνους του ρήγματος του Καπαρελλίου (βασισμένο σε δεδομένα πεδίου).

Για την τεχνική MTInSAR χρησιμοποιήθηκε ένα πλούσιο σύνολο δορυφορικών εικόνων 92 ανοδικής και 55 καθοδικής δορυφορικής τροχιάς, τύπου SLC Sentinel 1 A & B, που καλύπτουν την περίοδο από τον Οκτώβριο του 2014 έως τον Νοέμβριο του 2018 χρησιμοποιώντας το λογισμικό SARPROZ και την τεχνική των Σταθερών Ανακλαστήρων (Persistent Scatterers Interferometry - PSI).

Τα αποτελέσματα της MTInSAR δείχνουν ότι η περιοχή Καπαρελλίου-Πλαταιών είναι μάλλον σταθερή, με παραμόρφωση εδάφους που δεν υπερβαίνει τα 2mm / έτος. Από την άλλη πλευρά, η εφαρμογή της μεθόδου αποκάλυψε ορισμένες γραμμικές δομές, οι οποίες δεν είχαν αναγνωριστεί σε προηγούμενες έρευνες. Αυτές δεν σχετίζονται με κανένα γνωστό ρήγμα και ενδεχομένως, θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν δευτερεύοντα ρήγματα. Η εξακρίβωση της φύσης και των χαρακτηριστικών αυτών των δομών αποτελεί μέρος μιας μελλοντικής έρευνας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 :ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	8
1.1. ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ – ΑΛΚΥΟΝΙΔΕΣ ΝΗΣΟΙ	9
1.1.1. ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΤΗΣ ΤΑΦΡΟΥ ΤΗΣ ΚΟΡΙΝΘΟΥ	11
1.1.2. ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΤΑΦΡΟΥ	13
1.1.3. ΑΛΚΥΟΝΙΔΕΣ ΝΗΣΟΙ	16
1.1.4. ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ	17
1.1.5. Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΤΟΥ 1981	20
1.1.6. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΡΗΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΤΟΥ 1981	24
1.2. ΒΟΙΩΤΙΑ	25
1.2.1. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ	26
1.2.2. ΕΝΟΤΗΤΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ-ΒΟΙΩΤΙΑΣ	27
1.2.3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	29
1.2.3.1. Προαλπικό υπόβαθρο	29
1.2.3.2. Μεταλπικά μολασσικά ιζήματα	29
1.2.3.3. Γεωλογικό υπόβαθρο Βοιωτίας	29
1.2.4. ΠΑΛΑΙΟΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΤΗΣ ΒΟΙΩΤΙΑΣ	31
1.2.5. ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΗ ΒΟΙΩΤΙΑ	31
1.2.6. ΥΠΟΠΕΛΑΓΟΝΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ	32
1.2.6.1. Λιθολογικά χαρακτηριστικά	33
1.2.6.2. Στρωματογραφία	34
1.2.6.3. Τεκτονική	36
1.2.6.4. Παλαιογεωγραφία	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	37
2.1. Η ΡΗΓΙΓΕΝΗΣ ΖΩΝΗ ΛΙΒΑΔΟΣΤΡΑΣ - ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ	37
2.2. ΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ	38
2.3. ΤΟ ΡΗΓΜΑ ΤΟΥ ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ	40
2.3.1. ΤΟ ΒΟΡΕΙΟ ΚΑΙ ΤΟ ΝΟΤΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ	42
2.4. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ ΣΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ ΛΙΒΑΔΟΣΤΡΑ	44
2.5. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ³⁶ CL ΣΤΗΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ	45
2.6. ΠΑΛΑΙΟΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑ	47

2.6.1. ΠΑΛΑΙΟΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ-----	47
2.6.2. Η ΠΑΛΑΙΟΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΟ ΡΗΓΜΑ ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ-----	48
2.6.3. ΤΕΚΤΟΝΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ -----	49
2.6.3.1. ΠΑΛΑΙΟΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΚΑΡ 1 -----	49
2.6.3.2. ΠΑΛΑΙΟΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΚΑΡ 2 -----	50
2.6.3.3. ΠΑΛΑΙΟΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΚΑΡ 3 -----	50
2.6.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΛΑΙΟΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ -----	51
2.7. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΠΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΟΡΓΑΝΑ GPS --	51
2.7.1. ΤΟ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ (ΚΑΡΝΕΤ)-----	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΑΙΘΡΟΥ -----	52
3.1. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΥΠΑΙΘΡΟΥ -----	53
3.2. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ (ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΣΕ ΧΑΡΤΗ) -----	54
3.3. ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΥΨΟΜΕΤΡΟΥ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ -----	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ -----	63
4.1. ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COPERNICUS-----	64
4.2. Ο ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ SENTINEL 1-----	65
4.3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΡΑΝΤΑΡ -----	66
4.4. ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ (Differential Interferometry - DInSAR)-----	67
4.5. ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΩΝ Ή ΟΠΙΣΘΟΣΚΕΔΑΣΤΩΝ (PERSISTENT SCATTERER INTERFEROMETRY – PSI)-----	69
4.6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΩΝ -----	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ -----	71
5.1. ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΚΑΙ Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ -----	71
5.2. ΕΡΜΗΝΕΙΑ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-----	81
5.2.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΟΔΙΚΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ -----	83
5.2.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΘΟΔΙΚΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ-----	84
5.2.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΙΜΩΝ-----	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΖΗΤΗΣΗ-----	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-----	92
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ -----	94
ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ -----	94
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΙΟΓΡΑΦΙΑ -----	96

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Κεντρική Ελλάδα και ιδιαίτερα ο Κορινθιακός κόλπος αποτελούν εξαιρετικές περιοχές από άποψη γεωδυναμικής, τεκτονικής, και γεωλογίας γενικότερα.

Η γεωτεκτονική θέση που κατέχει η περιοχή μελέτης εντός του ευρύτερου Αιγαϊκού χώρου, είναι σημαντική. Το τμήμα αυτό της ΝΑ Στερεάς Ελλάδας, καθώς και ο ευρύτερος Ανατολικός Κορινθιακός Κόλπος (Εικόνα 1), βρίσκονται πάνω από το σημείο όπου η Αφρικανική πλάκα κάμπτεται καθώς υποβυθίζεται κάτω από την Ευρωπαϊκή πλάκα στην Πελοπόννησο (Hatzfeld et al., 2000, Leeder et al., 2003).



Εικόνα 1. Ο Ανατολικός Κορινθιακός Κόλπος (ΝΑ της εικόνας ο Σαρωνικός κόλπος).

Στην περιοχή αυτή έχει δοθεί πολύ μεγάλη προσοχή, γι' αυτό και τα κανονικά ρήγματα στον ανατολικό Κορινθιακό κόλπο είναι αδιαμφισβήτητα μερικά από τα πιο καλά μελετημένα παραδείγματα κανονικών ρηγμάτων στον κόσμο.

Ένα από αυτά τα κανονικά ρήγματα του Ανατολικού Κορινθιακού κόλπου και της ΝΑ Στερεάς Ελλάδας, είναι το ρήγμα του Καπαρελλίου. Η ευρύτερη περιοχή του Καπαρελλίου εμφανίζει έντονο ανάγλυφο, το οποίο οφείλεται στην τεκτονική δραστηριότητα που έχει υποστεί, εξαιτίας της ύπαρξης της ρηξιγενούς ζώνης Λιβαδόστρας- Καπαρελλίου. Αυτή η ζώνη ανήκει στην ευρύτερη ρηξιγενή ζώνη του Ανατολικού Κορινθιακού κόλπου. Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του αναγλύφου έχει διαδραματίσει και το υδρογραφικό σύστημα, κυρίως του ρέματος της Λιβαδόστρας.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η παρακολούθηση της παραμόρφωσης στην ευρύτερη περιοχή Καπαρελλίου – Πλαταιών με τη χρήση μεθόδων Συμβολομετρίας και δορυφορικών δεδομένων. Η εργασία, επίσης, στοχεύει στη χαρτογράφηση του ρήματος του Καπαρελλίου (της ρηξιγενούς ζώνης Λιβαδόστρας – Καπαρελλίου) και στην κατασκευή ενός χάρτη που απεικονίζει το ύψος της κατοπτρικής επιφάνειας του ρήματος.

Η καταγραφή της παραμόρφωσης που προκαλείται στην περιοχή μελέτης εξαιτίας της τεκτονικής δραστηριότητας, αποτελεί ένα μεγάλο κομμάτι της παρούσης εργασίας. Για την παρατήρηση της εδαφικής παραμόρφωσης με τεχνικές της Συμβολομετρίας, χρησιμοποιήθηκαν πιο πρόσφατα δορυφορικά δεδομένα (δορυφορικές εικόνες κατά την περίοδο 2014 – 2018).

Ειδικότερα, το πρώτο (1^ο) κεφάλαιο αναφέρεται στο γεωτεκτονικό πλαίσιο εξέλιξης του Ελληνικού χώρου (Αλπική ορογένεση, Ελληνίδες οροσειρές, Ελληνικό τόξο), στο γεωδυναμικό καθεστώς του Κορινθιακού κόλπου, καθώς και στα γεωλογικά στοιχεία που συνθέτουν την Ενότητα Δυτικής Θεσσαλίας – Βοιωτίας.

Στο δεύτερο (2^ο) κεφάλαιο αναλύεται η τεκτονική της περιοχής μελέτης (ρηξιγενής ζώνη Λιβαδόστρας – Καπαρελλίου, το ρήγμα του Καπαρελλίου) και η παλαιοσεισμολογική μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή.

Στο τρίτο (3^ο) κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την τεκτονική μελέτη στην ευρύτερη περιοχή του Καπαρελλίου (λεπτομερής χαρτογράφηση του ρήγματος του Καπαρελλίου και η αποτύπωσή του σε χάρτη).

Στο τέταρτο (4^ο) κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη Συμβολομετρία και στη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε και στο πέμπτο (5^ο) κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή.

Τέλος, στο έκτο (6^ο) κεφάλαιο γίνεται η συζήτηση πάνω στα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις και την επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων σε συνδυασμό με την τεκτονική της περιοχής, ενώ στο έβδομο (7^ο) και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 :ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Η Ελλάδα αποτελεί τμήμα του Αλπικού γεωτεκτονικού κύκλου. Αποτελεί τη συνέχεια της ορογενετικής αλυσίδας των Άλπεων (στη Νέα Ευρώπη), η οποία δια μέσου επί μέρους οροσειρών (Ελληνίδες, Ταυρίδες, Δειναρίδες κ.ά.) καταλήγει στην οροσειρά των Ιμαλαΐων. Η αλυσίδα αυτή είναι το αποτέλεσμα της σύγκρουσης της πλάκας της Ευρασίας και της πρώην Γκοντβάνας (κυρίως Αφρική, Αραβία, Ινδία). (Παπανικολάου, 1986). Η σύγκρουση αυτή αποτελεί ένα από τα γεγονότα που πυροδοτήθηκαν από την καταβύθιση του ωκεανού της Τηθύος, ο οποίος δημιουργήθηκε από τη διάρρηξη της υπερηπειρού Παγγαίας. Οι αλυσίδες των ορέων του Αλπικού Ορογενετικού Συστήματος σχηματίστηκαν από κατεστραμμένα τμήματα του ωκεάνιου πυθμένα της Τηθύος και από πτυχωμένα ιζήματα που είχαν αποθεθεί στην Τηθύ εξαιτίας της σύγκρουσης των δύο πλακών.

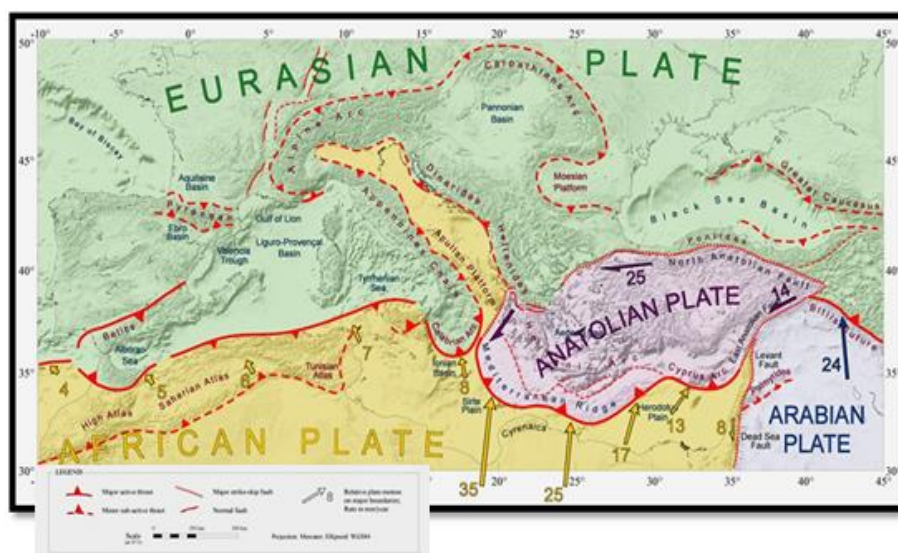
Η ζώνη του Αλπικού Ορογενούς σχηματίστηκε τελικά κατά το Κρητιδικό – Παλαιογενές με την ενσωμάτωση της Απούλιας μικροπλάκας με την Κιμμερική – Ευρασιατική ήπειρο. Έπειτα, ακολούθησε η καταστροφή του ενδιάμεσου ωκεανού της Νεοτηθύος, η απόθεση

οφιολίθων και τέλος η συγκόλληση της Απούλιας μικροπλάκας με την ενιαία πλέον Κιμμερική – Ευρασιατική – Αλπική πλάκα.

Η ζώνη του Μεσογειακού Ορογενούς σχηματίστηκε κατά το Μειόκαινο – Πλειόκαινο, εξαιτίας της συνεχούς υποβύθισης της Αφρικανικής – Μεσογειακής πλάκας κάτω από την Κιμμερική – Ευρασιατική – Αλπική πλάκα.

Το γεωτεκτονικό πλαίσιο της Ελλάδας (Εικόνα 2) περιγράφεται κυρίως από την εξέλιξη των Ελληνίδων Οροσειρών (γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας) και τη συνεχή και σύγχρονη εξέλιξη του Ελληνικού τόξου.

Οι Ελληνίδες οροσειρές αποτελούν παλαιογεωγραφικούς χώρους του “Παλιωκεανού” της Τηθύος. Η περιοχή που καταλαμβάνει η Μεσόγειος, ήταν ο χώρος όπου άρχισε η καταβύθιση του ωκεανού της Τηθύος κάτω από τον ηπειρωτικό φλοιό της Λαυρασίας κατά το Κατ. Ιουρασικό, γεγονός το οποίο οφείλεται στην ανάπτυξη μιας μεσσωκεάνιας ράχης που λειτούργησε κατά το Λιάσιο- Δογγέριο.



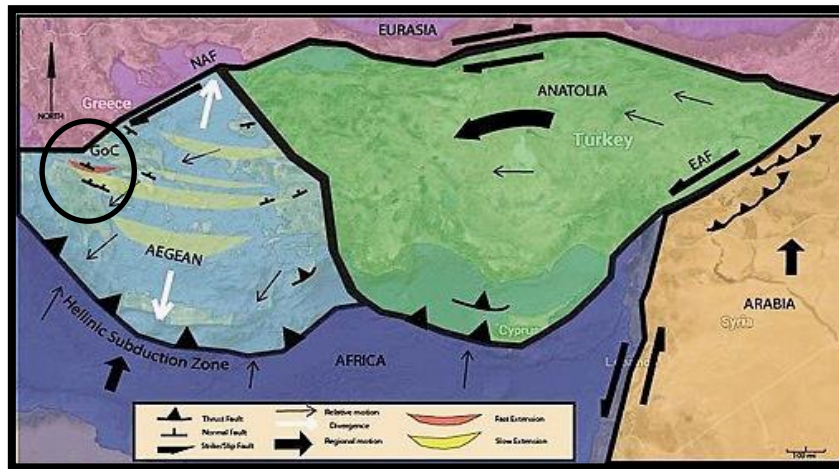
Εικόνα 2. Απεικόνιση της γεωτεκτονικής εξέλιξης του Ελληνικού χώρου. (Chamot –Rooke et al., 2005)

Το Ελληνικό τόξο αποτελεί ουσιαστικά το όριο επαφής της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής πλάκας, όπου λαμβάνει χώρα η βύθιση της ωκεάνιας πλάκας της Ανατολικής Μεσογείου κάτω από την ηπειρωτική πλάκα του Αιγαίου.

1.1. ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ – ΑΛΚΥΟΝΙΔΕΣ ΝΗΣΟΙ

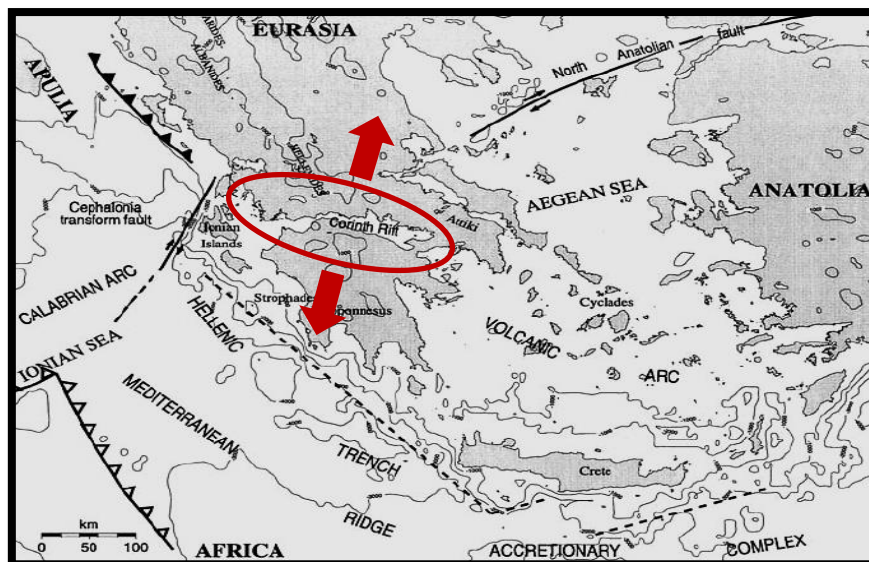
Ο Κορινθιακός κόλπος αποτελεί μία ενεργή τεκτονική τάφρο, η οποία χαρακτηρίζεται ως μία από τις εντονότερες ζώνες παραμόρφωσης του ηπειρωτικού φλοιού του Αιγαίου. Είναι τμήμα του συστήματος του Ελληνικού τόξου και ο σχηματισμός της θεωρείται αποτέλεσμα

της έκτασης που υφίσταται η Αιγαιακή μικροπλάκα λόγω της υποβύθισης της Αφρικανικής πλάκας κάτω από αυτήν. (Εικόνα 3)



Εικόνα 3. Η θέση του Κορινθιακού κόλπου (με κόκκινο, στο εσωτερικό του κύκλου) σε σχέση με την πλάκα του Αιγαίου και αυτή της Αφρικής. Η περιοχή του Κορινθιακού που επισημαίνεται με κόκκινο βρίσκεται κάτω από γρήγορους ρυθμούς έκτασης, ενώ οι άλλες περιοχές με κίτρινο βρίσκονται κάτω από πιο αργούς ρυθμούς έκτασης. Τα άσπρα βέλη αντιπροσωπεύουν απόκλιση. Τα λεπτά, μαύρα βέλη δείχνουν τη σχετική κίνηση. (Armijo, 1999)

Η Κορινθιακή τάφρος αναπτύσσεται επί ηπειρωτικού φλοιού, δυτικά από το ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου, σε μια περιοχή που χαρακτηρίζεται ως μία από τις περισσότερο ενεργές περιοχές έκτασης (Εικόνα 4), παγκοσμίως (Parazachos & Comninakis, 1971; McKenzie, 1972, 1978; Makris, 1976; Doutsos et al., 1988; Jackson & McKenzie, 1988).



Εικόνα 4. Η εκτατική περιοχή του Κορινθιακού κόλπου σε σχέση με το ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου (περιοχή με κόκκινο). Μετατροπή από Poscolieri et al., 2006.

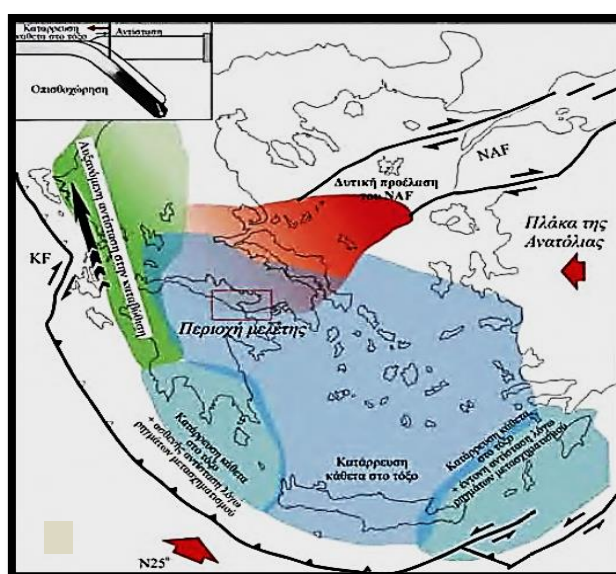
Η έκταση στο Αιγαίο θεωρείται ότι ξεκινά από το Μειόκαινο και ακολουθεί την μετανάστευση του ορογενετικού μετώπου από την κεντρική προς τη δυτική και νότια

Ελλάδα (Le Pichon & Angelier, 1979; Mercier 1981). Ο ρυθμός με τον οποίο συνεχίζει η έκταση της Αιγαιακής μικροπλάκας σήμερα είναι αρκετά υψηλός και υπολογίζεται σε 30mm/yr ως προς την Ευρασιατική πλάκα (Reilinger et al., 1997; Kahle et al., 2000; McClusky et al., 2000).

Θέμα έντονης επιστημονικής συζήτησης αποτελούν οι δυνάμεις που είναι υπεύθυνες για την παρατηρούμενη έκταση. Η άποψη που επικρατεί και προτείνεται ως κινητήρια δύναμη της έκτασης, είναι η οπισθοχώρηση της ζώνης υποβύθισης, λόγω της οποίας προελαύνει και η επωθούμενη πλάκα, με αποτέλεσμα να υφίσταται σημαντική έκταση από το Μειόκαινο έως σήμερα (Royden 1993).

1.1.1. ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΤΗΣ ΤΑΦΡΟΥ ΤΗΣ ΚΟΡΙΝΘΟΥ

Η προς νότο οπισθοχώρηση της υποβυθιζόμενης Αφρικανικής πλάκας, καθώς και η προς τα δυτικά εξώθηση της πλάκας της Ανατολίας κατά μήκος του ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης της Βόρειας Ανατολίας (Dewey and Sengor 1979, Le Pichon et al., 1995, Armijo et al., 1996, McClusky et al., 2000, Doutsos and Kokkalas 2001, Koukouvelas and Aydin 2002) φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τη δημιουργία της τάφρου της Κορίνθου (Εικόνα 5). Μάλιστα θεωρείται ως μία από τις τάφρους που συνδέει το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας με την Ελληνική Ζώνη Υποβύθισης (Doutsos and Kokkalas 2001) και αποτελεί μια δομή έκτασης στα άκρα του επεκτεινόμενου ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης της Βόρειας Ανατολίας. Οι Le Pouchet et al., (2003) πρότειναν ότι η θέση της τάφρου της Κορίνθου, όπως απεικονίστηκε από σεισμικές τομογραφίες όπως αυτές των Tiberi et al., (2000), βρίσκεται σχεδόν επάνω από το σημείο όπου η Αφρικανική πλάκα ξεκινά την απότομη βύθισή της. Αυτή η αλλαγή στη γωνία κλίσης της υποβυθιζόμενης Αφρικανικής πλάκας επηρεάζει σημαντικά τόσο το τοπικό πεδίο τάσης όσο και την εξέλιξη της γεωμετρίας των ρηγμάτων.



Εικόνα 5. Χάρτης στον οποίο φαίνονται τα κυριότερα γεωτεκτονικά στοιχεία τα οποία αλληλεπιδρούν στο σχηματισμό της τάφρου της Κορίνθου. (Ζγουργί, 2009)

Η τάφρος της Κορίνθου συνιστά μια επιμήκη τάφρο με διεύθυνση ΔΒΔ – ΑΝΑ, μήκους 130km και πλάτους από 5km έως 30km. Περιορίζεται από τον κόλπο των Αλκυονίδων στα ανατολικά και από τον πορθμό Ρίου – Αντιρρίου στα δυτικά, ενώ ως βόρεια σύνορά της ορίζονται τα όρη του Λιδορικού και του Παρνασσού στην Στερεά Ελλάδα και στα νότια ο Ωλυνός και η Κυλλήνη. Η συνολική έκτασή της υπολογίζεται στα 4100km², από τα οποία 2400km² καταλαμβάνονται από τον Κορινθιακό κόλπο, ο οποίος φτάνει σε μέγιστο βάθος 896m, έναντι του Πατραϊκού κόλπου με μέγιστο βάθος 135m.

Η θαλάσσια κατωφέρεια εμφανίζεται πιο απότομη στο κεντρικό τμήμα του κόλπου, μεταξύ Ξυλόκαστρου και Κορίνθου, ενώ μειώνεται προς τα δυτικά (McNeill et al., 2005, Charalambakis et al., 2005). Τα βυθομετρικά δεδομένα αποκαλύπτουν ως βαθύτερο σημείο του κόλπου τα 896m κάτω από το επίπεδο της θάλασσας το οποίο εντοπίζεται μεταξύ του κεντρικού και ανατολικού τμήματός του. Το βόρειο τμήμα του κόλπου περιλαμβάνει τις ακτές της Φωκίδας και της νοτιοδυτικής Βοιωτίας. Το νότιο τμήμα από την άλλη πλευρά περιλαμβάνει τις παράκτιες περιοχές της βόρειας Πελοποννήσου, που έχουν υποστεί ανύψωση μέχρι και 2000m από το σημερινό επίπεδο της θάλασσας (Doutsos and Piper 1990).

Η τάφρος της Κορίνθου χαρακτηρίζεται ως μια μεγάλη κλίμακας λεκάνη έκτασης, διαγώνιου εφελκυσμού (Doutsos and Kokkalas 2001). Τις δύο τελευταίες δεκαετίες η τάφρος της Κορίνθου αποτέλεσε αντικείμενο συστηματικής μελέτης καθώς αναδείχθηκε σε πρότυπο εργαστήριο μελέτης των ηπειρωτικών ρηξιγενών ζωνών σε θέματα όπως:

- 1) Η γεωμετρία κανονικών ρηγμάτων (επίπεδα – λιστρικά), (Vita – Finzi and King 1985, King et al., 1985, Doutsos and Piper 1990, Hatzfeld et al., 2000, Morewood and Roberts 2001)
- 2) Η σύνδεση ρηγμάτων και τμηματοποίησή τους (Roberts and Koukouvelas 1996, Koukouvelas and Doutsos 1996, Koukouvelas et al., 1999)
- 3) Η ενεργός τεκτονική των κανονικών ρηγμάτων που τη διατρέχουν (Ori 1989, Poulimenos et al., 1993 Ambraseys and Jackson 1997 Poulimenos and Doutsos 1996, Koukouvelas et al., 2001, Morewood and Roberts 2002, Moretti et al., 2003, Pavlides et al., 2004, Westaway 2002, Goldsworthy et al., 2002, Stefatos et al., 2002, Leeder et al., 2003, 2005, Verriots et al., 2004, McNeill et al., 2005) και
- 4) Η σεισμική επικινδυνότητα των ρηγμάτων (Jackson et al. 1982, King et al. 1985, Koukouvelas and Doutsos 1996; Clarke et al., 1997, Chatzipetros et al., 2005, Kokkalas and Koukouvelas 2005, Caputo et al., 2008, Valkaniotis et al., 2008)

Σύγχρονες γεωδαιτικές μετρήσεις (Clarke et al., 1997, Briole et al., 2000, Avallone et al., 2004), η ιστορική και η ενόργανα καταγεγραμμένη σεισμικότητα (Ambraseys and Jackson 1990, 1997, Abercrombie et al., 1995, Papazachos and Papazachou 1997, Collier et al., 1998, Papadopoulos 2000), καθώς και τα αποτελέσματα χερσαίων νεοτεκτονικών ερευνών (Vita – Finzi and King 1985, Doutsos et al., 1988, Roberts and Jackson 1991, Doutsos and Poulimenos 1992, Roberts and Koukouvelas 1996, Doutsos and Kokkalas 2001, Koukouvelas et al., 2004) κατατάσσουν τον Κορινθιακό κόλπο στις ταχύτερα διανοιγόμενες τάφρους στον κόσμο με μέσο ρυθμό διάνοιξης περίπου 1.5cm/yr και διεύθυνση έκτασης περίπου Β – Ν

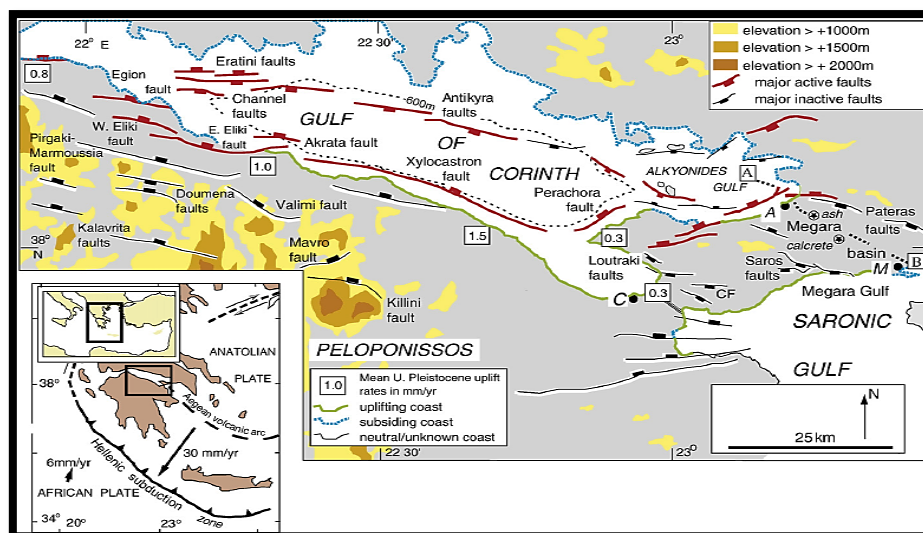
(Papazachos 1976, McKenzie 1978, Jackson 1987, Taymaz et al., 1991, Hatzfeld et al., 1996, Bernard et al., 1997, Baker et al., 1997, Hatzfeld et al., 2000, Avallone et al., 2004).

Σεισμικά προφίλ της τάφρου έδειξαν ότι το πάχος του ηπειρωτικού φλοιού πάνω στον οποίο αναπτύσσεται η τάφρος διαφοροποιείται από δυτικά προς ανατολικά από 40km σε 25km αντίστοιχα (Tiberi et al., 2000, 2001, Clément et al., 2004, Sachrazi et al., 2003, 2007, Zelt et al., 2005). Η ενεργή έκταση της τάφρου της Κορίνθου αντικατοπτρίζεται και στη σχέση μεταξύ του πάχους των ιζημάτων σε αυτή και του βάθους του κόλπου. Υποθαλάσσια σεισμικά δεδομένα (Clément, 2000) δείχνουν ότι το μέγιστο πάχος ιζημάτων (περίπου 2400m) συναντάται κάτω από το μεγαλύτερο βάθος νερού (περίπου 800m), ενώ μικρότερου πάχους αποθέσεις (<1000m) απαντώνται σε μικρότερα βάθη νερού (περίπου 60m) στο δυτικό τμήμα του Κορινθιακού κόλπου.

1.1.2. ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΤΑΦΡΟΥ

Τα ιζήματα Πλειοκαίνου στην τάφρο της Κορίνθου αποτίθενται υπό τεκτονικό έλεγχο. Η απόθεσή τους προσδιορίζεται από δύο διακριτά συστήματα ρηγμάτων (Doutsos et al., 1988, Roulimenos et al., 1989, Πουλημένος, 1991):

- 1) Ένα κύριο σύστημα ΔΒΔ διεύθυνσης κανονικών ρηγμάτων και ΒΒΑ διεύθυνσης ρηγμάτων μεταβίβασης. Η παρουσία των τελευταίων ρηγμάτων μπορούν να εξηγηθούν με δύο πιθανούς τρόπους:
 - A. Σχετίζονται με τα ΔΒΔ κανονικά ρήγματα και θεωρούνται ως ζώνες αλληλεπίδρασης και επομένως κατά πόσο θα αναπτύσσονται, εξαρτάται από την απόσταση των κανονικών ρηγμάτων μεταξύ τους. Τέτοιου είδους ρήγματα μεταβίβασης παρατηρούνται γενικά σε γεωτεκτονικά περιβάλλοντα έκτασης (Peacock, 2002).
 - B. Ή, εναλλακτικά, τα ρήγματα μεταβίβασης να μην συνδέονται με τα ρήγματα που τέμνουν στις περιπτώσεις που το μήκος τους φτάνει τα δεκάδες km και κόβουν εγκάρσια τα μεγάλα κανονικά ρήγματα (Flotté, 2003). Επιβεβαίωση αυτής της υπόθεσης σε μεγάλη κλίμακα αποτελεί η τάφρος του Ρίου, που αποτελεί ζώνη μεταβίβασης μεταξύ των τάφρων της Πάτρας και της Κορίνθου (Flotté et al., 2005).



Εικόνα 6. Γεωλογικός χάρτης του Κορινθιακού κόλπου. Διακρίνονται τα κυριότερα ρηγμάτα (ενεργά και ανενεργά), καθώς επίσης και οι μέσοι ρυθμοί μετατοπίσεων στον κόλπο. (Leeder et al., 2008)

- 2) Ένα δευτερεύον σύστημα ABA κανονικών ρηγμάτων και ΒΒΔ ρηγμάτων μεταβίβασης (Zelilidis et al., 1988, Doutsos and Kokkalas 2001). Αυτό το σύστημα ρηγμάτων θεωρείται ότι προήλθε από την κατάρρευση της ΒΒΔ προϋπάρχουσας δομής των Ελληνίδων, όπως έχει προταθεί από τους Doutsos (1984), Doutsos et al., (1988), Koukouvelas et al., (1996), Kokkalas et al., (2006). Σύμφωνα με την άποψη αυτή, τα ABA ρηγμάτα δραστηριοποιούνται και ελέγχουν την εξέλιξη της ιζηματογένεσης κατά τη διάρκεια της Πλειο-Πλειστοκαινικής διάνοιξης του κόλπου.

Τα ρηγμάτα της τάφρου (Εικόνα 6), ΔΒΔ διεύθυνσης περιλαμβάνουν ένα ανώτερο τμήμα μεγάλης κλίσης ένα ενδιάμεσο τμήμα κλίσης $<45^{\circ}$, ενώ το κατώτερο τμήμα τους έχει κλίση $<20^{\circ}$. Τα ρηγμάτα χαρακτηρίζονται από κανονικό ως πλάγιο χαρακτήρα κίνησης. Κλίνουν κυρίως προς Βορρά, με κλίση $40^{\circ} - 60^{\circ}$ κοντά στην επιφάνεια, ενώ συνοδεύονται από 1 έως 3 αντιθετικά μικρότερα ρηγμάτα νότιας κλίσης, σχηματίζοντας με αυτό τον τρόπο μικρής κλίμακας ασύμμετρες τάφρους (Doutsos et al., 1988, Poulimenos et al., 1989, Doutsos and Piper 1990, Doutsos and Poulimenos 1992, Roberts et al., 1993, Roberts, 1996). Το μήκος τους δεν ξεπερνά τα 25km, ενώ για ένα μικρό αριθμό από αυτά θεωρείται σίγουρη η υποθαλάσσια προέκτασή τους (Armijo et al., 1996, Doutsos and Kokkalas 2001, Zygouri et al., 2008). Εγκάρσια στα παραπάνω και παράλληλα στη διεύθυνση διάνοιξης της τάφρου εμφανίζονται τα ΒΒΑ ρηγμάτα μεταβίβασης τα οποία επίσης παρουσιάζουν κανονικό ως πλάγιο χαρακτήρα κίνησης. (Doutsos and Piper 1990).

Τα ρηγμάτα του βορείου περιθωρίου της τάφρου κλίνουν προς νότο και εμφανίζουν ρυθμό βύθισης μικρότερο ή ίσο με το ρυθμό βύθισης που θεωρείται ότι οφείλεται στη λειτουργία των υποθαλάσσιων ρηγμάτων του νοτίου περιθωρίου. Επιπλέον, οι Exadaktylos et al., 2003, διαπίστωσαν σε πειράματα διάνοιξης της τάφρου, ότι η ολίσθηση σε κύρια ρηγμάτα που κλίνουν προς βορρά, προκαλεί σε επόμενο στάδιο την ολίσθηση σε ρηγμάτα που κλίνουν προς νότο.

Η κατακόρυφη ανύψωση της βάσης των ρηγμάτων του νοτίου περιθωρίου υπολογίζεται σε 1mm/yr σύμφωνα με σεισμολογικά δεδομένα (Tselentis and Makropoulos 1986, Billiris et al., 1991, Davies et al., 1997). Ωστόσο, δεδομένα, που προέρχονται από ανυψωμένες παλαιοακτές και θαλάσσιες αναβαθμίδες, υποδηλώνουν ένα μέσο ρυθμό κατακόρυφης μετατόπισης της τάξης των 4 – 7mm/yr (Stewart, 1996, McNeill and Collier 2004, DeMartini et al., 2004, McNeill et al., 2005). Το γεγονός αυτό αναδεικνύει ένα ελλειμματικό ισοζύγιο της κατακόρυφης κίνησης των ρηγμάτων σε σχέση με τους γεωδαιτικά προσδιορισμένους ρυθμούς έκτασης που είναι 0.3 – 1mm/yr (Clarke et al., 1998, Briole et al., 2000, Avallone et al., 2004).

Σημαντική διαφορά παρατηρείται και στην ανύψωση των ακτών στο νότιο περιθώριο σε σχέση με την αντίστοιχη του βορείου περιθωρίου, είτε αυτή οφείλεται σε βίαια σεισμικά γεγονότα είτε σχετίζεται με τις ευστατικές θαλάσσιες μεταβολές, ενώ μειώνεται από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Ειδικότερα βασιζόμενοι σε θαλάσσιες αναβαθμίδες το δυτικό τμήμα της τάφρου παρουσιάζει ρυθμούς ανύψωσης μεταξύ 1.5 – 2.2mm/yr (Frydas 1991, Stewart and Vita – Finzi 1996, Soter 1998), το κεντρικό τμήμα μεταξύ Ξυλόκαστρου και Κορίνθου 0.4 – 1.57mm/yr (Keraudren and Sorel 1987, Doutsos and Piper 1990, Armijo et al., 1996, Dia et al., 1997, Westaway 2002) και το ανατολικό ανυψώνεται με ρυθμό 0.7 mm/yr (Pirazzoli et al., 1994, Stewart and Vita – Finzi 1996, Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Πίνακας στον οποίο αναφέρονται οι ρυθμοί ανύψωσης σε διάφορες θέσεις του Κορινθιακού.

Ρυθμοί ανύψωσης	Θέση	Μέθοδος Υπολογισμού	Αναφορές
4 – 7 mm/yr	Περιοχή Αιγαλείας	Ανυψωμένες παλαιοακτές και θαλάσσιες αναβαθμίδες	Stewart 1996, McNeill and Collier 2004, DeMartini et al. 2004, McNeill et al. 2005, 2007
1 mm/yr	Νότιος Κορινθιακός	Σεισμολογικά ευρήματα	Tselentis and Makropoulos 1986
1.5 – 2.2 mm/yr	Δυτικός Κορινθιακός	Θαλάσσιες αναβαθμίδες	Frydas 1991, Stewart and Vita-Finzi 1996, Soter 1998
0.4 – 1.57 mm/yr	Περιοχή Ξυλόκαστρου	Θαλάσσιες αναβαθμίδες	Keraudren and Sorel 1987, Doutsos and Piper 1990, Armijo et al 1996, Westaway 2002
0.7 mm/yr	Ανατολικός Κορινθιακός	Θαλάσσιες αναβαθμίδες	Pirazzoli et al. 1994, Stewart and Vita-Finzi 1996
0.3mm/yr	Πίσσα – Σχίνος – Μέγαρο	Χρονολόγηση κοραλλιών	Collier et al. 1992
0.2mm/yr	Ισθμός	Χρονολόγηση κοραλλιών με τεχνικές διαχωρισμού Sr, U, Th	Dia et al. 1997
0.3mm/yr	Εξαμίλια	Χρονολόγηση κοραλλιών με τεχνικές διαχωρισμού Sr, U, Th	Dia et al. 1997
1.5 mm/yr	Μαύρα Λιθάρια	Χρονολόγηση κοραλλιών	Kershaw et al. 2005

Η γεωμετρία των κύριων ρηγμάτων στο βάθος βρίσκεται ακόμα υπό συζήτηση, με διάφορες εργασίες (Doutsos and Piper 1990, Doutsos and Poulimenos 1992, Rigo et al., 1996, Armijo et al., 1996, Hatzfeld et al., 2000, Sorel, 2000, Gautier et al., 2006), βασιζόμενες τόσο σε σεισμολογικά όσο και σε τεκτονικά δεδομένα, να υποστηρίζουν την ύπαρξη ορισμένων μεγάλης κλίσης λιστρικών ρηγμάτων, βάθους περίπου 8 – 10km, τα οποία συνενώνονται σε έναν ορίζοντα αποκόλλησης και καταλήγουν στην επιφάνεια.

1.1.3. ΑΛΚΥΟΝΙΔΕΣ ΝΗΣΟΙ

Ο κόλπος των Αλκυονίδων (Εικόνα 7) αποτελεί μία νεοτεκτονική δομή μήκους 24km και πλάτους 12km. Χωρίζεται από τον Κορινθιακό κόλπο από ένα τεκτονικό κέρασ οριοθετημένο από ρήγματα, το κέρασ των Αλκυονίδων νήσων. Το νοτιότερο περιθώριο των Αλκυονίδων ελέγχεται από τα ρήγματα Στράβα, Δυτικών Αλκυονίδων και ανατολικών Αλκυονίδων, τα οποία κλίνουν προς βορρά (Leeder et al., 2002, 2005; Sakellariou et al., 2007). Το ΒΑ - ΝΔ ρήγμα της Λιβαδόστρας ελέγχει το βόρειο περιθώριο. Το δυτικό ρήγμα και το ανατολικό ρήγμα της Δόμβραιναις σχηματίζουν μια μικρότερη υπολεκάνη στα βόρεια των Αλκυονίδων νήσων (Sakellariou et al., 2007; Leeder et al., 2002; Bell et al., 2009). Το ανατολικότερο τμήμα του κόλπου, ανάμεσα στις Αλκυονίδες νήσους και την ανατολική ακτή, φιλοξενεί μία μορφολογικά ασύμμετρη λεκάνη. Ο κόλπος των Αλκυονίδων σχηματίζει όπως φαίνεται, σύμφωνα με τα παραπάνω, μια απλή δομή ημι – τάφρου που κλίνει προς το νότο και κυριαρχείται από ρήγματα με κλίση προς βορρά (Sakellariou et al., 2007; Leeder et al., 2002; Bell et al., 2009).

Ο κόλπος των Αλκυονίδων σχηματίζει το ανατολικό άκρο του κόλπου της Κορίνθου. Η νότια άκρη του κόλπου οριοθετείται από μια σειρά υποθαλάσσιων ρηγμάτων που ακολουθούν την ακτογραμμή της χερσονήσου της Περαχώρας. Είναι το ρήγμα της Περαχώρας, με διεύθυνση ΝΔ–ΒΑ, μήκος περίπου 9,4km, το οποίο δημιουργεί ρηξιγενές πρανές 540m και έχει αθροιστικό κατακόρυφο άλμα μεγαλύτερο από 1000m. Ανατολικότερα, και επίσης παράλληλα με την ακτογραμμή βρίσκονται τα ρήγματα των Στραβών και των Δυτικών Αλκυονίδων που έχουν μήκος 7-8km διεύθυνση Α – Δ.

Νοτιότερα και πάνω στην χερσόνησο της Περαχώρας υπάρχει ένα μεγάλο ρήγμα διεύθυνσης κυρίως Α-Δ και κλίσης προς τα βόρεια. Είναι το Ρήγμα των Νότιων Αλκυονίδων PNA (South Alkyonides fault segment – SAFS). Το PNA αποτελείται από διάφορα τμήματα (Περαχώρα, Πίσσια, Σχίνος, Ανατολικές Αλκυονίδες, Ψάθα) και έχει συνολικό επιφανειακό μήκος 35km.

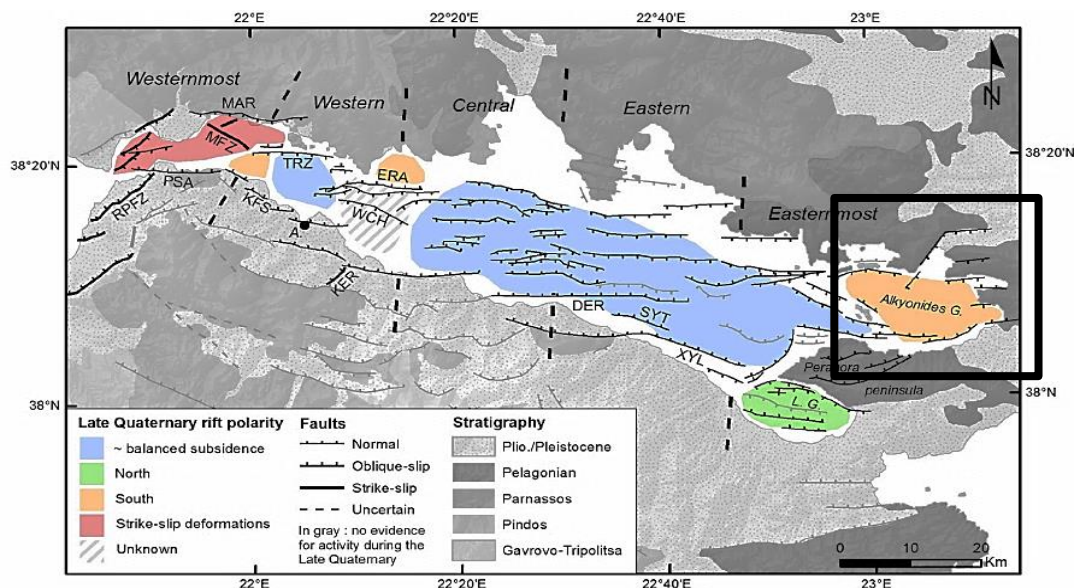
Μετρήσεις δείχνουν μια συστηματική διακύμανση στην κλίση του ρήγματος, η οποία αποκτά μεγάλες τιμές στο κέντρο ενώ έχει φθίνουσα τιμή στα δύο άκρα. Η κλίση μικραίνει κατά το δυτικό (λίμνη Βουλιαγμένης – 20m) και ανατολικό (Ψάθα – 170m) άκρο του PNA ,ενώ η μεγαλύτερη τιμή της παρατηρείται στο τμήμα ανάμεσα στο Σχίνο και το Αλεποχώρι και είναι 2,5 - 3km. Αυτό συσχετίζεται με μια μακρά περίοδο σεισμικών γεγονότων με τα τελευταία δέκα να έχουν συμβεί μέσα στον τελευταίο αιώνα, Κατά τους σεισμούς του 1981 παρατηρήθηκαν επιφανειακές ρωγμές κυρίως στο δυτικό κομμάτι του SAFS.

Στα βορειοδυτικά του κόλπου των Αλκυονίδων είναι το ρήγμα του Καπαρελλίου, με διεύθυνση Α-Δ και νότια κλίση. Το ρήγμα αυτό αποτελείται από τρία κύρια τμήματα δύο από τα οποία διεγέρθηκαν κατά τους σεισμούς του 1981. Το βορειοδυτικό τμήμα, το οποίο έμεινε ανεπηρέαστο εμφανίζει μέγιστο άλμα 600m. Τα δύο ενεργοποιημένα τμήματα είναι το ανατολικό κομμάτι και το νοτιοδυτικό κομμάτι που εμφανίζουν μέγιστα άλματα 400m και 230m αντίστοιχα. Το ανατολικό και το βορειοδυτικό τμήμα του ρήγματος ακολουθούν την κοίτη του ποταμού Λιβαδόστρας.

Στα ανατολικά του ρήγματος του Καπαρελλίου υπάρχει το ρήγμα των Ερυθρών, το οποίο είναι ένα ρήγμα με βόρεια κλίση, μήκους 25km και με άλμα έως και 1000m.

Τέλος, στο κέντρο του Κορινθιακού κόλπου τα ρήγματα Δασκαλιό και Γλαρονήσι σχηματίζουν ένα τεκτονικό κέρασ πάνω στο οποίο εμφανίζονται τα νησιά των Αλκυονίδων. Το ρήγμα Δασκαλιό έχει μήκος 4,1km και διεύθυνση ΔΒΔ–ΑΝΑ ενώ έχει κατακόρυφο άλμα που υπερβαίνει τα 262m. Το ρήγμα Γλαρονήσι έχει μήκος 5,1km και διεύθυνση επίσης ΔΒΔ–ΑΝΑ.

Ο θαλάσσιος χώρος των Αλκυονίδων που αποτελούν ένα μεγάλο κομμάτι του ανατολικού Κορινθιακού, ορίζεται από 8 κύρια ρήγματα. Βορειοανατολικά της ακτής της χερσονήσου της Περαχώρας βρίσκεται το ρήγμα της Περαχώρας το οποίο παρουσιάζει κατωφέρεια 600 m. και μετατοπίζει το νοτιότερο περιθώριο του ρήματος προς τα βόρεια. Το ρήγμα της Στράβας, μαζί με το ανατολικό και δυτικό ρήγμα των Αλκυονίδων οριοθετούν την λεκάνη των Αλκυονίδων προς το Βορρά. Η βόρεια πλευρά του κόλπου των Αλκυονίδων κόβεται από τα ρήγματα της Εγκοσθένας και της Δομβραΐνας. Στο κέντρο της λεκάνης, τα ρήγματα Δασκαλιό και Γλαρονήσι δημιουργούν τεκτονικά κέρατα, τις Αλκυονίδες νήσους.



Εικόνα 7. Γεωλογικός χάρτης του Κορινθιακού. Με το μαύρο τετράγωνο πλαίσιο επισημαίνεται η υπό μελέτη περιοχή. Απεικονίζεται ο κόλπος των Αλκυονίδων νήσων, όπως επίσης και τα μεγαλύτερα ρήγματα στην περιοχή. (Beckers et al., 2015)

1.1.4. ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ

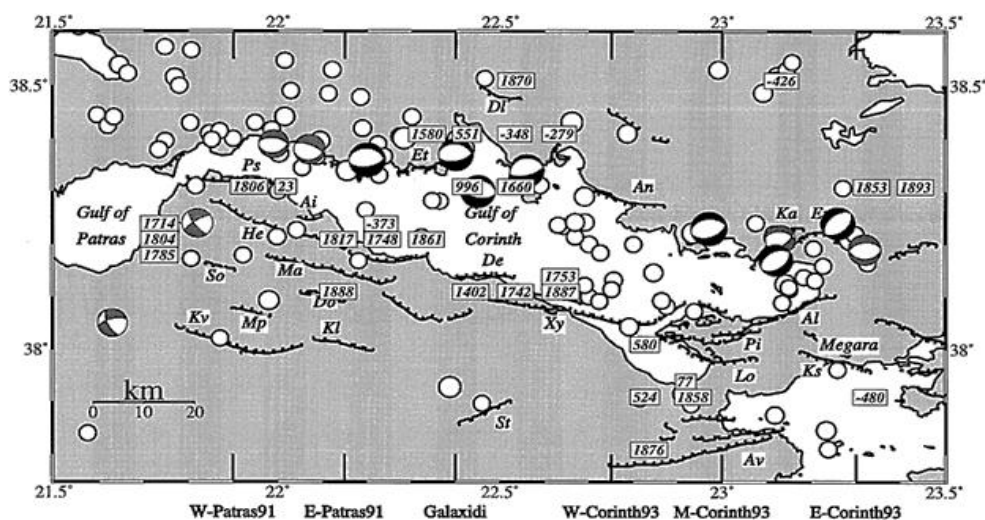
Η σεισμική δραστηριότητα της ευρύτερης περιοχής της Αττικο-Βοιωτίας συμπεριλαμβάνει το σεισμό του 1938 στον Ωρωπό ($M = 6.0$), το σεισμό του 1981 στον κόλπο των Αλκυονίδων ($M = 6.7$) και το σεισμό του 1999 στην Αθήνα ($M = 5.9$). Ο σεισμός του Ωρωπού συνέβη μέσα στην ενεργή τάφρο της Εύβοιας, ενώ αυτός των Αλκυονίδων έλαβε χώρα στην ενεργή τάφρο του κόλπου της Κορίνθου (Ambraseys and Jackson, 1990). Ο σεισμός του 1999,

περιγράφηκε από τους Papadopoulos et al., 2002, ως ένα “απροσδόκητο” γεγονός που έλαβε χώρα κοντά στα όρια της πόλης της Αθήνας.

Ο κόλπος της Κορίνθου χαρακτηρίζεται ιστορικά από αρκετά υψηλό επίπεδο σεισμικότητας (AMBRASEYS & JACKSON 1990, RIGO et al., 1996, JACKSON et al., 1982, KING et al., 1985, BERNARD et al., 1997). Μόνο τα τελευταία 40 χρόνια, η σεισμικότητα στον Κορινθιακό κόλπο έχει συμπεριλάβει έξι σεισμούς μεγέθους πάνω από 6 (BRIOLE et al., 2000).

Η σεισμικότητα της τάφρου της Κορίνθου αποτελεί αντικείμενο έρευνας από την αρχαιότητα (Εικόνα 8), καθώς οι ισχυροί σεισμοί που φιλοξένησε η περιοχή είχαν σαν αποτέλεσμα την απώλεια πολλών ανθρώπινων ζώων ή ακόμα και την καταστροφή ολόκληρων πόλεων. Ήδη ο Στράβων (64–24 π.Χ.) στα «Γεωγραφικά» και ο Πausanias (110–170 μ.Χ.) στις «Περιηγήσεις» περιέγραψαν την ολική καταστροφή αρχαίων πόλεων όπως της Βούρας, της Ελίκης και της Εφύρας (αρχαία Κόρινθος) που οφείλονταν στη δράση καταστρεπτικών σεισμών.

Η ιστορική (από το 480 π.χ.) και η σύγχρονη, ενόργανα καταγεγραμμένη, σεισμικότητα επιβεβαιώνουν ότι η τάφρος του Κορινθιακού κόλπου αποτελεί μία από τις πιο ενεργές περιοχές στο κόσμο (Papazachos & Papazachou 1997). Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι τα τελευταία 110 χρόνια, δέκα ισχυροί σεισμοί με μέγεθος μεγαλύτερο από $M_s=6.2$ και μικρό εστιακό βάθος ($<15\text{km}$) έχουν καταγραφεί στο Κορινθιακό κόλπο, με πλέον πρόσφατο καταστροφικό σεισμό, τον Ιούνιο του 1995 στο Αίγιο, μέγεθος $M_s=6.2$ (Bernard et al., 1997).



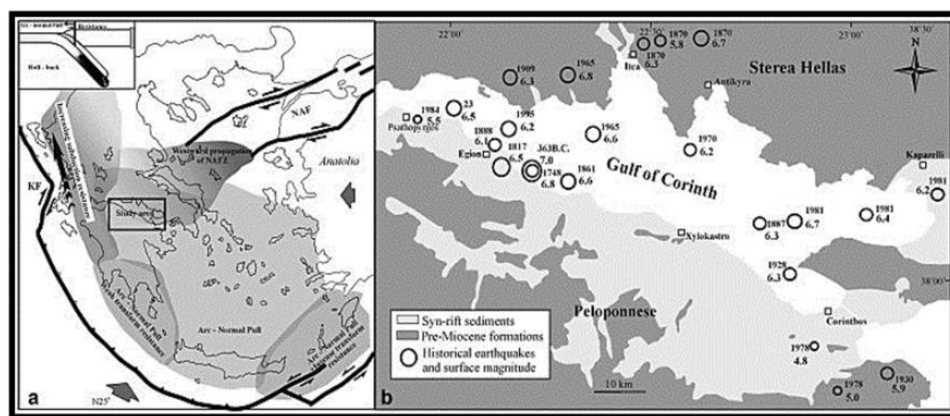
Εικόνα 8. Η σεισμικότητα της Κορινθιακής τάφρου κατά την ιστορική αλλά και σύγχρονη περίοδο. Απεικονίζονται και τα κύρια τεκτονικά στοιχεία του κόλπου. Οι ιστορικοί σεισμοί επισημαίνονται με τα άσπρα τετράγωνα ($\text{magnitudo} > 4.5$) και φαίνονται οι μηχανισμοί γένεσης των μεγαλύτερων εξ' αυτών (Harvard CMT solutions). (Papazachos & Papazachou 1997)

Οι Davies et al., (1997) παρατηρούν αναντιστοιχία μεταξύ της γεωδαιτικά μετρούμενης έκτασης του Κορινθιακού κόλπου και της υπολογιζόμενης έκτασης με βάση τη σεισμική δραστηριότητα της περιοχής. Παρόμοια, με βάση τις εκτιμήσεις για την σεισμική ενέργεια που έχει απελευθερωθεί τον τελευταίο αιώνα, οι Clarke et al., (1997), συμπεραίνουν ότι ισχυροί σεισμοί έχουν καθυστερήσει στον Δυτικό Κορινθιακό κόλπο.

Η πλειοψηφία των σεισμικών γεγονότων σχετίζεται με μία μικρού βάθους, με κλίση προς το βορρά, σεισμική ζώνη. Η εντονότερη συγκέντρωση σεισμικών επικέντρων τοποθετείται σε βάθος μεταξύ 6 – 12km με πιο σύνηθες το βάθος των 10km. Τα σεισμικά γεγονότα εμφανίζουν μεγαλύτερη συγκέντρωση στις περιοχές μεταξύ Αιγίου και Ακράτας και μεταξύ Κορίνθου – Αλκυονίδων. Αυτή η συγκέντρωση συμπίπτει χωρικά με το δυτικό (περιοχή Αιγίου – Ακράτας) και ανατολικό περιθώριο (κόλπος Αλκυονίδων) της τάφρου της Κορίνθου (Koukouvelas and Doutsos 1996). Αντίθετα, ο παλαιότερος καλά καταγεγραμμένος σεισμός του δυτικού τμήματος του Κορινθιακού κόλπου ήταν ο σεισμός της Ελίκης το 373 π.Χ.

Οι σεισμικές ακολουθίες που έχουν μελετηθεί λεπτομερέστερα και καλύτερα είναι αυτές του 1861, του 1981 και του 1995 (Εικόνα 9).

1. Ο σεισμός του 1861: Έλαβε χώρα στην περιοχή της Αιγιαλείας προκαλώντας στην επιφάνεια την πρώτη καταγεγραμμένη συνσεισμική διάρρηξη μήκους 13km διεύθυνσης Α – Δ και μέσης μετατόπισης 1m (Schmidt, 1879). Κατά μήκος του ρήγματος της Ελίκης η παράκτια ζώνη μεταξύ Αιγίου και Διακοπτού υποχώρησε. Σε αυτό μπορεί να οφείλεται και η τμηματοποίηση του ρήγματος (Ambraseys & Jackson 1997). Μερικές από τις ρηξιγενείς επιφάνειες του σεισμού 1861, είναι ακόμα εμφανείς.
2. Η σεισμική ακολουθία του 1981: Αρχικά, το επίκεντρο ήταν οι Αλκυονίδες νήσοι. Η μετέπειτα μεταφορά της ακολουθίας βορειοανατολικά στο Καπαρέλλι, προκάλεσε εκτεταμένες καταστροφές στην Κορινθία, τη Βοιωτία αλλά και στη δυτική Αττική. Παράλληλα εκδηλώθηκε επιφανειακή διάρρηξη μήκους περίπου 20km με μέση μετατόπιση από 0.7 - 1.2m (Jackson et al., 1982, Mariolakos et al., 1982, Collier et al., 1998, Morewood and Roberts 2002).
3. Η σεισμική ακολουθία του 1995: Επέφερε σημαντικές καταστροφές στην περιοχή του Αιγίου, λόγω μιας ισχυρής σεισμικής δόνησης, η οποία προκάλεσε επιφανειακές διαρρήξεις συνολικού μήκους 7.2km, διεύθυνσης σχεδόν Α-Δ σχηματίζοντας μικρές μετατοπίσεις ως 3cm σε αντίθεση με τις μέσες μετατοπίσεις που περιγράφηκαν για τις προηγούμενες ακολουθίες (Koukouvelas and Doutsos 1996, Koukouvelas 1998b). Μια πιθανή μετατόπιση της επιφάνειας του ρήγματος του Αιγίου από τον σεισμό του 1995 θεωρείται μικρή.



Εικόνα 9. Οι μεγαλύτεροι σεισμοί που κλόνισαν τον Κορινθιακό κόλπο (εδώ απεικονίζονται και οι σεισμοί του 1961, 1981 και 1995).

Οι Makropoulos & Burton (1984), υποστήριξαν ότι η σεισμική δραστηριότητα της περιοχής φαίνεται να περιορίζεται μόνο σε μερικά από τα μετά-Μειοκαινικά ρήγματα εφελκυσμού, σε αντίθεση με τα παραπάνω σεισμολογικά δεδομένα που δείχνουν τα σεισμικά επίκεντρα να συγκεντρώνονται γύρω από τον Κορινθιακό κόλπο. Με βάση την ολίσθηση των ρηγμάτων, οι Tselentis & Makropoulos (1986) υπολόγισαν τον ρυθμό κατακόρυφης κίνησης σε 1mm/yr. Αντίθετα, οι Armijo et al., (1996) υπολόγισαν πολύ αυξημένους ρυθμούς κατακόρυφης μετατόπισης της τάξης μεγαλύτερης των 7mm/yr. Παρόμοιες μελέτες από την ανύψωση των παλαιοακτών και των θαλάσσιων αναβαθμίδων κατά μήκος της ακτογραμμής νότια του δυτικού Κορινθιακού κόλπου (Stewart 1996, Zelilidis 2000, McNeill et al., 2004) υπολόγισαν μέσους ρυθμούς κατακόρυφης κίνησης των κύριων ρηγμάτων της τάξης των 4 -7mm/yr.

1.1.5. Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΤΟΥ 1981

Ο σεισμός του 1981 χαρακτηρίζεται από την ακολουθία τριών διαδοχικών μεγάλων σεισμικών γεγονότων (Εικόνα 11). Οι σεισμοί αυτοί έλαβαν χώρα αντίστοιχα στις 24 Φεβρουαρίου ($M_s=6.7$), 25 Φεβρουαρίου ($M_s=6.4$) και στις 4 Μαρτίου ($M_s=6.3$) στο ανατολικό άκρο του Κορινθιακού κόλπου.

Πιο συγκεκριμένα, στις 24 Φεβρουαρίου του 1981, στις 20:53:37 (ώρα GMT), πραγματοποιήθηκε ο πρώτος μεγάλος σεισμός στον κόλπο των Αλκυονίδων, με συντεταγμένες epicέντρου $38^{\circ}13'5''N$, $23^{\circ}06'00''E$, στον Ανατολικό Κορινθιακό κόλπο. Οι περιοχές κοντά στο επίκεντρο, δηλαδή στις Αλκυονίδες, αλλά και περιοχές μακριά από το επίκεντρο, όπως η Αθήνα σε απόσταση 77km, δονήθηκαν έντονα (VI και VII στη κλίμακα Mercalli). Η δόνηση έγινε ιδιαίτερα αισθητή, λόγω του ότι ήταν ένας επιφανειακός σεισμός, αφού το εστιακό του βάθος ήταν 8km. και το μέγεθός του ήταν $M_s=6.7R$. Οι ακριβείς συντεταγμένες του epicέντρου ήταν $38.07^{\circ} N$, $23.00^{\circ} E$.

Ο κύριος μετασεισμός σημειώθηκε στις 02:35:36 ώρες στις 25 Φεβρουαρίου. Οι συντεταγμένες του epicέντρου ήταν $38^{\circ}9'0''N$ και $23^{\circ}8'2''E$. Το μέγεθος αυτού του σεισμικού σοκ ήταν $M_s = 6,2$. Επιπλέον, στις 4 Μαρτίου ένα δεύτερο σεισμικό σετ, που ξεκίνησε στις 21:58 ώρες με μέγεθος $M_s = 6,2$, και ακολούθησε η επόμενη μέρα με εκδήλωση σεισμού μεγέθους $M_s = 5,9$. Το πρώτο σοκ συνέβη περίπου 20km βορειοανατολικά του κύριου σεισμικού γεγονότος ή της κύριας σεισμικής εκδήλωσης της 24ης Φεβρουαρίου [Drakopoulos et al., 1981].

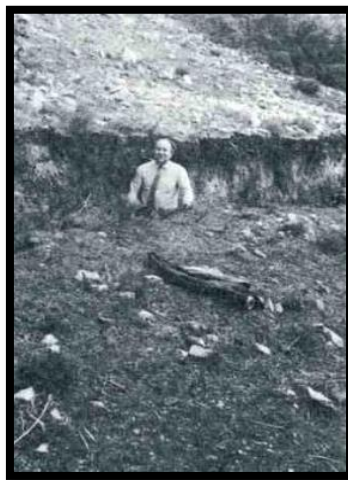
Σύμφωνα με τα στοιχεία του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, ο σεισμός προήλθε από τη ζώνη ρηγμάτων του ανατολικού Κορινθιακού που συνεχίζεται με τη μορφή τόξου και περικλείει την Αττική από βορρά έως νότο.

Εξαιτίας αυτού του επιφανειακού ισχυρού σεισμού επλήγησαν σοβαρά και οι νομοί Κορινθίας, Βοιωτίας, Φωκίδας, Εύβοιας και φυσικά ο νομός Αττικής, όπου “χτυπήθηκε” από τον σεισμό η Αθήνα, η πλέον πυκνοδομημένη περιοχή.

Όπως φαίνεται παρακάτω, οι συνέπειές του σεισμού ήταν πολλές:

- 1) Ανθρωπιστικές, λόγω των θανάτων και τραυματισμών που προκλήθηκαν κατά τις καταρρεύσεις των κτιρίων.
- 2) Οικονομικές, εξ' αιτίας των βλαβών που προκάλεσε η σεισμική κίνηση στις οικοδομές.
- 3) Ψυχολογικές, που οφείλονταν στην όλη αναστάτωση που προκλήθηκε από τον σεισμό.

Συγκεκριμένα, οι συνέπειες πρωτίστως εντοπίστηκαν στις ανθρώπινες απώλειες, αφού συνολικά είκοσι άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους και δεκάδες τραυματίστηκαν. Ο αριθμός των κτιρίων που επλήγησαν και υπέστησαν σοβαρές ζημιές ήταν πολύ μεγάλος, 85.000 κτίρια περίπου έπαθαν βλάβες. Από αυτά τα 22.554 χαρακτηρίστηκαν ως μη επισκευάσιμα. Σε κάποιες περιοχές κοντά στο επίκεντρο παρατηρήθηκαν ακόμα φαινόμενα ρευστοποίησης, πτώσεις βράχων και ασθενές θαλάσσιο κύμα βαρύτητας.



Εικόνα 10. Απεικόνιση ενός τμήματος της κύριας διάρρηξης που προκλήθηκε από το σεισμό του 1981. (Φωτογραφία από την επίσημη ιστοσελίδα του ΟΑΣΠ)

Οι μεγαλύτερες εντάσεις του μετασεισμού αυτού παρατηρήθηκαν στις Πλαταιές (IX+), Καπαρέλλι (IX), Μελισσοχώρι (VIII), Σκούρτα, Πρόδρομος, Οινόφυτα, Μαυρομάτι, Βάγια, και Υψηλάντης (VIII) του νομού Βοιωτίας καθώς και στα Μέγαρα, Βίλια (VIII) του νομού Αττικής. Μετά τον μετασεισμό της 4ης Μαρτίου παρατηρήθηκε επιφανειακή εκδήλωση του σειсмоγόνου ρήγματος κοντά στις βορειοανατολικές ακτές του κόλπου, μήκους 15km και μέσης πτώσης κατά 60cm (Εικόνα 10).

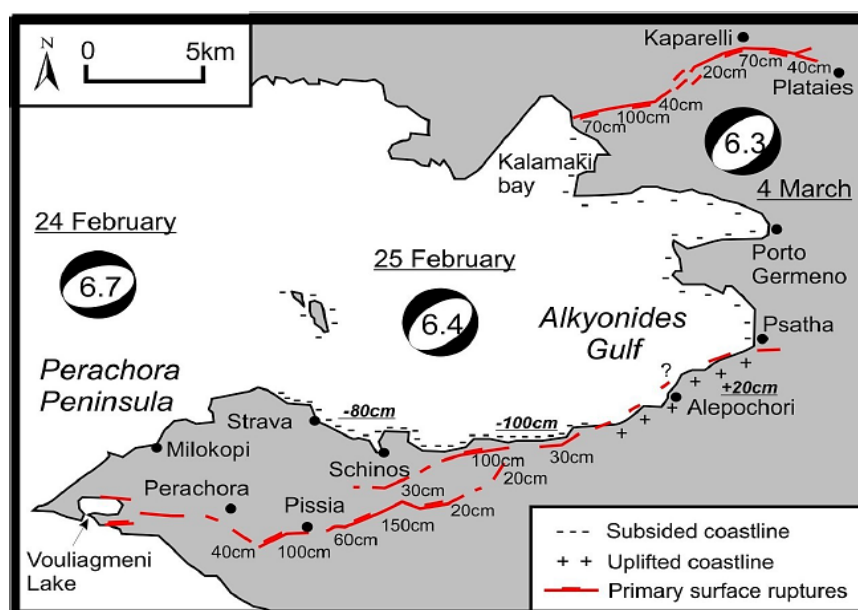
Οι μεγαλύτερες καταστροφές από τους δύο πρώτους σεισμούς προκλήθηκαν σε χωριά που βρίσκονται κοντά στη νότια ακτή του κόλπου (Περαχώρα, Πίσια, Πρόδρομος), ενώ οι μεγαλύτερες ζημιές από το σεισμό της 4ης Μαρτίου προκλήθηκαν σε χωριά στη βορειοανατολική ακτή του κόλπου (Καπαρέλλι, Πλαταιές) (Εικόνα 11). Οι συνολικές οικονομικές επιπτώσεις από αυτούς τους σεισμούς εκτιμήθηκαν για όλη την πλειόσειστη περιοχή σε περίπου 65 εκατ. δολάρια.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2) δίνονται συνοπτικά κάποια από τα χαρακτηριστικά των παραπάνω σεισμών (από Jackson et al., 1982).

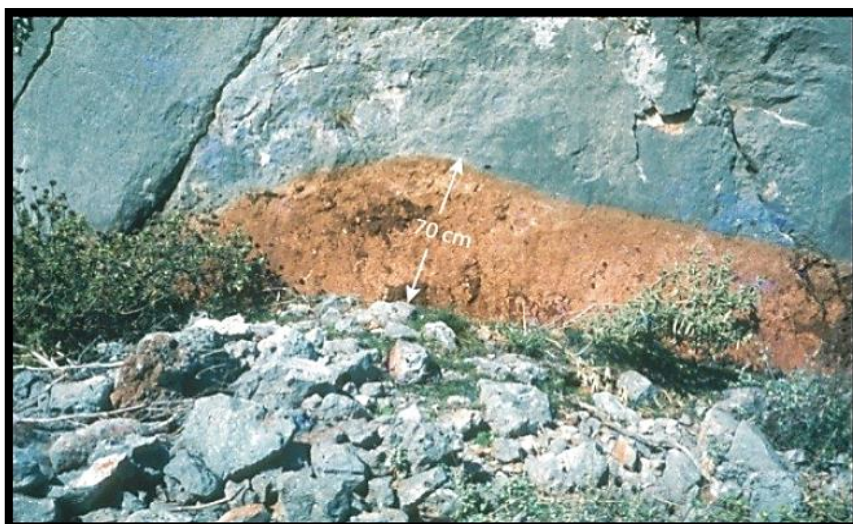
Πίνακας 2. Τα κύρια χωροχρονικά χαρακτηριστικά της σεισμικής ακολουθίας του 1981 στις Αλκυονίδες νήσους.

Ημερομηνία	Ώρα (GMT)	Μέγεθος (Ms)	Συντεταγμένες (Lat., Long.)	Βάθος (km)
24 Φεβρουαρίου, 1981	20:53:38.7	6.7	38.099, 22.842	10
25 Φεβρουαρίου, 1981	02:35:53.3	6.4	38.135, 23.050	8
4 Μαρτίου, 1981	21:58:07.3	6.4	38.176, 23.170	8

Ο σεισμός της 4ης Μαρτίου ήταν υπεύθυνος για τη δραστηριοποίηση της ρηξιγενούς ζώνης Καπαρελλίου - Πλαταιών παράγοντας μια μέση μετατόπιση 50-60cm (Jackson et al., 1982, Mariolakos et al., 1982, Εικόνα 12) και ένα μέγιστο 60 και 120cm αντιστοίχως μεταξύ Καπαρελλίου και Πλαταιών (Papazachos et al., 1982).



Εικόνα 11. Η σεισμική ακολουθία των Αλκυονίδων το 1981, στον ανατολικό Κορινθιακό κόλπο. Φαίνεται η επικεντρική περιοχή και δίνεται έμφαση με κόκκινο στις κύριες διαρρήξεις και στις ανυψώσεις (+) και καθιζήσεις (-) της ακτής. Η εικόνα είναι τροποποιημένη από Jackson et al. (1982), Mariolakos et al. (1982) and Hubert et al. (1996).

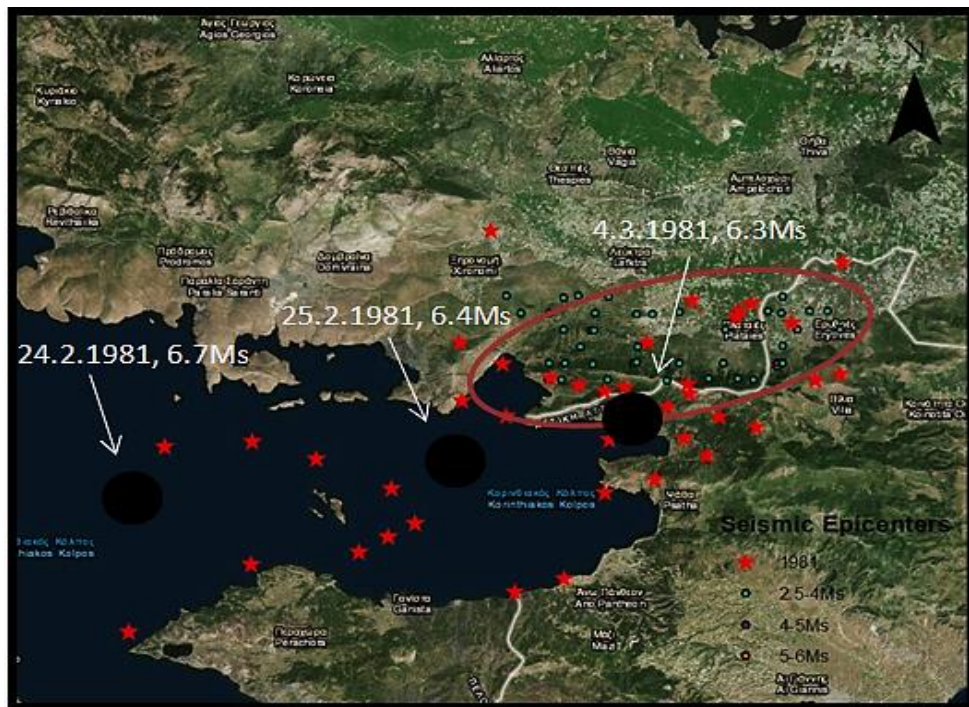


Εικόνα 12. Το αποτέλεσμα μίας εκ των διαρρήξεων του σεισμού του 1981 στη ρηξιγενή ζώνη Καπαρέλλι – Πλαταιές, κατά τη διάρκεια του σεισμού της 4^{ης} Μαρτίου, που προκάλεσε μετατοπίσεις 50 – 60 cm. Η μετατόπιση στο σημείο αυτό έφτασε τα 70 cm. (Ραpanικολαου et al., 2009)

Η ευρύτερη περιοχή του Καπαρελλίου, και γενικότερα η ρηξιγενής ζώνη Λιβαδόστρας - Καπαρελλίου, αποτελούσε ανέκαθεν μια περιοχή με σεισμολογικό ενδιαφέρον, κυρίως εξαιτίας της γειτνιάσής της με την τάφρο του κόλπου της Κορίνθου, η οποία έχει γίνει περιβάλλον παρατήρησης και έρευνας εκ αρχαιοτάτων χρόνων. Ενδιαφέρον φαίνεται να υπάρχει μέχρι και σήμερα, καθώς πολλοί ερευνητές στην Ελλάδα, αλλά και στο εξωτερικό συνεχίζουν να δίνουν έμφαση στο ρήγμα του Καπαρελλίου, το οποίο αποτελεί ένα γεωλογικό στοιχείο που παρατηρείται μέσω διάφορων οργάνων (ενόργανη καταγραφή δεδομένων), όπως είναι οι σταθμοί GPS και τα επιμηκινυσόμετρα TM-71, και προγραμμάτων που παρακολουθούν την κίνησή του, ιδιαίτερα την περίοδο 1981 και έπειτα.

Το μέγεθος των σεισμικών γεγονότων του 1981 και η έκφρασή τους στην επιφάνεια του εδάφους (επιφανειακές διαρρήξεις, μετατόπιση της κοίτης του ποταμού Λιβαδόστρας, η ανύψωση της κατοπτρικής επιφάνειας του ρήγματος στο Καπαρέλλι), επιβεβαίωσαν το αρκετά έντονο σεισμικό υπόβαθρο που αντιπροσωπεύει τον Κορινθιακό κόλπο. Η σεισμική ακολουθία του 1981 επηρέασε σημαντικά τη μορφολογία της περιοχής, προκάλεσε πολλές καταστροφές, κυρίως στο χωριό των Πλαταιών και αναστάτωσε τους κατοίκους των περιοχών και των γειτονικών περιφερειακών ενοτήτων, φτάνοντας έως και την πόλη της Αθήνας.

Παρακάτω (Εικόνα 13), παρουσιάζεται ένας σεισμολογικός χάρτης της περιοχής, ο οποίος περιέχει δεδομένα από τα μεγαλύτερα και σημαντικότερα σεισμικά γεγονότα, για την περίοδο 1981 και έπειτα.



Εικόνα 13. Χάρτης σεισμικών επίκεντρων της σεισμικής ακολουθίας του 1981. Επισημαίνονται τα τρία κύρια επίκεντρα. Οι κόκκινοι αστερίσκοι αντιπροσωπεύουν τα μέγιστα σεισμικά επίκεντρα του σεισμού του 1981. Οι πράσινες κουκίδες αντιπροσωπεύουν σεισμούς μεγέθους 2,5-4 Ms, οι μπλε κουκίδες είναι για σεισμούς 4-5 Ms και οι πορτοκαλί δείχνουν σεισμούς μεγέθους 5-6 Ms. Η έλλειψη καλύπτει την ευρύτερη περιοχή μελέτης των κατοικιών Καπαρέλλι, Πλαταιές, Ερυθρές, Λιβαδόστρα και Καλαμάκι. (Από Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)

1.1.6. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΡΗΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΤΟΥ 1981

Κατά τη διάρκεια της σεισμικής ακολουθίας των Αλκυονίδων κατέστη φανερό ότι η σεισμική ενέργεια μεταδόθηκε σε διεύθυνση Α-Δ με τις υψηλότερες εντάσεις να καταγράφονται στις περιοχές Κιάτο, Περαχώρα, Πίσια, Σχίνο, Αλεποχώρι κατά την 24/02/1981 και 25/02/1981 και στις περιοχές Καπαρέλλι και Πλαταιές στις 04/03/1981. Ολόκληρο το διάστημα από τα τέλη Φεβρουαρίου ως τις αρχές Μαρτίου καταγράφηκε μεγάλο πλήθος μετασεισμών στην ευρύτερη περιοχή που ορίζουν τα επίκεντρα των κύριων σεισμών (Jackson et al., 1982, Mariolakos et al., 1982, Parazachos et al., 1984, King et al., 1985, Ambraseys and Jackson 1990, Taymaz et al., 1991, Abercombie et al., 1995, Hubert et al., 1996, Morewood and Roberts 2001). Το αποτέλεσμα των δύο πρώτων γεγονότων ήταν επιφανειακές διαρρήξεις που εμφανίστηκαν στη ζώνη Περαχώρα – Πίσια – Σχίνος – Ψάθα συνολικού μήκους 15–20km και κατακόρυφη μέγιστη μετατόπιση που έφθασε τα 1.2m σε θέσεις όπου τα μέτωπα των ρηγμάτων καλύπτονταν από κορήματα ή αλλουβιακές αποθέσεις (Κούκης 1981, Κούκης και Ρόζος 1982, Jackson et al., 1982, King et al., 1985, Rondoyanni and Koukis 1989).

Το τρίτο σεισμικό γεγονός επηρέασε την περιοχή μεταξύ Καπαρελλίου και Πλαταιών στην οποία δημιουργήθηκε επιφανειακή διάρρηξη 12km και κατακόρυφη μετατόπιση 70cm (Jackson et al., 1982, Morewood and Roberts 2001). Σε αυτήν την περιοχή μάλιστα πραγματοποιήθηκαν τρεις εκτεταμένες παλαιοσεισμολογικές τομές (Παράγραφος 2.6)

αποκαλύπτοντας ρυθμούς ολίσθησης της τάξεως των 0.3mm/yr με διάστημα επαναληψιμότητας 2.300 χρόνια (Chatzipetros et al., 2005, Kokkalas et al., 2007).

Νωρίτερα, οι Collier et al., (1998), πραγματοποιώντας παλαιοσεισμικές εκσκαφές στην περιοχή που εντοπίστηκαν οι εδαφικές διαρρήξεις από τους σεισμούς του Φεβρουαρίου (περιοχή Πισίων και Σχίνου) υπολόγισαν ρυθμό επανάληψης για το ρήγμα του Σχίνου πολύ μικρότερο από τον αντίστοιχο του Καπαρελλίου της τάξης των 330 χρόνων. Οι Jackson et al., (1982), επεσήμαναν ότι ολόκληρη η χερσόνησος της Περαχώρας ανυψώθηκε σαν αποτέλεσμα της σεισμικής κίνησης στα υποθαλάσσια ρήγματα που βρίσκονται στην βορειοδυτική ακτή της χερσονήσου τα οποία παρήγαγαν το πρώτο σεισμικό επεισόδιο. Το ίδιο διάστημα οι Vita-Finzi και King (1985), κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι στην πραγματικότητα η χερσόνησος υπέστη βύθιση, επειδή τα υποθαλάσσια ρήγματα δεν συμμετείχαν στην κίνηση. Αργότερα οι Pirazzoli et al., (1994), διαπίστωσαν ότι δεν σημειώθηκε καμιά ιδιαίτερη μεταβολή κατά μήκος των ακτών της χερσονήσου, συμπέρασμα στο οποίο οδηγήθηκαν και οι Hubert et al., (1996), οι οποίοι υπαινίσσονται κίνηση μόνο στη ξηρά και όχι στην υποθαλάσσια περιοχή του κόλπου των Αλκυονίδων. Επιπλέον, οι Stewart et al., (1997), παρατήρησαν ότι στον κόλπο της Ψάθας (ανατολικά του κόλπου των Αλκυονίδων) όπου μετά το σεισμικό γεγονός του 1981 συνέβη θαλάσσειση της περιοχής, αυτή δεν έχει καταγραφεί από λιθολογικά στοιχεία στα σύγχρονα επιφανειακά στρώματα, αν και η βαθύτερη στρωματογραφία υπονοεί αλλοίωση των θαλάσσιων και χερσαίων συνθηκών. Η θαλάσσειση της περιοχής σε αυτή την περίπτωση μπορεί να αποδοθεί σε αύξηση της απορροής φρέσκου νερού παρά ως αποτέλεσμα δράσης τσουνάμι.

1.2. ΒΟΙΩΤΙΑ

Η περιφερειακή ενότητα Βοιωτίας (Εικόνα 14) βρίσκεται στην Ανατολική Στερεά Ελλάδα και καταλαμβάνει το κεντρικό τμήμα της. Είναι μία από τις πέντε περιφερειακές ενότητες της περιφέρειας Στερεάς Ελλάδας (οι άλλες τέσσερις είναι: Εύβοιας, Ευρυτανίας, Φθιώτιδας και Φωκίδας). Συνορεύει νότια με την Αττική, δυτικά με τη Φωκίδα, βόρεια με τη Φθιώτιδα και ανατολικά με την Εύβοια. Βρέχεται από τον βόρειο και νότιο Ευβοϊκό κόλπο, ενώ νοτιοδυτικά βρέχεται από τον Κορινθιακό κόλπο.



Εικόνα 14. Η κατανομή της Βοιωτίας στον χάρτη της Ελλάδος.

1.2.1. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

Γεωμορφολογικά, η περιοχή της Βοιωτίας παρουσιάζει σχετικά έντονο ανάγλυφο, με ορεινούς όγκους, λεκάνες και πεδιάδες (μεγάλες εκτάσεις). Πιο συγκεκριμένα, το νοτιοδυτικό τμήμα της Βοιωτίας διασχίζει ο ορεινός όγκος του Ελικώνα, το δυτικό τμήμα ο Παρνασσός και το νοτιοανατολικό οι ορεινοί όγκοι της Πάρνηθας και του Κιθαιρώνα. Το υπόλοιπο τμήμα της περιοχής είναι πεδινό και διασχίζεται στα βόρεια από τον Βοιωτικό Κηφισό (πεδιάδα της Κωπαΐδας) και στα νοτιοανατολικά από τον Ασωπό ποταμό. Στο βορειοανατολικό άκρο, υπάρχουν οι λίμνες Υλίκη και Παραλίμνη, ενώ το νότιο τμήμα διασχίζεται σε όλο το μήκος του, από τα δυτικά προς τα ανατολικά, από τον αγωγό του Μόρνου.

Το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής καλύπτεται από πεδιάδες, όπως είναι αυτή της Θήβας, της Χαϊρώνειας και της Κωπαΐδας (χαρακτηρίζεται ως πεδιάδα έπειτα από αποξήρανση της ομώνυμης λίμνης). Η πεδιάδα της Θήβας αποτελεί στην ουσία μία λεκάνη, με διεύθυνση Α-Δ, η οποία χαρακτηρίζεται ως τοξοειδής και κοίλη προς τον Βορρά. Αποτελείται από δύο μεγάλα ενδολεκανικά υβώματα, το ένα εκ των οποίων είναι του Καπαρελλίου και το άλλο της Καλλιθέας- Ασωπίας. Και τα δύο ελέγχονται από ρήγματα. Μεγάλα τμήματα από αυτές τις λεκάνες καλύπτονται από Μειοκαινικής, Πλειοκαινικής-Πλειστοκαινικής ηλικίας ιζηματογενή πετρώματα τα οποία σχηματίστηκαν σε λιμναίο περιβάλλον (Higgins, 1995).

Ειδικότερα, στην περιοχή της Βοιωτίας οι κυριότεροι ορεινοί όγκοι που διακρίνονται, αρχίζοντας από την περιοχή Καπαρελλίου, είναι η οροσειρά του Κιθαιρώνα που εκτείνεται

από τον όρμο της Λιβαδόστρας έως και την περιοχή της κοινότητας Βιλίων. Ο ορεογραφικός άξονας του Κιθαιρώνα έχει διεύθυνση Α-Δ, ενώ η υψηλότερη κορυφή της οροσειράς έχει υψόμετρο 1358m. Το νότιο τμήμα του Κιθαιρώνα παρουσιάζει έντονο ανάγλυφο με απότομες κλιτύες, ενώ το βόρειο τμήμα του είναι πιο ομαλό. Ανατολικότερα, ως φυσιογεωγραφική προέκταση του Κιθαιρώνα, συναντάται το όρος Πάστρα με διεύθυνση ΔΝΔ-ΑΒΑ, και μέγιστο υψόμετρο 1025m. Νοτιότερα βρίσκεται το όρος Πατέρας, με υψόμετρο 1132m, εκτείνεται από τον όρμο των Αιγοσθένων μέχρι τον κόλπο της Ελευσίνας με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Το όρος Πατέρας οριοθετεί την πεδιάδα των Μεγάρων. Δυτικά-Νοτιοδυτικά (ΔΝΔ) του Καπαρελλίου εκτείνεται το όρος Κορομπίλι, με υψόμετρο 842m, με προσανατολισμό ΝΔ-ΒΑ που σταδιακά στο βόρειο τμήμα ο ορεογραφικός άξονας αλλάζει κατεύθυνση προς τα ανατολικά. Το ανάγλυφό του όρους Κορομπίλι είναι πολύ έντονο με απότομες κλιτύες. Βορειοδυτικά του όρους Κορομπίλι βρίσκεται το όρος Ελικώνας με διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ. Οι υψηλότερες κορυφές του είναι το Διακόπι (1525m) και δυτικότερα η Παλαιοβούνα (1748m). Στην περιοχή των λιμνών Υλίκη και Παραλίμνη διακρίνονται δύο κυρίως, μέσου ύψους, οροσειρές, διευθύνσεως ΝΔ-ΒΑ, το Πτώον όρος στα βόρεια και το όρος Κτυπάς στα νότια. Η οροσειρά του Πτώου υψώνεται από το ανατολικό άκρο της Κωπαϊδας μέχρι τον Ευβοϊκό κόλπο. Στο ανατολικό τμήμα του όρους το οποίο παρουσιάζει απότομες κλιτύες, όπως και το βόρειο, αντιστοιχεί η υψηλότερη κορυφή με υψόμετρο 781m. Η οροσειρά Κτυπά είναι ομαλότερη μορφολογικά και εκτείνεται από την πεδιάδα των Θηβών μέχρι τον Ευβοϊκό κόλπο με μέγιστο υψόμετρο 1031m (Κουμαντάκης, 1968).

Τα κυριότερα ποτάμια που υπάρχουν στην Βοιωτία είναι ο Κηφισός (Βοιωτικός) ποταμός, Ασωπός (Βουριένης) ποταμός, ενώ στην περιοχή του Καπαρελλίου, ο Λιβαδόστρος (Στραβοπόταμος) ποταμός. Ο Λιβαδόστρος αποστραγγίζει μια ήπιας κλίσης λεκάνη απορροής, με μέσο υψόμετρο 300m, που αποτελείται κυρίως από ποταμοχερσαίες αποθέσεις Πλειστοκαινικής ηλικίας και αλλουβιακές αποθέσεις Ολοκαινικής ηλικίας. Το μέγιστο πάχος της ιζηματογενούς ακολουθίας είναι περίπου 230m. Νοτιοδυτικά από το χωριό Καπαρέλλι, η ήπια μορφολογία διακόπτεται καθώς το ποτάμι σχηματίζει καταρράκτη, εισέρχεται σε φαράγγι και μεταπίπτει υψομετρικά περί-που κατά 200m. Η μορφολογία αυτή οφείλεται στην παρουσία ενός μεγάλου κανονικού ρήγματος που βρίσκεται βόρεια από τον ποταμό Λιβαδόστρο (Zamani et al., 1981, Jackson et al., 1982). Η βάση αυτού του μεγάλου ρήγματος σχηματίζει ένα απότομο ρηξιγενές πρανές με ύψος περίπου 840m. Το ρήγμα αυτό έχει δύο διακριτές διευθύνσεις, ΒΑ-ΝΔ και Α-Δ. Οι δύο αυτές διευθύνσεις προσδίδουν στη γενική διεύθυνση του ρήγματος επί του χάρτη μια καμπύλη διεύθυνση.

1.2.2. ΕΝΟΤΗΤΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ-ΒΟΙΩΤΙΑΣ

Η Ενότητα Δυτικής Θεσσαλίας-Βοιωτίας αποτελεί μια προβληματική γεωτεκτονική ενότητα, η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ των ζωνών Υποπελαγονικής και Παρνασσού. Το κύριο χαρακτηριστικό της είναι η παρουσία μιας χαοτικής ενότητας, του λεγόμενου “Βοιωτικού Φλύσχη”. Για την Ενότητα Βοιωτίας έχει προταθεί ότι αποτελεί μια ξεχωριστή γεωτεκτονική ζώνη των Ελληνίδων ή ότι εντάσσεται στην ίδια σειρά με τις ονομαζόμενες σειρές Κόζιακα και Δυτικής Ελλάδος (Celet 1962, Clement 1979, Κατσικάτσος 1992, Προγκάκη 2007). Η

λιθοστρωματογραφία της Ενότητας Βοιωτίας (Ανώτερο Τριαδικό – Ηώκαινο) αποτελείται από δολομιτικούς ασβεστόλιθους, νηριτικούς ασβεστόλιθους, ερυθρούς κονδυλώδεις και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, ραδιολαρίτες και τον Βοιωτικό Φλύσχη (ραδιολαρίτες, εναλλαγές πηλιτών – μαργαϊκών ασβεστολίθων, ψαμμίτες, πηλίτες και ενστρώσεις ασβεστολίθων).

Η ενότητα Δυτικής Θεσσαλίας-Βοιωτίας γεωγραφικά καλύπτει την περιοχή που βρίσκεται στο όριο μεταξύ εξωτερικών και εσωτερικών Ελληνίδων. Πιο συγκεκριμένα, βρίσκεται ανάμεσα στην ενότητα της Υποπελαγονικής και στην ενότητα Παρνασσού-Γκίωνας (η οποία παλαιογεωγραφικά, αποτελούσε ένα υποθαλάσσιο ύβωμα, το οποίο οριοθετούταν από δύο αύλακες, εκείνη των Βαρδουσιών ανατολικά και τη Βοιωτική στα δυτικά και από το ρήγμα του Σπερχειού βόρεια. Η τεκτονική της ενότητας Βοιωτίας χαρακτηρίζεται από τα τεκτονικά λείπια τα οποία στην περιοχή της Βοιωτίας εφιππεύουν την ενότητα Παρνασσού-Γκίωνας, ενώ στις εμφανίσεις που βρίσκονται βόρεια από τον ποταμό Σπερχειό τα λείπια επωθούνται απ' ευθείας πάνω στην ενότητα Πίνδου. Θεωρείται πως αποτελούσε τμήμα της Πελαγονικής ενότητας. Άλλοι ερευνητές πιστεύουν πως ήταν μια ηπειρωτική μικροπλάκα εντός του ωκεανού της Πίνδου).

Τεκτονικά, η ενότητα Δυτικής Θεσσαλίας-Βοιωτίας, χαρακτηρίζεται από μία εσωτερική παραμόρφωση υπό την μορφή λεπίων. Οι ερευνητές αναφέρονται σε αυτήν ως μία περιοχή με ιδιαίτερο γεωλογικό ενδιαφέρον, καθώς σύμφωνα με μελέτες που έλαβαν χώρα με την πάροδο των χρόνων, εκτιμάται πως είναι μία ενότητα σχηματισμών, για αυτό και την αποκαλούν Ενότητα Βοιωτίας και όχι Ζώνη Βοιωτίας.

Κατά την διάρκεια του γεωλογικού χρόνου, από το Τριαδικό έως και την αρχή του Κρητιδικού, η ενότητα χαρακτηρίζεται από συνεχή ιζηματογένεση. Κατά το Άνω Ηώκαινο, υπήρξε το αποτέλεσμα ενός ορογενετικού γεγονότος και μάλιστα, αποτελούσε το εξωτερικό περιθώριο μιας αύλακας στα δυτικά των εσωτερικών ζωνών. Κατά το Άνω Ιουρασικό, μετατράπηκε σε αύλακα, εξαιτίας της έντονης ταφρογένεσης. Οι οφιόλιθοι και ο φλύσχος που εντοπίζονται μέσα στην αύλακα που σχηματίστηκε, μαρτυρούν πως αυτή βρίσκεται υπό την επίδραση των Παλαιοαλπικών ορογενετικών φαινομένων.

Πιο αναλυτικά, όσον αφορά την λιθολογία της ενότητας αυτής, παρατηρούνται από την βάση προς την κορυφή της οι εξής σχηματισμοί:

- Νηριτικοί ασβεστόλιθοι
- Δολομίτες και δολομιτικοί ασβεστόλιθοι ηλικίας Τριαδικού - Μ. Ιουρασικού
- Ραδιολαριτικοί κερατόλιθοι, ραδιολαρίτες και πηλίτες Μ.-Άνω Ιουρασικού
- Φλύσχος με εναλλαγές ερυθρών σχιστολίθων, μαργαϊκών και λατυποπαγών ασβεστόλιθων με θραύσματα ραδιολαριτών και οφιολίθων, ηλικίας Κάτω- Άνω Κρητιδικό.

Το σημαντικότερο τμήμα αυτής της ακολουθίας στρωμάτων, είναι αυτό του φλύσχη. Ο φλύσχος της Βοιωτίας, είναι ένας σχηματισμός που καθορίζει στην ουσία την ενότητα αυτή από άλλες που βρίσκονται κοντά στην περιοχή αυτή, γειτονικούς δηλαδή σχηματισμούς που μπορεί να έχουν την ίδια ηλικία. Αυτό την καθιστά ως μία ιδιαίτερη ενότητα.

Με βάση την στρωματογραφική διάρθρωση και τα στοιχεία που παρατέθηκαν πιο πάνω, συμπεραίνουμε πως η ενότητα Δυτικής Θεσσαλίας-Βοιωτίας παρουσιάζει ομοιότητες με τις ζώνες Παρνασσού- Γκιώνας και Υποπελαγονικής, αφού και οι τρεις εμφανίζουν αποθέσεις δολομιτών και δολομιτικών ασβεστολίθων Τριαδικής- Άνω Ιουρασικής ηλικίας.

1.2.3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1.2.3.1. Προαλπικό υπόβαθρο

Σε όσες θέσεις του χώρου της Υποπελαγονικής συναντώνται πετρώματα του υποβάθρου, πρόκειται ουσιαστικά για το κρυσταλλοσχιστώδες Άνω Παλαιοζωικό υπόβαθρο όμοιο με τα κρυσταλλικά πετρώματα της Πελαγονικής, που αποτελείται από γνεύσιους, μαρμαρυγιακούς σχιστολίθους, αμφιβολίτες και παρεμβολές μαρμάρων.

Άνω Παλαιοζωικά στρώματα διαπιστώθηκαν επίσης στον Κιθαιρώνα (περιοχή Κάζα), στη Λοκρίδα της Στερεάς Ελλάδας (όρη Κνιμήδα και Χλωμό), την Εύβοια, την Πάρνηθα, την Όθρυ, την Ύδρα και την Σαλαμίνα. Είναι κυρίως στρώματα ασβεστολίθων, ψαμμιτών, γραφιτικών σχιστολίθων και γραουβακών, η ηλικία των οποίων προσδιορίστηκε με βάση απολιθώματα στο Λιθανθρακοφόρο - Πέρμιο (Renz και Reichel 1910-1950, Μαρίνος και Reichel 1958).

1.2.3.2. Μεταλικά μολασσικά ιζήματα

Στο χώρο της Υποπελαγονικής, προς την πλευρά της ενότητας Πίνδου, αναπτύχθηκε στη διάρκεια της τελικής ορογενετικής δράσης του Άνω Ηωκαίνου, μια μεγάλη αύλακα που λειτούργησε κυρίως κατά το Ολιγόκαινο-Μέσο Μειόκαινο σαν χώρος απόθεσης μολασσικών ιζημάτων, μεγάλου πάχους. Η αύλακα αυτή ονομάστηκε «Μεσοελληνική αύλακα». Η Μεσοελληνική αύλακα έχει μήκος περίπου 130km και πλάτος που ξεπερνά τα 40km. Εκτείνεται με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ παράλληλα στο Ελληνικό ορογενετικό τόξο, στον κορμό του Ελληνικού ηπειρωτικού περιθωρίου (Μουντράκης, 1985). Τοποθετείται γεωγραφικά στις περιοχές Γρεβενών-Καλαμπάκας. Η Μεσοελληνική αύλακα αναπτύσσεται στο γεωλογικό χώρο ανάμεσα στην Υποπελαγονική ενότητα και την ενότητα Πίνδου και έχει ως υπόβαθρο οφιολιθικές μάζες αλλά και Μεσοζωϊκούς ασβεστόλιθους (Μουντράκης, 1985).

1.2.3.3. Γεωλογικό υπόβαθρο Βοιωτίας

Το γεωλογικό υπόβαθρο της Βοιωτίας (Εικόνα 15) αποτελείται κυρίως από πετρώματα της Πελαγονικής και Υποπελαγονικής γεωτεχνικής ενότητας. Επίσης, συναντώνται σχηματισμοί Φλύσχη του Παρνασσού Παλαιοκαινικής - Ηωκαινικής ηλικίας.

Η στρωματογραφική διαδοχή των πετρωμάτων κατά ζώνη, από τα νεώτερα προς τα παλιότερα έχει ως εξής:

- ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

Αλλούβιες αποθέσεις αποτελούμενες από πηλούς αργίλους, άμμους, και χάλικες/κροκάλες. Οι αλλουβιακές προσχώσεις είναι χειμαρρώδους προέλευσης και καλύπτουν την κοιλάδα της Φτερόλακκας σε διεύθυνση N-B. Αντιπροσωπεύονται από αργίλους και πηλούς με εναλλαγές λεπτών στρωμάτων άμμων και κροκάλων. Διλλούβιες αποθέσεις, καλύπτει την περιοχή νότια του οικισμού ανάμεσα στην ΠΕΟ Λιβαδειάς - Αράχοβας. Αποτελείται από κροκαλοπαγή που παρουσιάζουν εναλλαγές με ερυθρούς πηλούς και περιέχει κροκάλες σε διασπορά (Οικονόμου κ.ά., 1994).

- ΠΑΛΑΙΟΓΕΝΕΣ

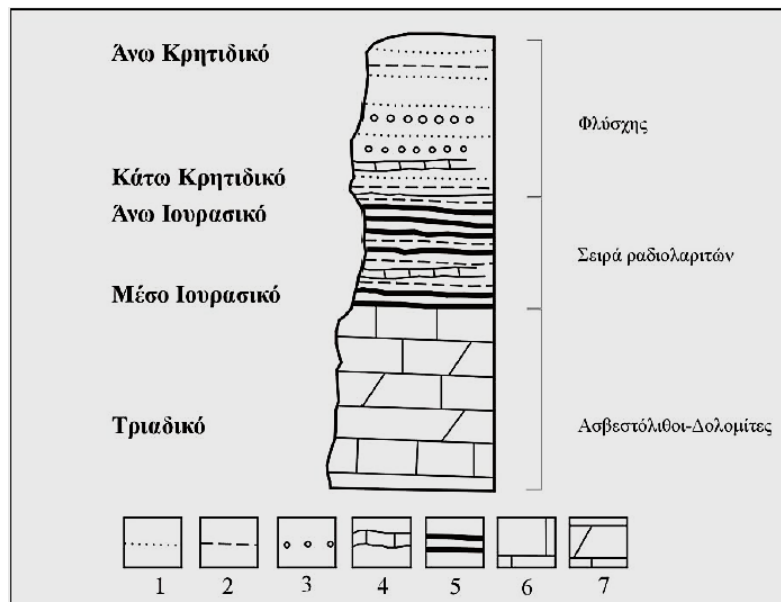
Φλύσχη. Σύστημα πετρωμάτων που περιλαμβάνει κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και ερυθροβυσινόχρωμους ασβεστικούς - αργιλικούς σχιστόλιθους. Μέσα στο φλύσχη συναντώνται φακοειδείς ενστρώσεις ασβεστόλιθων (Οικονόμου κ.ά., 1994).

- ΠΑΛΑΙΟΚΑΙΝΟ-ΗΩΚΑΙΝΟ

Φλύσχη αδιαίρετος, ο οποίος καλύπτει το βόρειο τμήμα της περιοχής της έρευνας και έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με το φλύσχη της ενότητας του Παρνασσού-Γκιώνας (Οικονόμου κ.ά., 1994).

- ΛΙΑΣΙΟ-ΔΟΓΓΕΡΙΟ

Σχιστοψαμμιτοκερατολιθική διάπλαση, η οποία συνίσταται από αργιλομαργαϊκές αποθέσεις, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή κ.ά. με κερατόλιθους, ασβεστολιθικούς φακούς ή ενστρώσεις και σερπεντινωμένους οφιόλιθους (Οικονόμου κ.ά., 1994).



Εικόνα 15. Σχηματική λιθοστρωματογραφική στήλη της ενότητας Βοιωτίας 1: ψαμμίτες, 2: πηλίες, μάργες, αργιλοί σχιστόλιθοι, 3: κροκαλοπαγή - λατυποπαγή, 4: ασβεστολιθικές ενστρώσεις, 5: κερατόλιθοι, 6: ασβεστόλιθοι νηριτικοί, 7: δολομίτες. Από Μουντράκη (1985).

1.2.4. ΠΑΛΑΙΟΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΤΗΣ ΒΟΙΩΤΙΑΣ

Αν μελετήσουμε καλύτερα την παλαιογεωγραφική εξέλιξη της Βοιωτίας, θα την κατατάσσαμε στις Εσωτερικές Ελληνίδες, και μάλιστα φαίνεται να είναι μία διαφοροποιημένη ενότητα της Υποπελαγονικής ενότητας.

Τα παλαιογεωγραφικά συμπεράσματα που διατυπώθηκαν από τους μελετητές της ενότητας Βοιωτίας (Celet et al., 1976) και που στηρίζονται στην παραπάνω λιθοστρωματογραφία είναι τα ακόλουθα:

- Η ανθρακική-νηριτική ιζηματογένεση από Τριαδικό έως το Μέσο Ιουρασικό είναι συγκρίσιμη με αυτήν των ζωνών Παρνασσού-Γκιώνας και Υποπελαγονικής.
- Στο Μέσο ή Ανώτερο Ιουρασικό, ο χώρος της Βοιωτίας διαμορφώθηκε σε αύλακα με πελαγική ιζηματογένεση.
- Η συμμετοχή στα κροκαλοπαγή του φλύσχη οφιολιθικών πετρωμάτων δείχνει την πιθανή τοποθέτηση της Βοιωτίας στις Εσωτερικές Ελληνίδες.

1.2.5. ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΗ ΒΟΙΩΤΙΑ

Η περιοχή συνδέεται βιβλιογραφικά με μεγάλα νεοτεκτονικά βυθίσματα, όπως είναι αυτό του Κορινθιακού, της Φωκίδος-Βοιωτίας (γνωστή και ως λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού – Κωπαΐδα) και του Β. Ευβοϊκού. Είναι συστήματα, των οποίων οι ρυθμοί διάνοιξης με εφελκυστικές δυνάμεις είναι από τους μεγαλύτερους σε παγκόσμια κλίμακα. Οι τιμές που λαμβάνει ο ρυθμός φτάνουν τα 10mm/y. Η διάνοιξη, είναι κατά κύριο λόγο αποτέλεσμα σεισμικών και ασεισμικών κινήσεων και έχει διεύθυνση Β προς Ν.

Τα παραπάνω στοιχεία, αποδεικνύουν την παρουσία ρηξιγενών ζωνών με διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ. Αυτές είναι που οδήγησαν στην δημιουργία διαδοχικών τεκτονικών βυθισμάτων που χρονολογούνται στο Πλειο- Τεταρτογενές και αντιστοιχούν σε σημερινές περιοχές, αυτές του Κορινθιακού κόλπου, της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού – Κωπαΐδας, της λεκάνης της Λοκρίδας (Ρεγκινίου), του Βορείου Ευβοϊκού κόλπου και του υποθαλάσσιου βυθίσματος ΒΑ της Β. Ευβοίας. Η περιοχή του Βοιωτικού Κηφισού- Κωπαΐδας παρουσιάζει χαμηλές τιμές όσον αφορά το ρυθμό διάνοιξής της, οι οποίες οδηγούν στο συμπέρασμα ότι στο κοντινό παρελθόν επικρατούσε μια περίοδος παρατεταμένης ηρεμίας.

Η Βοιωτία και ειδικότερα η ευρύτερη περιοχή της Θήβας είναι μια σειсмоγενής περιοχή. Ξεκινώντας από την αρχαιότητα μέχρι και τη σημερινή εποχή ο νομός έχει υποστεί έντονες σεισμικές δονήσεις με καταστροφικές ζημιές.

Ο Θουκυδίδης πρώτος αναφέρει πολλούς σεισμούς το 427π.Χ. στην περιοχή του Ορχομενού με μέγεθος $M=(6.0)$. Οι επόμενες σεισμικές καταγραφές σημειώθηκαν αιώνας αργότερα, το 551 και το 1321, στη Χαϊρώνεια με μέγεθος $M=(6.8)$ και στη Θήβα με $M=(6.3)$ αντίστοιχα. Ο αριθμός όμως των καταγραφών αυξάνεται δραματικά τον 19ο και 20ο αιώνα με ισχυρούς σεισμούς από το 1853 έως και το 1981. Τον εικοστό αιώνα ο σεισμός στη Θήβα του 1914 αποτελεί έναν από τους καταστροφικότερους σεισμούς στην Ελλάδα. Ο σεισμός,

ο οποίος ήταν επιφανειακός και μέγεθος $M=6.0$, προκάλεσε το θάνατο ανθρώπων και μεγάλες υλικές ζημιές. Η πιο πρόσφατη σεισμική καταγραφή έγινε το Σεπτέμβρη του 2010 στο χωριό Λεύκτρα με μέγεθος $M=4.0$. Σύμφωνα με το Σεισμολογικό Ινστιτούτο του Πότσταμ, το επίκεντρο του σεισμού ήταν 60 χιλιόμετρα βορειοδυτικά της Αθήνας και το εστιακό βάθος υπολογίστηκε στα 10km, ενώ δεν είχαν αναφερθεί ζημιές. Ο σεισμός αυτός είναι ο μεγαλύτερος που έχει καταγραφεί τη δεκαετία του 2010.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3) παρουσιάζονται όλες οι σεισμικές καταγραφές στο νομό της Βοιωτίας.

Πίνακας 3. Σεισμικές καταγραφές στη Βοιωτία ($M_s > 4$)

<i>Χρονολογία (π.Χ.)</i>	<i>Περιοχή</i>	<i>Μέγεθος</i>
427	Ορχομενός	$M= 6,0$
551	Χαιρώνεια	$M= 6,8$
1321	Θήβα	$M= 6,3$
1853	Θήβα	$M= 6,5$
1870	Αράχωβα	$M= 6,8$
1893	Θήβα	$M= 6,2$
1894	Σύνορα Φθιώτιδας-Βοιωτίας(Μαλεσίνα)	$M= 6,6$
1914	Θήβα	$M= 6,0$
1970	Βοιωτία	$M= 6,2$
2010	Λεύκτρα	$M= 4,0$

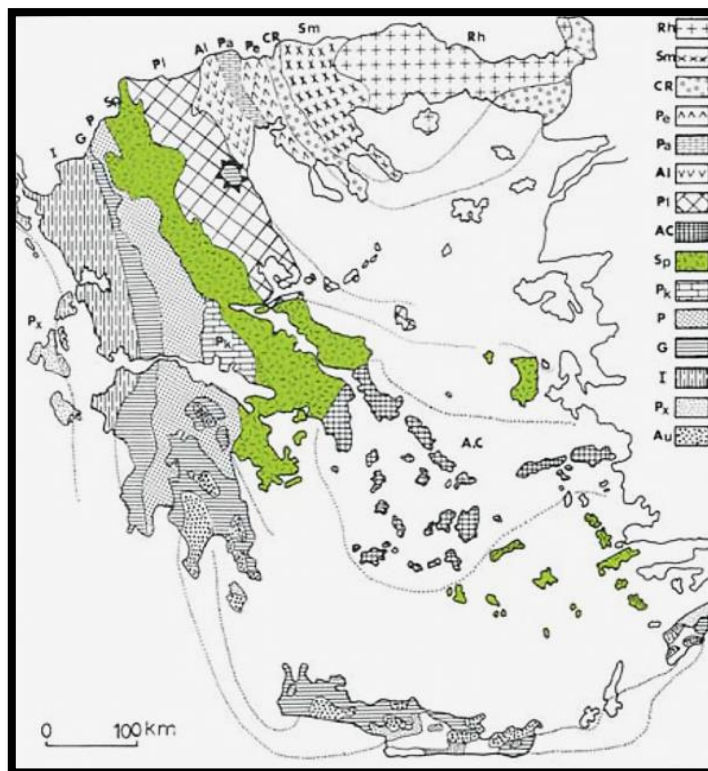
Βασιζόμενοι στα προαναφερθέντα στοιχεία, η περιοχή μελέτης μπορεί να αποκαλείται “περιοχή μέσης σεισμικότητας”.

Σύμφωνα με τον ισχύοντα Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ, 2000), από την άποψη της γεωγραφικής κατανομής της σεισμικής επικινδυνότητας στην Ελλάδα, η περιφερειακή ενότητα Βοιωτίας βρίσκεται στη Ζώνη 2 σεισμικής επικινδυνότητας, εφόσον κατά το παρελθόν δεν έχουν σημειωθεί σεισμοί μεγάλου μεγέθους (Οικονόμου κ.ά., 1994).

1.2.6. ΥΠΟΠΕΛΑΓΟΝΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ

Η Υποπελαγονική ενότητα ανήκει στις Εσωτερικές Ελληνίδες, και έχει διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, ίδια με τη γενική διεύθυνση που έχουν και οι Ελληνίδες Οροσειρές. Καλύπτει το τμήμα του ελλαδικού χώρου που ξεκινά από την Αλβανία, συνεχίζει στη δυτική Θεσσαλία, στην ανατολική Στερεά Ελλάδα, στη Σαλαμίνα, στην Ύδρα, στην ανατολική Πελοπόννησο, στο νησί της Κω και καταλήγει στη Μικρά Ασία (Εικόνα 16). “ Βαφτίστηκε” ως Υποπελαγονική ζώνη το 1959 από τον Αιβουίη, ο οποίος ήθελε να τονίσει τη διαφορά στη λιθολογία με την Πελαγονική ενότητα.

Η ενότητα της Υποπελαγονικής βρίσκεται δυτικά της Πελαγονικής ενότητας και θεωρείται πως είναι κομμάτι αυτής. Γενικότερα, έχει γίνει αποδεχτό από τη γεωλογική κοινότητα, ότι η Υποπελαγονική ενότητα αποτελεί τη δυτική κατωφέρεια του υβώματος της Πελαγονικής προς την αύλακα της Πίνδου, θεωρία που υποστηρίζεται από την ύπαρξη των επωθημένων σε αυτήν οφιολίθων. Συντελείται από ασβεστόλιθους νηρητικής ιζηματογένεσης που βαθμιαία γίνονται πελαγικοί, γεγονός που υποδηλώνει τη μετάβαση από την επικρατούσα νηρητική φάση στην Πελαγονική προς την πελαγική φάση στην ενότητα της Πίνδου.



Εικόνα 16. Η εξάπλωση της Υποπελαγονικής ενότητας στον ελλαδικό χώρο.

Η Υποπελαγονική ενότητα, έγινε γνωστή και με άλλες ονομασίες, όπως ενότητα Οθρύος και ενότητα Μαλιακού. Έχει χαρακτηριστεί, επίσης, ενότητα Ανατολικής Ελλάδας.

1.2.6.1. Λιθολογικά χαρακτηριστικά

Γενικά, στην Υποπελαγονική ενότητα αναγνωρίζονται τρεις τύποι στρωμάτων:

- I. Προαλπικοί: ιζηματογενή και μεταμορφωμένα πετρώματα με απολιθώματα, ηλικίας Παλαιοζωικού
- II. Αλπικοί: ιζήματα Τριαδικού, ασβεστόλιθοι Ιουρασικής ηλικίας, ιζήματα της Άνω Κρητιδικής επίκλυσης, οφιόλιθοι και κερατόλιθοι.

Θα μπορούσαμε να αποδώσουμε τη δομή των αλπικών σχηματισμών με τη μορφή μιας στρωματογραφικής στήλης, ξεκινώντας από τους παλαιότερους προς τους νεώτερους, ως εξής:

- Ψαμμίτες, κερατοφύρες ή ηφαισιτίτες, πηλίτες και ολισθόλιθοι από ασβεστόλιθους Περμίου, σχηματίζουν ένα ηφαιστειοϊζηματογενές σύμπλεγμα Κατώτερου-Μέσου Τριαδικού.

- Ανοιχτόχρωμοι, παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθοι και άλλοι ανθρακικοί σχηματισμοί νηρητικής ιζηματογένεσης που χρονολογούνται στο Κάρνιο έως το Μέσο Ιουρασικό.

- Σερπεντινωμένα οφιολιθικά πετρώματα.

- Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι της Άνω Κρητιδικής επίκλυσης. Ύπαρξη μεταλλευμάτων Fe και Ni.

- Φλύσχης Παλαιοκαινικής ηλικίας.

III. Μεταλικοί: ιζήματα μολλάσσας, αποθεμαμένα στην περιοχή της Μεσοελληνικής αύλακας κατά το Ολιγόκαινο- Μέσο Μειόκαινο. Η ύπαρξη πολλών ρηγμάτων προκαλεί μια φάση νεοτεκτονικής παραμόρφωσης που επηρεάζει τους σχηματισμούς κατά τη διάρκεια απόθεσής τους, αλλά και μετά από αυτή. Τα μεταλικά στρώματα είναι σχηματισμοί, οι οποίοι αποτελούνται από:

- Ιζήματα που αποτέθηκαν σε λιμναία περιβάλλοντα και είναι Άνω Μειοκαινικής – Πλειοκαινικής ηλικίας. Περιέχουν εναλλαγές αργιλικών μαργών - ψαμμιτών και κροκαλοπαγών. Βρίσκονται σε λεκάνες με διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ και σε υψόμετρο που φτάνει τα 600 μέτρα, όπως συμβαίνει στον Άγιο Δημήτριο Σκούρτων.

- Ιζήματα χερσαίου περιβάλλοντος, τεταρτογενή κυρίως ιζήματα, που αποτελούνται από ποτάμιες αποθέσεις και κώνους κορημάτων, που τροφοδοτούνται από αμεταμόρφωτα πετρώματα της Πάρνηθας.

1.2.6.2. Στρωματογραφία

Η στρωματογραφική στήλη της Υποπελαγονικής ενότητας, από την βάση της προς την κορυφή, ξεδιπλώνεται παρακάτω:

- Την βάση της Υποπελαγονικής ενότητας αποτελούν σχηματισμοί Άνω Παλαιοζωικής ηλικίας, οι οποίοι υπόκεινται επικλυσιογενών Τριαδικών ασβεστόλιθων. Σχηματισμοί του Άνω Παλαιοζωικού βρίσκονται και στη Στερεά Ελλάδα, την Εύβοια και τα νησιά της Χίου και της Σαλαμίνας. Τα πετρώματα που χαρακτηρίζουν το υπόβαθρο της ενότητας της Υποπελαγονικής είναι κυρίως αργιλικό σχιστόλιθοι, γραουβάκες, ψαμμίτες και κροκαλοπαγή, ενώ υπάρχουν και παρεμβολές εκρηξιγενών πετρωμάτων. Πιθανή είναι η ύπαρξη φακών μαργαϊκών ασβεστόλιθων ή κονδυλωδών ασβεστόλιθων με χρώμα λευκό, κιτρινόλευκο ή μαύρο, ανάλογα τη σύσταση που αποκτά κατά την ιζηματογένεση κάθε φορά.

- Ιζήματα ηλικίας Τριαδικού που διαχωρίζονται σε δύο τελείως διαφορετικές φάσεις:

I. Η πρώτη εκ των δύο φάσεων συνίσταται από ιζημάτα που αποτέθηκαν σε βαθιά περιβάλλοντα (βαθιά φάση) . Τέτοια ιζημάτα είναι οι ασβεστόλιθοι ερυθρού χρώματος που περιέχουν κεφαλόποδα. Η φάση αυτή ονομάζεται “φάση Hallstatt”.

II. Η δεύτερη, είναι πιο ρηχή φάση. Αποτελείται από ασβεστόλιθους και κατά τόπους δολομιτωμένους ασβεστόλιθους.

Το στρώμα αυτό περιέχει, επίσης, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και τοφφίτικα υλικά που χρονολογούνται κατά το Βερφένιο. Το πάχος του στρώματος αυτού φτάνει έως και τα 60m.

Το Μέσο με Άνω Τριαδικό χαρακτηρίζεται από την παρουσία ασβεστοδολιμιτικών πετρωμάτων. Κατά το Άνω Τριαδικό, τα πετρώματα είναι άστρωτα και έντονα διερρηγμένα. Οι ασβεστόλιθοι εμφανίζονται παχυστρωματώδεις. Κατά τη διάρκεια του Ανώτερου Τριαδικού οι ασβεστόλιθοι γίνονται πιο λεπτοστρωματώδεις.

- Ιουρασικό: εμφάνιση της χαρακτηριστικής για την Υποπελαγονική ενότητα σχιστοκερατολιθικής διάπλασης με αργιλικούς σχιστόλιθους, μάργες, πηλίτες και ψαμμίτες με ασβεστολιθικές παρενστρώσεις και ραδιολαρίτες. Τα παραπάνω υλικά φαίνεται να αποτέθηκαν κατά τη διάρκεια πελαγικής ή και ωκεάνιας ιζηματογένεσης, καθώς βρέθηκαν διεισδύσεις βασικής σύστασης, οφιολίθοι και τόφφοι. Στην κορυφή της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης παρουσιάζονται αποθέσεις φλύσχη και τουρβιδίτες. Αυτό, ίσως σημαίνει ότι ήταν αποτέλεσμα της Κάτω Κρητιδικής Παλαιο- Ελληνικής ορογένεσης. Οι Αθηναϊκοί σχιστόλιθοι, οι οποίοι υπόκεινται των Άνω Κρητιδικών ασβεστολίθων της Ακρόπολης, του Λυκαβηττού, και του Φιλοπάππου, ανήκουν και αυτοί στη σχιστοκερατολιθική διάπλαση.

Η διάβρωση των οφιολίθων οδήγησε στη δημιουργία λατεριτικών κοιτασμάτων και κοιτασμάτων Fe- Ni, τα οποία υπόκεινται Άνω Κρητιδικών ιζημάτων. Τέτοια κοιτάσματα βρέθηκαν σε Λοκρίδα, Εύβοια και Λάρυμνα.

Σημαντικές είναι οι εμφανίσεις οφιολιθικών πετρωμάτων στις περιοχές του Βούρινου και Όθρυ, στα οποία βρίσκεται μεγάλη ποικιλία ηφαιστειακών και πλουτώνιων πετρωμάτων, όπως είναι ο βασάλτης, ο διαβάσης, ο γάββρος, ο νορίτης, ο σερπεντινίτης, ο δουνίτης, ο χαρτσβουργίτης, ο λερζόλιθος κ. ά.

Χαρακτηριστική ενότητα που υπέρκειται των πετρωμάτων της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης, είναι λεγόμενη “σειρά Κρυσταλλοπηγής”. Η σειρά αυτή αποτελείται από μία ενότητα οφιολιθικών πετρωμάτων που επωθούνται πάνω σε ασβεστόλιθους, οι οποίοι τοποθετούνται χρονολογικά στο Κατώτερο Ιουρασικό (Λιάσιο). Η σειρά προσδιορίζεται από πελαγική κυρίως ιζηματογένεση, όμως οι ασβεστόλιθοι που την αποτελούν μπορεί να προκύπτουν και από νηρητική ιζηματογένεση.

- Ασβεστόλιθοι Άνω Κρητιδικού, νηρητικής ιζηματογένεσης, και κροκαλοπαγή βάσης αποτέθηκαν κατά την Κενομάνια επίκλυση, έπειτα από τη χέρσωση της Υποπελαγονικής που δηλώνεται με τη μορφή ενός στρωματογραφικού κενού στην ακολουθία.

- Κατά το Πέρμιο, αποτίθενται πετρώματα που προέρχονται από μία ασβεστολιθική φάση.
- Κατά τη διάρκεια του Λιθανθρακοφόρου, έχουμε απόθεση σχιστόλιθων και ψαμμιτών, οι οποίοι παρουσιάζουν εγκλείσματα ασβεστολιθικών φακών.
- Φλύσσης ξεκινά να αποτίθεται κατά το Άνω Μαιστρίχτιο σταματώντας στο Άνω Ηώκαινο κατά τη Μεσο-Αλπική φάση.

Στρωματογραφικά, τα παλιότερα στρώματα της ακολουθίας της Υποπελαγονικής ενότητας, καθώς και ολόκληρης της Ελλάδας, βρίσκονται στην Κω. Τα αρχαιότερα αυτά πετρώματα είναι αργιλικοί σχιστόλιθοι και μαύροι σχιστοποιημένοι ασβεστόλιθοι, που τοποθετήθηκαν χρονολογικά από τους ερευνητές, οι οποίοι στηρίχθηκαν στα περιεχόμενα σε αυτούς απολιθώματα (*Fenestella cornicola*, *Orthis noctilio*), στο Σιλούριο.

1.2.6.3. Τεκτονική

Η Υποπελαγονική έχει επηρεαστεί από δύο Αλπικές ορογενετικές φάσεις. Αυτές είναι υπεύθυνες για τη διαμόρφωση της ενότητας τεκτονικά. Σχηματίστηκαν επωθήσεις και πτυχές με διεύθυνση αξόνων ΒΒΔ. Η ροπή των σχηματισμών φαίνεται να είναι προς τα ανατολικά, κάτι που κατανοούμε από μελέτες στα στοιχεία των πετρωμάτων της Υποπελαγονικής ενότητας.

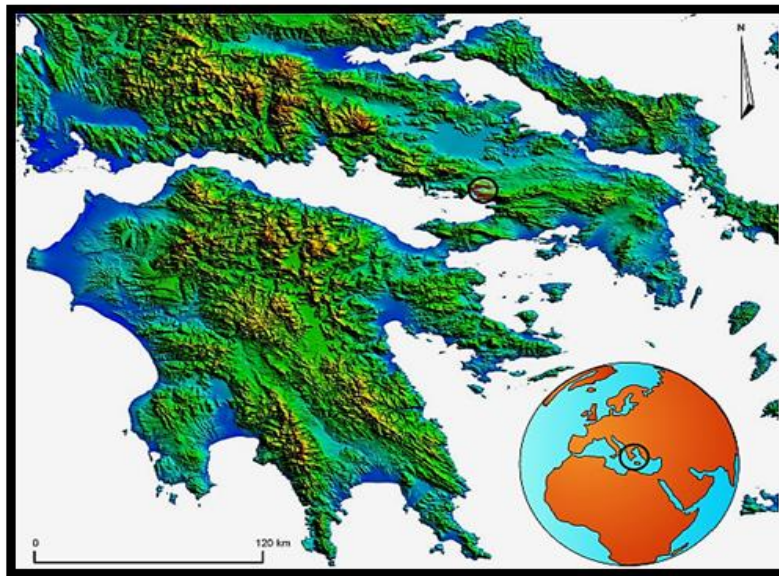
1.2.6.4. Παλαιογεωγραφία

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, η Υποπελαγονική ενότητα προσδιορίστηκε και διαχωρίστηκε τελικά από την Πελαγονική, όχι μόνο γεωλογικά, από τις διαφορές στη λιθολογία, τη στρωματογραφία και την τεκτονική τους αλλά και ονομαστικά, καθώς το πρόθεμα “Υπο-” που της δόθηκε, καθόρισε την παλαιογεωγραφική της θέση. Για αυτό έπειτα, καθιερώθηκε ότι αποτελούσε τη δυτική κατωφέρεια του υβώματος της ενότητας της Πελαγονικής, το οποίο ήταν μια μικρή ήπειρος στο ανατολικό περιθώριο του ωκεανού της Πίνδου. Όπως προκύπτει και από τη στρωματογραφική της ανάλυση, ήταν μία ενότητα που χαρακτηριζόταν από νηρητική και ταυτόχρονα πελαγική ιζηματογένεση.

Η Υποπελαγονική ενότητα, ξεκίνησε σταδιακά να μετατρέπεται σε μία βαθιά αύλακα. Η μετατροπή αυτή έλαβε χώρα κατά το Κάτω Ιουρασικό. Στην συνέχεια του γεωλογικού χρόνου, κατά τη διάρκεια του Άνω Ιουρασικού, το δυτικό περιθώριο της Πελαγονικής καλύφθηκε από ωκεάνια τεμάχη. Η παραμόρφωση μετανάστευε προς τα ανατολικά, η ενότητα αρχίζει να βυθίζεται εφόσον πεθαίνει ο ωκεανός της Πίνδου. Η μικρή ήπειρος της Πελαγονικής συγκρούεται με την Απούλια πλάκα και δημιουργείται υλικό που τροφοδοτεί και ευνοεί τη γένεση των Εξωτερικών Ελληνίδων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

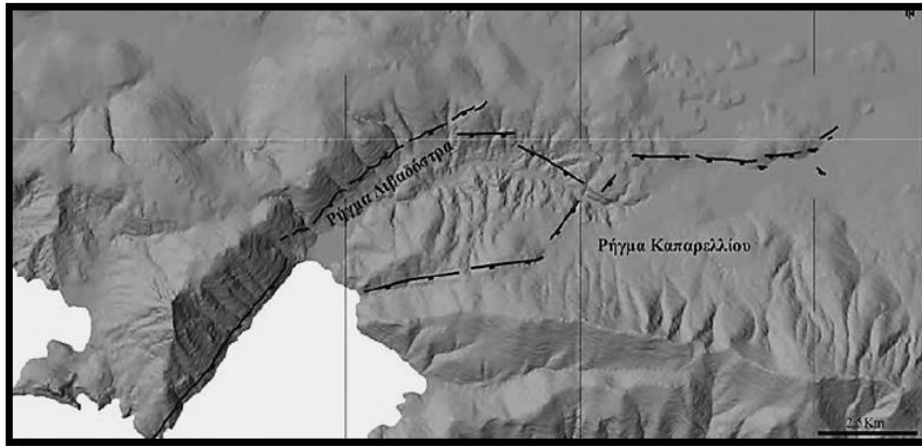
Η τεκτονική δραστηριότητα στην Κεντρική Ελλάδα (Εικόνα 17) εκφράζεται δραματικά στην τοπογραφία, στη γεωμορφολογία και στη μετατόπιση της ακτογραμμής σχετικά με το επίπεδο της θάλασσας. Η δομή της περιοχής κυριαρχείται από μεγάλες τάφρους, οι οποίες είναι ενεργές τουλάχιστον από το Κατώτερο Πλειόκαινο και είναι οριοθετημένες από ρήγματα που επηρεάζουν Τεταρτογενείς ή πιο πρόσφατους σχηματισμούς. Επίσης, επηρεάζουν σημαντικά το σημερινό σύστημα αποστράγγισης και την ιζηματογένεση της περιοχής (Mercier et al., 1976, 1979, 1987, 1989; Roberts & Jackson, 1990).



Εικόνα 17. Γεωγραφική απεικόνιση της κεντρικής Ελλάδας και η περιοχή του Καπαρελλίου. (Wiatr et al., 2009)

2.1. Η ΡΗΞΙΓΕΝΗΣ ΖΩΝΗ ΛΙΒΑΔΟΣΤΡΑΣ - ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ

Η ρηξιγενής ζώνη Λιβαδόστρας – Καπαρελλίου (Εικόνα 18) γειτνιάζει στα βόρεια περιθώριά της με την ρηξιγενή ζώνη Νεοχωρίου – Λεονταρίου. Αποτελείται από δύο κύρια ρήγματα, διεύθυνσης Α – Δ (γενική κατεύθυνση από Δυτικά προς Ανατολικά), το ρήγμα Λιβαδόστρας και το ρήγμα Καπαρελλίου. Χαρακτηρίζεται ως μία ρηξιγενής ζώνη σύνθετης γεωμετρίας, διότι τα δύο κύρια αυτά ρήγματα που την αποτελούν σχηματίζουν μεταξύ τους μία ζώνη επικάλυψης, με μήκος περίπου 5,5km και πλάτος περίπου 3km.



Εικόνα 18. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους στο οποίο φαίνεται η συνολική τοπογραφία και η γεωμετρία της ρηξιγενούς ζώνης Λιβαδόστρας - Καπαρελλίου. (Tsodoulios, 2009)

2.2. ΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ

Κατά το Τεταρτογενές:

- ΟΛΟΚΑΙΝΟ
 - Αλλουβιακές αποθέσεις και ελουβιακός μανδύας: Ασύνδετα υλικά από άμμους και κροκαλολατύπες, προσχώσεις χαλαρών αργιλοαμμωδών υλικών, ερυθρογή σε εσωτερικές μικρές λεκάνες, υλικά χειμαρρωδών αναβαθμίδων μικρού πάχους και υλικά ελουβιακού μανδύα.
 - Λιμνοθαλάσσιοι ιλύες και άμμοι ακτών.
 - Σύγχρονα πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων: Ασύνδετα υλικά, αναπτύσσονται στις πλαγιές.
- ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ
 - Κώνοι κορημάτων που αποτελούνται: α) Από λατύπες διατεταγμένες σε λεπτές στρώσεις, ελαφρά συγκολλημένες στα ανώτερα μέλη τους και ισχυρά στα κατώτερα. Το συνδεδειγμένο υλικό είναι ασβεστιτικό και μερικές φορές αργιλικό στα κατώτερα μέλη, ηλικίας πιθανότατα Βούρμιο. Μέγιστο πάχος 10 μέτρα και β) Από λατύπες κυρίως ασβεστολιθικές μέσα στις οποίες απαντούν πολλές φορές μεγάλα ασβεστολιθικά τεμάχια. Το συνδεδειγμένο υλικό είναι αργιλομαργαϊκό. Χαρακτηριστικό τους είναι οι διαστρώσεις από κόκκινες αργίλους. Μέγιστο πάχος 20 μέτρα.
 - Ποταμοχερσαίες αποθέσεις: Αποτελούνται από εναλλαγές κροκαλοπαγών, ψαμμιτών, καστανέρυθρων αργίλων, αμμούχων αργίλων και πηλών.
 - Συνεκτικά λατυποπαγή: Αποτελούν τη βάση των ποταμοχερσαίων αποθέσεων και είναι κυρίως ασβεστολιθικά, διατεταγμένα σε παχιές τράπεζες, με παρεμβολές λεπτών ασβεστομαργαϊκών ενστρώσεων. Στην περιοχή Καπαρελλίου κατά θέσεις οι σχηματισμοί αυτοί αρχίζουν με

κροκαλοπαγή και αποστρωγγυλωμένα τεμάχια ασβεστόλιθων, που μεταβαίνουν σε συνεκτικά λατυποπαγή. Πάχος περίπου 80 μέτρα.

Κατά το Νεογενές:

- **ΑΝΩΤΕΡΟ ΠΛΕΙΟΚΑΙΝΟ**
 - Αργιλομαργαϊκές αποθέσεις (λιμναίας - υφάλμυρης φάσης): Οι σχηματισμοί αυτοί μεταβαίνουν πλευρικά σε αργίλους και μάργες που εναλλάσσονται με αμμούχες αργίλους, ενστρώσεις μαργαϊκών ασβεστόλιθων μικρού πάχους και χαλαρών κροκαλοψαμμιτών καστανού χρώματος. Μέσα στις μάργες υπάρχουν, κατά θέσεις, εμφανίσεις λιγνίτη μικρού πάχους. Πάχος περίπου 300 μέτρα

Η Βοιωτική Ενότητα

- **ΑΝ. ΔΟΓΓΕΡΙΟ - Μ. ΜΑΛΜΙΟ**
 - Σχιστοψαμμιτοκερατολιθική διάπλαση: αργιλοί σχιστόλιθοι εναλλασσόμενοι με ερυθρούς ραδιολαρίτες, μέσα στους οποίους υπάρχουν λεπτές διαχωριστικές επιφάνειες μαγγανίου και λεπτοπλακώδεις ερυθρωποί ή τεφροί ασβεστόλιθοι με πυριτόλιθους. Στους σχηματισμούς αυτούς παρεμβάλλονται ή επίκεινται (τεκτονικώς) υπερβασικά πετρώματα, κατά θέσεις έντονα σερπεντινωμένα. Μέσα σ' αυτά παρατηρούνται συχνά εγκλείσματα από τεμάχια ασβεστόλιθων Ιουραϊκής ή Τριαδικής ηλικίας. Το πάχος τους είναι 50-80 μέτρα.
- **ΛΙΑΣΙΟ - ΔΟΓΓΕΡΙΟ**
 - Ασβεστόλιθοι: τεφροί, λευκότεφροι, παχυπλακώδεις έως παχυστρωματώδεις, ωολιθικοί, ψευδοωολιθικοί, βιομικρίτες, σπαρίτες τοπικά δολομιτωμένοι. Το ανώτερο πάχος τους είναι 150-200m.
- **ΜΕΣΟ – ΑΝΩΤΕΡΟ ΤΡΙΑΔΙΚΟ – ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ**
 - Ασβεστολιθικοί δολομίτες: Τεφροί, λευκότεφροι, λευκοκίτρινοι, ερυθρόλευκοι παχυστρωματώδεις έως άστρωτοι βιομικρίτες, δολοσπαρίτες. Το ανώτερο πάχος τους είναι περίπου 600m.
- **ΚΑΤΩΤΕΡΟ – ΜΕΣΟ ΤΡΙΑΔΙΚΟ**
 - Σύμπλεγμα από κερατόλιθους, ψαμμίτες και σχιστόλιθους. Τοπικά παρατηρούνται ηφαιστειακοί τόφφοι. Το πάχος τους είναι περίπου 50m.

2.3. ΤΟ ΡΗΓΜΑ ΤΟΥ ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ

Το ρήγμα του Καπαρελλίου βρίσκεται στο ανατολικότερο τμήμα του Κορινθιακού κόλπου. Η περιοχή αυτή αποτελεί μία από τις πιο τεκτονικά ενεργές περιοχές της Ελλάδας (Ganas et al., 2007).

Η τοπογραφία της επιφάνειας της περιοχής μελέτης και η γεωμορφολογία συνδέονται ξεκάθαρα με σεισμική δραστηριότητα κατά μήκος κανονικών ρηγμάτων (Armijo et al., 1996). Η επέκταση έχει κύρια διεύθυνση Β-Ν (Clarke et al., 1998), με τις μεγαλύτερες τιμές να παρατηρούνται στα δυτικά.

Η περιοχή του Καπαρελλίου, η οποία έχει μελετηθεί εδώ και μερικά χρόνια ως ένα εντελώς τεκτονικο-μορφολογικό χαρακτηριστικό, χαρακτηρίζεται από την αλληλεπίδραση μεταξύ τεκτονικών και διαβρωτικών διεργασιών. Οι κατακερματισμένες, τμηματοποιημένες και απότομες επιφάνειες κλίσης που σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια του σεισμικού γεγονότος του 1981, καθώς και σε προηγούμενα τεκτονικά επεισόδια που εντοπίστηκαν στις παλαιοσεισμολογικές τάφρους (Koukouvelas et al., 2005, Kokkalas et al., In press) έχουν υποβαθμιστεί σημαντικά, ξεκινώντας από μια ταχεία φάση βαρυτικής κατάρρευσης της ελεύθερης όψης, σχηματίζοντας καλά καθορισμένες κολουβιακές σφήνες στη βάση της κατοπτρικής επιφάνειας, ακολουθούμενη από μια πιο αργή φάση διάχυτης διάβρωσης που αντιπροσωπεύεται από τις φάσεις πλύσης των στοιχείων (Hanks et al., 1984).

Οι υψηλότερες γωνίες κλίσης παρατηρήθηκαν σε μέρη όπου το κάλυμμα ιζήματος είναι λεπτότερο πάνω από τον ασβεστολιθικό κρημό. Η μέση κατακόρυφη μετατόπιση κατά μήκος του ρήγματος εκτιμάται στα 0,7m, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την εκσκαφή των παλαιοσεισμολογικών τομών.

Το ρήγμα του Καπαρελλίου αποτελεί το όριο μεταξύ του Τριαδικού ασβεστόλιθου και των αλλουβιακών αποθέσεων. Το ρηξιγενές πρηνές του εμφανίζει χρωματικό διαχωρισμό σε τρεις διακριτές ζώνες αποδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο ότι έχει δραστηριοποιηθεί κατά το παρελθόν τουλάχιστον τρεις φορές. Βασιζόμενοι σε μετρήσεις ³⁶Cl, οι Benedetti et al., 2003, διαπίστωσαν τουλάχιστον τέσσερα σεισμικά επεισόδια συμπεριλαμβανομένου και της διάρρηξης του 1981 τα τελευταία 20000 χρόνια. Οι Jackson et al., 1982, αλλά και οι Morewood and Roberts, 2001, αναφέρουν ότι η συν-σεισμική εδαφική μετατόπιση κατά το σεισμικό γεγονός του 1981 έφτασε τα 70cm. Οι παλαιοσεισμολογικές έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή επιβεβαίωσαν τις παραπάνω διαπιστώσεις και αποκάλυψαν ότι το ρήγμα του Καπαρελλίου εμφανίζει ρυθμούς ολίσθησης της τάξης των 0.2 – 0.3mm/yr και χρόνο επανάληψης τα 2300 χρόνια (Chatzipetros et al., 2005).

Το ρήγμα μπορεί να προκαλέσει την εκδήλωση καταπτώσεων τεμαχών ή την αποκόλληση βραχωδών μαζών, αλλά και την ολίσθηση των ερυθρογαίων που βρίσκονται στην οροφή του ρήγματος. Εντούτοις, κατά τη σεισμική ακολουθία των Αλκυονίδων, παρά το γεγονός ότι τα δύο τεμάχη του έδρασαν σαν σεισμοτεκτονικά ενιαία τέτοια γεγονότα, δεν διαπιστώθηκαν σε ευρεία κλίμακα παρά μόνο περιορισμένες πτώσεις βράχων από τα πρηνή του Κιθαιρώνα και μια μικρή ρευστοποίηση στο δέλτα του Λιβαδόστρα (Rondoyanni and Koukis 1989). Δύο θεωρούνται οι αιτίες αυτού του γεγονότος. Η πρώτη είναι η ήπια

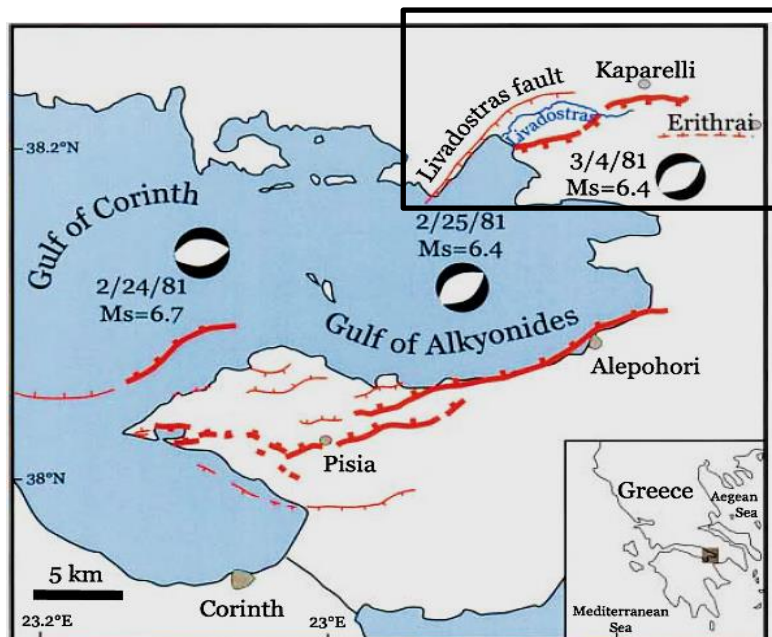
κλίση του ασβεστολιθικού πρανούς, που δεν ενισχύει βαρυτικές κινήσεις και η δεύτερη αφορά τη φύση της λιθολογίας που εμφανίζεται αρκετά συμπαγοποιημένη, χωρίς ανοικτές διακλάσεις και καθιστούν την περιοχή σχετικά πιο ασφαλή σε σχέση με την εκδήλωση κατολισθήσεων.

Είναι ένα κανονικού χαρακτήρα ρήγμα που αναπτύσσεται με διεύθυνση σχεδόν Α-Δ, κλίση του επιπέδου του προς το νότο και συνολικό μήκος περίπου 13km. Αποτελεί ένα κομμάτι μιας μεγαλύτερης, ευρύτερης ζώνης κανονικού ρήγματος που βρίσκεται στα βόρεια του όρους της Πάρνηθας, στην Κεντρική Ελλάδα. Η ζώνη αυτή εκτείνεται από το ανατολικότερο τμήμα του Κορινθιακού κόλπου έως το νότιο κόλπο της Εύβοιας. Σε αυτή τη ζώνη, τα περισσότερα ρήγματα κλίνουν προς βορρά, παρόλα αυτά, το ρήγμα του Καπαρελλίου που σχετίζεται με το σεισμό του 1981 παρουσιάζει μετάπτωση προς το νότο. Ο συν-σεισμικός δείκτης ολίσθησης υπολογίσθηκε στα $200-220^{\circ} / 60-70^{\circ}$ (dip direction / dip angle).

Αποτελείται από τρία τμήματα, από τα οποία τα δύο ενεργοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της σεισμικής ακολουθίας του 1981 (Jackson et al., 1982) (Εικόνα 19). Αυτά τα δύο τμήματα του ρήγματος παρουσιάζουν μία δομή κλιμακωτής διάταξης προς τα αριστερά (en echelon geometry), ενώ το τρίτο ΒΔ κομμάτι του ρήγματος δε διεργάγη κατά τη διάρκεια του σεισμού. Και τα τρία μέρη του ρήγματος είναι ξεκάθαρα εκπεφρασμένα στην επιφάνεια με σχεδόν συνεχόμενες κατοπτρικές επιφάνειες.

Το πρώτο μέρος του ρήγματος βρίσκεται ακριβώς νότια του χωριού του Καπαρελλίου και σχηματίζει ένα συνεχές ασβεστολιθικό κρημνό, περίπου 5km. Οι πρόσφατες μετατοπίσεις σε αυτό το τμήμα είναι κατά μέσο όρο 50-70cm. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώθηκε από παλαιοσεισμολογικά αποτελέσματα (Pavlidis et al., 2003). Στον ανατολικό τερματισμό του, η διάρρηξη του 1981 στράφηκε απότομα προς μια ΝΑ κατεύθυνση και διέσχισε τα πρόσφατα προσχωσιγενή ιζήματα του δαπέδου της κοιλάδας για μερικές εκατοντάδες μέτρα.

Το footwall του ρήγματος ανέβηκε κατά 600m. Η λιθολογία συντίθεται από σκληρούς Μεσοζωικούς ασβεστόλιθους. Το hanging wall του ρήγματος σχηματίζει μία μικρή λεκάνη και περιέχει περίπου 200m τεταρτογενείς – αποθέσεις Πλειστοκαινικής ηλικίας, όπως επίσης και αλλουβιακές αποθέσεις Ολοκαίνου.



Εικόνα 19. Χάρτης της επικεντρικής περιοχής του 1981. Με κόκκινο φαίνονται οι Τεταρτογενείς διαρρήξεις που είναι γνωστό ότι ενεργοποιήθηκαν το 1981. Στο μαύρο πλαίσιο βρίσκεται το ρήγμα του Καπαρελλίου, τμήμα του οποίου επαναδραστηριοποιήθηκε κατά τη σεισμική ακολουθία. (Benedetti et al., 2003)

Το ανατολικό τμήμα του ρήγματος του Καπαρελλίου βρίσκεται κατά μήκος του νότιου άκρου ενός μικρού (385m) Α – Δ επιμήκους λόφου βόρεια του ποταμού Λιβαδόστρου. Η κλίση του λόφου είναι μια ομαλή επιφάνεια διάβρωσης που αποτελείται από Μεσοζωικούς ασβεστόλιθους και κροκαλοπαγή. Η μακροπρόθεσμη δραστηριότητα αυτού του τμήματος του ρήγματος εκφράζεται από την παρουσία πολλαπλών “φρέσκων” κρημών ή κατοπτρικών επιφανειών που κόβουν το ασβεστολιθικό υπόβαθρο και τα κροκαλοπαγή. Το κύριο τμήμα της επιφάνειας του ρήγματος, συνεχόμενο για περίπου 4km, είναι απότομο, με περίπου 68-75° κλίση, και εμφανίζει slickensides (γραμμές ολίσθησης) σε κάποιες θέσεις. Το μέγιστο ύψος της επιφάνειας του ρήγματος είναι 4 – 5m, μειώνεται προοδευτικά προς τα δύο άκρα. Εκτός από τις κοντινές ενεργές χαράδρες που παρατηρούνται, δεν υπάρχουν ενδείξεις για διάβρωση ή εναπόθεση στο hanging-wall από την στιγμή που άρχισε να σχηματίζεται η κατοπτρική επιφάνεια. Η “φρεσκάδα” του ρήγματος του Καπαρελλίου υποδηλώνει ότι η κίνηση στο ρήγμα, πριν από το γεγονός του 1981, είναι πρόσφατη, πιθανώς μετα-παγετώδης (Armijo et al., 1992; Giraudi, 1995; Benedetti et al., 2002).

2.3.1. ΤΟ ΒΟΡΕΙΟ ΚΑΙ ΤΟ ΝΟΤΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ

Το ρήγμα του Καπαρελλίου μπορεί να διαχωριστεί σε δύο επιμέρους ρήγματα, το Βόρειο και το Νότιο Ρήγμα του Καπαρελλίου αντίστοιχα, τα οποία απέχουν μεταξύ τους περίπου 3.5km (Jackson et al., 1982; Papazachos et al., 1984b; Pavlides, 1993; Benedetti et al., 2003). Τα μήκη του Βόρειου και του Νότιου Ρήγματος του Καπαρελλίου είναι περίπου 4.5 και 5km, αντίστοιχα.

Το Βόρειο Ρήγμα του Καπαρελλίου έχει μέγιστο υψόμετρο που φτάνει περίπου τα 385m. Βρίσκεται βόρεια από τον ποταμό Λιβαδόστρα, κοντά στον οικισμό του Καπαρελλίου. Εμφανίζει πρηνή με κλίσεις που κυμαίνονται από 45° έως 55°. Η βάση του ρήγματος, στα ανατολικά, αποτελείται από ασβεστόλιθους Μεσοζωικής ηλικίας, ενώ στα δυτικά από ποτάμιας αποθέσεις Πλειστοκαινικής ηλικίας (Jackson et al., 1982). Στην οροφή του ρήγματος κάνουν την εμφάνισή τους αλλουβιακές και κολλουβιακές αποθέσεις με μέγιστο πάχος περίπου 200m (Tsodoulos and Koukouvelas, 2004; Kokkalas and Koukouvelas, 2005). Το ορατό τμήμα της επιφάνειας του ρήγματος έχει, κατά τόπους, μέγιστο ύψος περίπου 5m και μέση διεύθυνση κλίσης περίπου 165°, με κλίση περίπου 80°. Η κατοπτρική επιφάνεια του ρήγματος εμφανίζεται στυλβωμένη. Εκατέρωθεν της κατοπτρικής επιφάνειας μετατοπίζονται συμπαγοποιημένα τεκτονικά λατυποπαγή ασβεστολιθικής σύστασης, πάχους που κυμαίνεται από μερικά εκατοστά έως μερικά μέτρα. Στην επιφάνεια αυτή αναγνωρίστηκαν επίσης καμπυλώσεις (τεκτονικές αυλακώσεις), διακλάσεις έκτασης και μετρήθηκαν κατά τόπους γραμμώσεις ολίσθησης με μέση διεύθυνση περίπου 175° και κλίση περίπου 75°, δείχνοντας, ότι το ρήγμα παρουσιάζει ένα κανονικό χαρακτήρα κίνησης.

Κατά μήκος του επιπέδου του ρήγματος φαίνεται η πρόσφατη μετατόπιση του σεισμού του 1981 στο κατώτερο τμήμα του καθρέπτη του ρήγματος, με ύψος που φτάνει σε κάποια σημεία έως και 1.5m. Ακόμα, πάνω στον καθρέπτη του ρήγματος διακρίνονται και παλαιότερα ίχνη μετατοπίσεων, τα οποία είναι αποτέλεσμα της μακράς διάρκειας δραστηριότητας του ρήγματος (Benedetti et al., 2003). Η γεωμετρία στο ανατολικό άκρο του Βόρειου Ρήγματος του Καπαρελλίου χαρακτηρίζεται από μια δομή διασταυρούμενων ρηγματών (Pavlidis, 1993). Η δομή αυτή προκάλεσε τη μόνιμη εκτροπή του ίχνους του ρήγματος στο ανατολικό άκρο κατά τη διάρκεια του σεισμού της 4ης Μαρτίου. Στη δομή αυτή, οι επιφανειακές διαρρήξεις που προκάλεσε ο σεισμός του 1981, προκάλεσαν την επαναδραστηριοποίηση της κύριας διεύθυνσης του ρήγματος (A – Δ), μετέβαλλαν απότομα την διεύθυνσή τους και συνέχισαν την πορεία τους προς τα ΝΑ κατά μήκος ενός άλλου δευτερεύοντος ρήγματος διεύθυνσης ΔΒΔ - ΑΝΑ, αφήνοντας ανεπηρέαστη την προέκταση του κύριου ρήγματος προς τα ανατολικά. Στο κεντρικό τμήμα του ρήγματος παρουσιάζεται κατάτμηση. Τα επιμέρους ρηξιγενή τμήματα σχηματίζουν δομές κλιμακωτής διάταξης με κατεύθυνση προς τα ανατολικά. Στα δυτικά του ρήγματος οι σεισμικές διαρρήξεις του 1981, μετατοπίζουν Πλειστοκαινικής και Ολοκαινικής ηλικίας αποθέσεις και δημιουργούν ένα ρηξιγενές πρηνές με μέσο ύψος που κυμαίνεται από περίπου 0.6m έως και περίπου 1m.

Το Νότιο Ρήγμα του Καπαρελλίου αναπτύσσεται κατά μήκος της βόρειας κλιτής του Όρους Κιθαιρώνα. Είναι ένα κανονικού χαρακτήρα ρήγμα με μετάπτωση προς τα νότια, διατρέχει κατά μήκος τις νότιες κλιτής ενός υψώματος με μέγιστο υψόμετρο που φτάνει περίπου τα 360m και βρίσκεται νότια του ποταμού Λιβαδόστρου. Η επιφάνεια του ρήγματος φαίνεται να μετατοπίζει εκατέρωθεν Μεσοζωικούς ασβεστόλιθους. Το ανυψωμένο τέμαχος του ρήγματος αποτελείται από Πλειστοκαινικής ηλικίας ποτάμιας αποθέσεις με κλίση προς το βορρά, αποτέλεσμα της δράσης του ρήγματος, ενώ το κατερχόμενο τέμαχος αποτελείται από συσσωρευμένα και μικρού πάχους ιζήματα με περιορισμένη πλευρική εξάπλωση. Κατά μήκος της βάσης του πρηνούς διακρίνεται, σε κάποιες θέσεις, η μετατόπιση που προκλήθηκε από τον σεισμό του 1981, με μέσο ύψος περίπου 0.60m. Η μέγιστη μετατόπιση

επί του ρηξιγενούς πρηνούς υπολογίζεται περίπου στα 200m και εντοπίζεται κοντά στο κεντρικό μέρος του ρήγματος.

Κατά την διάρκεια του σεισμικού γεγονότος της 4ης Μαρτίου, μεταξύ των δυο επιμέρους τμημάτων του ρήγματος του Καπαρελλίου, μια σειρά από περιορισμένου μήκους διαρρήξεις με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ αναπτύχθηκαν μέσα στην κοιλάδα του ποταμού Λιβαδόστρα σχηματίζοντας μια ζώνη μεταβίβασης μεταξύ των δύο ρηγμάτων (Jackson et al., 1982; Pavlides, 1993). Η ανάλυση του προφίλ μετατόπισης για το ρήγμα του Καπαρελλίου περιορίστηκε μόνο στο Βόρειο τμήμα του ρήγματος του Καπαρελλίου, επειδή πληρούσε τις προϋποθέσεις εφαρμογής μορφοτεκτονικών δεικτών.

Το κατακόρυφο άλμα του Βόρειου ρήγματος του Καπαρελλίου υπολογίστηκε από το αλγεβρικό άθροισμα της μετατόπισης επί του ρηξιγενούς πρηνούς και του πάχους των αποθέσεων επί της οροφής του ρήγματος, σε περίπου 350m (Tsodoulos, 2009). Εάν υποθέσουμε ότι το ρήγμα αρχίζει να δραστηριοποιείται κατά το Κατώτερο Πλειστόκαινο, με την απόθεση των ιζημάτων στην οροφή του ρήγματος, προκύπτει μια μέση σχετική ταχύτητα κίνησης των ρηξιγενών τεμαχών, της τάξης των περίπου 0.20mm/yr. Όμως, εάν υποθέσουμε ότι το ρήγμα αρχίζει να δραστηριοποιείται κατά το Κατώτερο Πλειόκαινο, τότε προκύπτει μια μέση σχετική ταχύτητα της τάξης των 0.06mm/yr περίπου.

Εξαιτίας της συσσώρευσης μικρού πάχους ιζημάτων, με περιορισμένη πλευρική εξάπλωση, επί του κατερχόμενου τεμάχους, το κατακόρυφο άλμα του Νότιου ρήγματος του Καπαρελλίου θεωρήθηκε ότι είναι ίσο με τη μετατόπιση επί του ρηξιγενούς πρηνούς περίπου δηλαδή 200m. Εάν υποθέσουμε ότι η δράση του ρήγματος ξεκινά στο Κατώτερο Πλειστόκαινο, προκύπτει μια μέση σχετική ταχύτητα κίνησης των ρηξιγενών τεμαχών, της τάξης περίπου των 0.11mm/yr. Όμως, εάν υποθέσουμε ότι το ρήγμα αρχίζει να δραστηριοποιείται κατά το Κατώτερο Πλειόκαινο, τότε προκύπτει μια μέση σχετική ταχύτητα κίνησης της τάξης περίπου των 0.04mm/yr.

2.4. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ ΣΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ ΛΙΒΑΔΟΣΤΡΑ

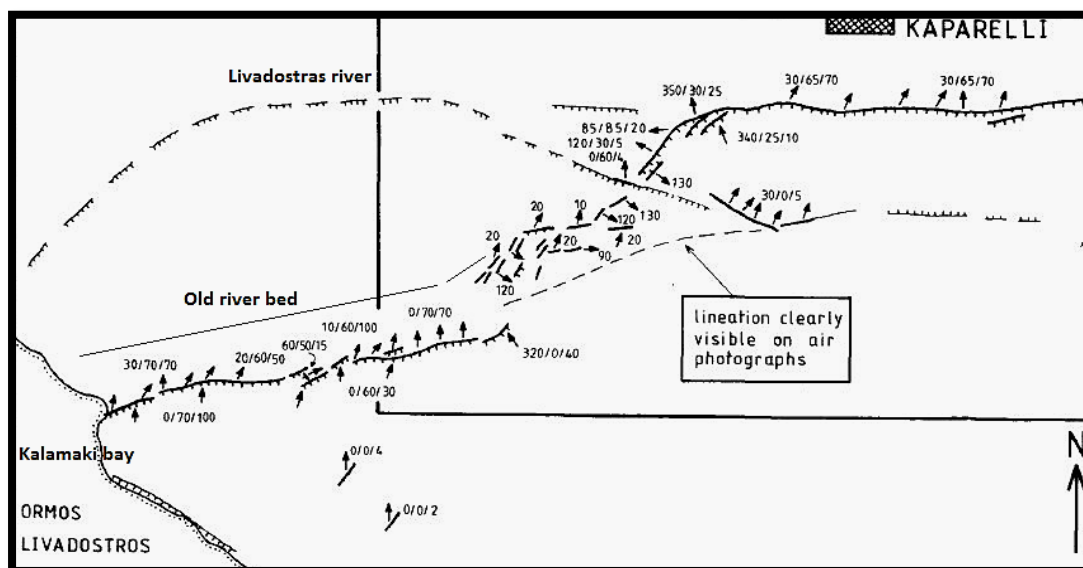
Ένα σημαντικό φυσιογραφικό ή γεωμορφολογικό χαρακτηριστικό της περιοχής είναι ο ποταμός Λιβαδόστρας, ο οποίος αποστραγγίζει την ελαφρώς κυματοειδή επιφάνεια διάβρωσης των Πλαταιών ύψους 300m.

Η πορεία του ποταμού Λιβαδόστρου ξεκινάει από τη βόρεια κλιτή του όρους Κιθαιρώνα, , και διατρέχει τη λεκάνη απορροής του με διεύθυνση σχεδόν Α – Δ, ως τις εκβολές του που βρίσκονται στον κόλπο των Αλκυονίδων. Η μέγιστη υψομετρική διαφορά της λεκάνης απορροής είναι 1400m.

Νοτιοδυτικά του Καπαρελλίου, η σχεδόν ομαλή τοπογραφία ξαφνικά καταστρέφεται, καθώς ο ποταμός σχηματίζει έναν καταρράκτη, μπαίνει σε ένα φαράγγι και αλλάζει ραγδαίως υψόμετρο δημιουργώντας μια διαφορά σχεδόν 200m.

Μικρές ρωγμές και σχισμές βρέθηκαν, επίσης, στο βουνό νότια των Πλαταιών και στη νότια πλαγιά της κορυφογραμμής στα νότια του δυτικού τμήματος. Και στις δύο θέσεις υπάρχει

αρκετή τοπογραφία για να είναι δυνατή η βαρυτική επίδραση, αλλά οι ευθυγραμμίσεις των σχισμών είναι απίθανες για την οριζόντια αποτύπωση και τα διανύσματα ολίσθησης είναι σύμφωνα με εκείνα των μεγάλων τμημάτων του ρήγματος. Μικρές ρωγμές βρέθηκαν επίσης ακριβώς ανατολικά του καταρράκτη, όπου ο ποταμός εισέρχεται στο φαράγγι (Εικόνα 20).



Εικόνα 20. Τροποποιημένος χάρτης των διαρρήξεων του σεισμού του 1981. Τροποποιήθηκε από (Jackson et al., 1982)

Η δραματική αλλαγή του υψομέτρου του ποταμού Λιβαδόστρου είναι αποτέλεσμα μιας παλαιότερης κίνησης πάνω σε ένα κανονικό ρήγμα προς τα βόρεια. Αυτό σχηματίζει έναν απότομο και ψηλό κρημό που εκτείνεται από την ευθύγραμμη βορειοδυτική ακτή του Όρμου Λιβαδόστρου προς τα βόρεια, όπου καμπυλώνεται προς τα ανατολικά και μειώνεται απότομα σε ύψος, στη γραμμή που ορίζει το επανενεργοποιημένο ρήγμα νότια του Καπαρελλίου. Με την υψομετρική πτώση της επιφάνειας του εδάφους και της κοίτης του ποταμού προς το νότο, το ρήγμα αυτό έχει αναγκάσει τον ποταμό να γυρίσει πίσω στην παλιά επιφάνεια διάβρωσης, σχηματίζοντας το φαράγγι και τον καταρράκτη.

2.5. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ^{36}Cl ΣΤΗΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ

Στην περιοχή του Καπαρελλίου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία ^{36}Cl για να αξιολογήσουμε το ιστορικό της σεισμικής ολίσθησης του ρήγματος του Καπαρελλίου, καθορίζοντας τις ηλικίες έκθεσης ως συνάρτηση του ύψους στη συνολική επιφάνεια του ρήγματος (Zreda and Noller, 1998; Gran Mitchell et al., 2001; Benedetti et al., 2002). Το ^{36}Cl παράγεται κυρίως μέσω αλληλεπιδράσεων δευτεροταγών νετρονίων και μιονίων κοσμικής ακτινοβολίας με Ca στην ασβεστολιθική επιφάνεια (CaCO_3) (Stone et al.,

1996). Ο ρυθμός παραγωγής μειώνεται εκθετικά με το βάθος και το ^{36}Cl συσσωρεύεται ως επί το πλείστον μετά την εκταφή της επιφάνειας του ρήγματος.

Σε ένα ενεργό ρήγμα, όπως αυτό του Καπαρελλίου, κάθε νέος σεισμός φέρνει στην επιφάνεια ένα νέο τμήμα της επιφάνειας του ρήγματος. Η ποσότητα του ^{36}Cl στην επιφάνεια του ρήγματος είναι το άθροισμα του ^{36}Cl που συσσωρεύεται σε βάθος, πριν από το σεισμό και το ^{36}Cl συσσωρεύεται μετά τον σεισμό, όταν η επιφάνεια του ρήγματος εκτίθεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Δεδομένου ότι τα ανώτερα τμήματα της επιφάνειας του ρήγματος έχουν εκτεθεί περισσότερο, συνεπώς έχουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις ^{36}Cl . Οι συγκεντρώσεις μειώνονται προς τη βάση της επιφάνειας του ρήγματος. Συνεχή προφίλ δειγμάτων πλάτους 20cm συλλέχθηκαν σε δύο θέσεις, με διαφορά 10m μεταξύ τους κατά μήκος του ρήγματος (Εικόνα 21). Τα συνεχή δείγματα χωρίστηκαν σε τμήματα των 10cm για ανάλυση. Η συγκέντρωση ^{36}Cl και χλωριδίου στο ανθρακικό άλας προσδιορίστηκε για 80 υπο-δείγματα με φασματομετρία μάζας επιταχυντή αραιώσης ισοτόπων, στο εργαστήριο CAMS του Εθνικού Εργαστηρίου Lawrence Livermore.



Εικόνα 21. Κενά σημεία πάνω στην ασβεστολιθική επιφάνεια του ρήγματος του Καπαρελλίου που μαρτυρούν τη δειγματοληψία που πραγματοποιήθηκε προκειμένου να γίνουν γνωστά τα σεισμικά γεγονότα που έλαβαν χώρα στην περιοχή, μέσω ενός μοντέλου συσώρευσης ^{36}Cl . Το σημείο αυτό βρίσκεται κοντά στις τομές Kar1 και Kar2, εκεί όπου η επιφάνεια του ρήγματος παρουσιάζει μερικά από τα μέγιστα ύψη της.

Προκειμένου να παραχθεί ένα ακριβές μοντέλο της συσώρευσης ^{36}Cl κατά τη διάρκεια της δράσης του ρήγματος, πρέπει να υπολογισθεί η αρχική αφθονία του ^{36}Cl ως συνάρτηση του βάθους πριν από τη μετατόπιση του ρήγματος. Το footwall της επιφάνειας του ρήγματος αποτελείται από ασβεστόλιθο Μεσοζωικής ηλικίας, που εκτιθόταν και διαβρωνόταν για αρκετά εκατομμύρια χρόνια πριν από οποιαδήποτε κίνηση στο ρήγμα. Περίπου μερικές εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια απαιτούνται για την επίτευξη μιας σταθερής κατάστασης, η ακριβής τιμή που εξαρτάται από την ταχύτητα διάβρωσης, την ισορροπία μεταξύ της ποσότητας ^{36}Cl που παράγεται και της απώλειας από συνδυασμό αποσύνθεσης και

διάβρωσης (Lal , 1991). Η ποσότητα του ^{36}Cl που συσσωρεύεται στο footwall, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί ο ρυθμός διάβρωσης της παραμορφωμένης επιφάνειας (Lal, 1991). Εξαιτίας της έλλειψης αυτών των πληροφοριών, χρησιμοποιήθηκε η συγκέντρωση ^{36}Cl ενός δείγματος που συλλέχθηκε κοντά στην κορυφή της επιφάνειας του ρήγματος. Η συγκέντρωση ^{36}Cl σε αυτό το δείγμα φαίνεται να είναι χαμηλότερο σαν όριο σε σχέση με το δείγμα από την ανώτερη επιφάνεια. Ο ρυθμός διάβρωσης που επιτυγχάνεται είναι περίπου 8m/Myr^{-1} . Αυτή η τιμή είναι ένα μέγιστο όριο για το ρυθμό διάβρωσης που παρατηρείται στο footwall του ρήγματος. Το μοντέλο συνεπώς υποθέτει ότι πριν από τη διάρρηξη, η επιφάνεια διαβρώνεται σταθερά με ρυθμό διάβρωσης 8m/Myr^{-1} .

Το μήκος εξασθένησης για τις κοσμικές ακτίνες εξαρτάται από την πυκνότητα του υλικού του “στόχου” (Lal, 1991). Όσο υψηλότερη είναι η πυκνότητα, τόσο μεγαλύτερη είναι η εξασθένηση των κοσμικών ακτίνων και τόσο χαμηλότερη η παραγωγή ^{36}Cl σε βάθος. Στα σημεία δειγματοληψίας, το footwall και το hanging-wall του ρήγματος έχουν δύο διαφορετικούς όγκους πυκνότητας. Το footwall αποτελείται από ασβεστόλιθο, με πυκνότητα $2,7\text{ g/cm}^{-3}$ (Gosse and Phillips, 2001). Το hanging-wall αποτελείται κυρίως από αποθέσεις με χαμηλότερη πυκνότητα. Από ό,τι είναι γνωστό, δεν υπάρχουν ακριβείς εκτιμήσεις του όγκου πυκνότητας των ιζημάτων αυτών. Η πυκνότητα του εδάφους, περίπου 2 g/cm^{-3} (Gosse and Phillips, 2001), είναι ένα κατώτερο όριο σε αυτή την τιμή. Στους υπολογισμούς που έγιναν (Benedetti et al., 2003) διαφοροποιήθηκαν οι πυκνότητες του hanging-wall, οι τιμές των οποίων κυμαίνονται μεταξύ 2.1 και 2.7 g/cm^{-3} .

2.6. ΠΑΛΑΙΟΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑ

Η παλαιοσεισμολογία χρησιμοποιεί, κυρίως, γεωλογικές μεθόδους προκειμένου να προσδιορίσει σεισμικά γεγονότα του γεωλογικού παρελθόντος. Τα αποτελέσματα της παλαιοσεισμολογίας προσφέρουν πληροφορίες κυρίως για το μέγεθος του σεισμού, το χρόνο γένεσης και την περίοδο επανάληψης.

Μεταξύ άλλων ορισμών που αναφέρονται στην διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία (Παυλίδης, 2003; Σελ. 112) δίνεται από τον Παυλίδη (2003) και ο εξής ορισμός : Παλαιοσεισμολογία, είναι η διερεύνηση της σεισμικής ιστορίας των ρηγμάτων, με γεωλογικές μεθόδους, ώστε να εκφράζεται αυτή με όρους ανάλογους της σεισμολογίας. Οι σεισμοί που μελετώνται με παλαιοσεισμολογικές μεθόδους αναλύονται με βάση τη λεπτομερή ανάλυση φαινομένων σε περιοχές παρακείμενες σεισμικών πηγών και είναι στενά συνδεδεμένοι με την πηγή.

2.6.1. ΠΑΛΑΙΟΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

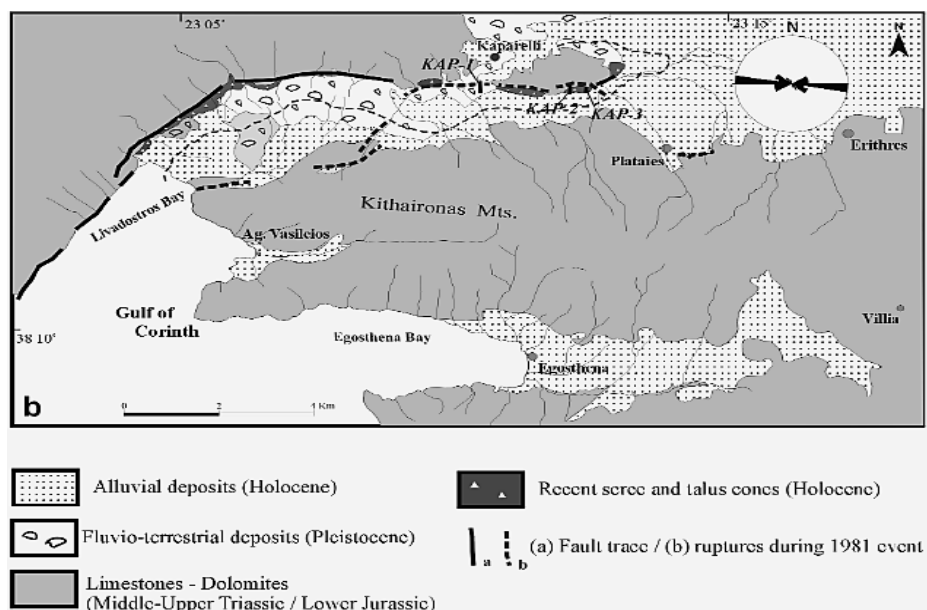
Μια ολοκληρωμένη παλαιοσεισμολογική έρευνα θα πρέπει να έχει τους εξής στόχους (Παυλίδης, 2003):

- Προσδιορισμό παλαιών σεισμικών γεγονότων (χρόνος, μέγεθος).
- Υπολογισμό σεισμικού άλματος και ρυθμού ολίσθησης κατά μήκος του ρήγματος.
- Διερεύνηση της κατάτμησης του ρήγματος σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της γεωμετρίας των ρηγμάτων.
- Έλεγχο του τρόπου δραστηριοποίησης διαφορετικών τμημάτων ενός ρήγματος σε διαδοχικά σεισμικά γεγονότα.
- Υπολογισμό του χρόνου επανάληψης μεγάλων σεισμών, και της πιθανής μεταβολής του στο χρόνο.

Οι πιο αξιόπιστες και οι πιο συνήθεις τεχνικές που εφαρμόζονται είναι η κατασκευή παλαιοσεισμολογικών τομών κατά μήκος γνωστών ενεργών ή πιθανά ενεργών ρηγμάτων και η αναλυτική αποτύπωση της τεκτονο-στρωματογραφία τους.

2.6.2. Η ΠΑΛΑΙΟΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΟ ΡΗΓΜΑ ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ

Προκειμένου να κατανοηθεί η Ολοκαινική σεισμική συμπεριφορά του ρήγματος του Καπαρελλίου και προκειμένου να προσδιοριστεί ο ρυθμός ολίσθησης, καθώς και το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς σεισμούς, κατασκευάστηκαν κατά μήκος του ρήγματος τρεις παλαιοσεισμολογικές τομές (Εικόνα 22).



Εικόνα 22. Απλοποιημένος χάρτης της ευρύτερης περιοχής του Καπαρελλίου, όπου φαίνονται και οι θέσεις που επιλέχθηκαν για τις παλαιοσεισμολογικές τομές. (Kokkalas et al., 2007)

Οι τομές ονομάστηκαν με βάση την θέση που έχουν κατά μήκος του ρήγματος, από δυτικά προς ανατολικά σε Kar 1, Kar 2 και Kar 3 (Εικόνα 23). Οι τομές Kar 2 και Kar 3 κατασκευάστηκαν ξεκινώντας από τη βάση του ασβεστολιθικού πρηνούς που ταυτίζεται με τη βάση του ρήγματος. Η τομή Kar 1 κατασκευάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να περιλαμβάνει τη ρηξιγενή ζώνη, ξεκινώντας από το ανερχόμενο τέμαχος του ρήγματος.

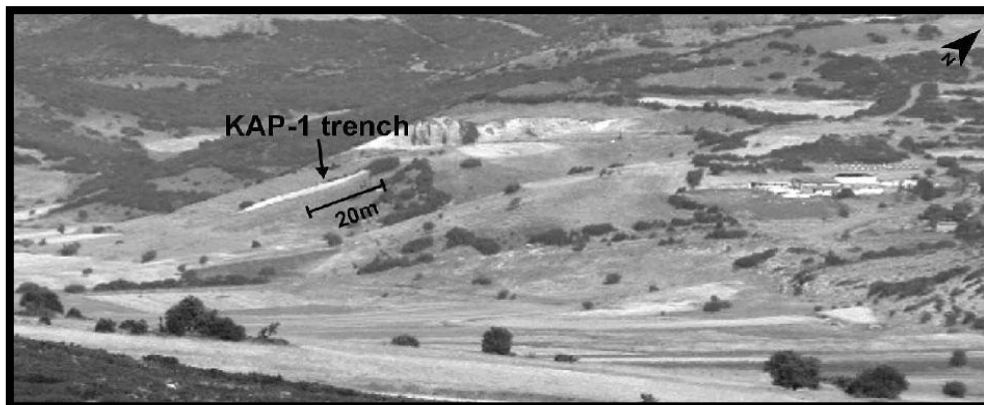


Εικόνα 23. Τοποθεσία παλαιοσεισμολογικών τομών. Με μαύρη γραμμή επισημαίνεται το ρήγμα του Καπαρελλίου (Google Earth).

2.6.3. ΤΕΚΤΟΝΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ

2.6.3.1. ΠΑΛΑΙΟΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΚΑΡ 1

Η παλαιοσεισμολογική τομή Καρ1 (Εικόνα 24) είχε μήκος περίπου 30m, πλάτος περίπου 2m και βάθος περίπου 4m. Το κύριο τεκτονικό στοιχείο της συγκεκριμένης εκσκαφής είναι η παρουσία μιας ρηξιγενούς ζώνης κανονικού χαρακτήρα με μεγάλη τιμή κλίσης και πλάτος περίπου 3m.



Εικόνα 24. Η θέση της παλαιοσεισμολογικής τομής Καρ1 στο ύπαιθρο. (Kokkalas et al., 2007)

Η παλαιοσεισμολογική τομή Καρ1 (Εικόνα 24) αποκάλυψε μία ρηξιγενή ζώνη, η οποία επαναδραστηριοποιήθηκε κατά την διάρκεια του σεισμού του 1981. Η μελέτη και χρονολόγηση της ζώνης έδειξε ως ηλικία 5200-5500 χρόνια (Kokkalas et al., 2007).

2.6.3.2. ΠΑΛΑΙΟΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΚΑΡ 2

Η παλαιοσεισμολογική τομή Καρ2 (Εικόνα 23), έχει περίπου 16m μήκος, 2m πλάτος και 3m ύψος. Η συγκεκριμένη τομή αποτελεί μια τυπική ακολουθία κολλούβιων αποθέσεων. Αποτελείται κυρίως από γωνιώδη ασβεστολιθικά τεμάχια και θεμελιώδη μάζα, εντός της οποίας εμπεριέχονται κεραμικά θραύσματα και υπολείμματα από κάρβουνο.

Και σε αυτή τη τομή, παρατηρούνται κολλουβιακές σφήνες, με κάποιες διαφορές μεταξύ τους, κυρίως όσον αφορά στο κοκκομετρικό μέγεθος, γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πρόκειται και για διαφορετικά σεισμικά παρελθοντικά γεγονότα, καθώς οι κολλουβιακές σφήνες θεωρούνται ως χαρακτηριστικές αποθέσεις μετά την εκδήλωση ενός σεισμού. Βρέθηκαν δύο κολλουβιακές σφήνες, κάτι που επιβεβαιώνει το σενάριο ύπαρξης τουλάχιστον δύο σεισμικών γεγονότων, Για αυτό, συλλέχθηκαν δείγματα εδάφους και χρονολογήθηκαν με τη μέθοδο του ^{14}C .

Από τη χρονολόγηση των δειγμάτων της κατώτερης ενότητας Α, υπολογίστηκε ένα εύρος ηλικίας από 7540-7300 π.Χ. Από τη χρονολόγηση των δειγμάτων της ανώτερης ενότητας Β, υπολογίστηκε ένα εύρος ηλικίας από 560-690 μ.Χ. Η εκδήλωση κάθε σεισμικού γεγονότος τοποθετείται χρονικά πριν από το αντίστοιχο ηλικιακό εύρος.

2.6.3.3. ΠΑΛΑΙΟΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΚΑΡ 3

Η παλαιοσεισμολογική τομή Καρ3 (Εικόνα 23 και 25), έχει περίπου 30m μήκος, περίπου 2m πλάτος και περίπου 3m βάθος. Η λεπτομερής χαρτογραφική αποτύπωσή της, βοήθησε στο διαχωρισμό της σε τρεις κύριες ενότητες, οι οποίες αποτελούν τρεις διαφορετικές κολλουβιακές σφήνες, με διαφορετικά δηλαδή χαρακτηριστικά η κάθε μία, οπότε μπορούμε να συμπεράνουμε πως πρόκειται για δύο πιθανά σεισμικά γεγονότα, με τρίτο και πιο πρόσφατο αυτό του 1981.



Εικόνα 25. Η κατοπτρική επιφάνεια του ρήγματος του Καπαρελλίου στην τομή Καρ3 και μέρος της παλαιοσεισμολογικής τομής.

2.6.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΛΑΙΟΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Βασιζόμενοι στα προαναφερόμενα παλαιοσεισμολογικά στοιχεία, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το ρήγμα του Καπαρελλίου παρουσιάζει μια συνεχή τεκτονική δραστηριότητα τα τελευταία 10000 χρόνια. Η στρωματογραφική ανάλυση των τομών κατά μήκος του ρήγματος ανέδειξε την ύπαρξη στοιχείων που μαρτυρούν τουλάχιστον τρία σεισμικά γεγονότα, προγενέστερα αυτού του 1981.

Η μετατόπιση κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων είναι της τάξεως του 0.7–1m, όπως προέκυψε από την καταγραφή μετατοπισμένων χαρακτηριστικών οριζόντων, στη στρωματογραφία των κολλουβιακών αποθέσεων των τριών παλαιοσεισμολογικών τομών.

Οι ηλικίες που προέκυψαν από τη χρονολόγηση των δειγμάτων (Πίνακας 4), από τις τομές, υποδεικνύουν μια περίοδο επανάληψης, για το Βόρειο Ρήγμα Καπαρελλίου, περίπου 2500 χρόνια. Διαιρώντας το συνολικό παρατηρούμενο πάχος των κολλουβιακών αποθέσεων στις τομές, που είναι περίπου 2.7m (Καρ2) με το εύρος των προσδιορισμένων ηλικιών των δειγμάτων, προκύπτει ένας μέσος ρυθμός ολίσθησης της τάξης των 0.28–0.29mm/χρόνο.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα χρονολόγησης δειγμάτων από τις παλαιοσεισμολογικές τομές του ρήγματος Καπαρελλίου.

Αριθμός δείγματος	Ηλικία ¹⁴ C (σε έτη πριν από σήμερα)	Διακριβωμένη ηλικία (Ημερολογιακά έτη)
Καρ1(4)	4,870±40	3760 – 3620 π.Χ.
Καρ1(8)	6,280±40	5340 – 5200 π.Χ.
Καρ1(3)	1,250±40	680 – 890 μ.Χ.
Καρ1(1)	6,390±50	5480 – 5300 π.Χ.
Καρ2(3)	8,330±50	7540 – 7300 π.Χ.
Καρ2(1)	1,410±40	560 – 690 μ.Χ.

2.7. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΠΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΟΡΓΑΝΑ GPS

Το ΚΑΡΝΕΤ (Ενότητα 2.7.1.) σχεδιάστηκε λαμβάνοντας υπό όψη δύο πράγματα:

- 1) να χαρτογραφήσει τη συσσώρευση κατά μήκος του ρήγματος του Καπαρελλίου - την ρηξιγενή κοιλότητα του Ασωπού για καλύτερη εκτίμηση του σεισμικού δυναμικού και
- 2) να συγκρίνει τα πρότυπα γεωδαιτικής καταπόνησης με τα γεωλογικά μοτίβα έντασης.

Ένας τρίτος στόχος είναι να μετρηθούν οι τοπικές μεταβολές του ρυθμού καταπόνησης που θα μπορούσαν να αποκαλύψουν τις μηχανικές ιδιότητες των σεισμικών ρηγμάτων.

2.7.1. ΤΟ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ (ΚΑΡΝΕΤ)

Το γεωδαιτικό δίκτυο στην ευρύτερη περιοχή του ρήγματος του Καπαρελλίου αποτελείται από έντεκα σημεία, τα οποία έχουν δημιουργηθεί από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών και το Πανεπιστήμιο Wrocław των περιβαλλοντικών και βιολογικών επιστημών της Πολωνίας (Cacon et al., 2005, Drakatos et al., 2005, Ganas et al., 2007a). Ο κύριος στόχος της εγκατάστασης του δικτύου, ήταν η παρακολούθηση της κινηματικής του ρήγματος του Καπαρελλίου και η σύνδεσή του με το γειτονικό ενεργό ρήγμα των Ερυθρών. Το δίκτυο ΚΑΡΝΕΤ εκτείνεται περίπου 1-5 χιλιόμετρα σε κάθε πλευρά του επιφανειακού ίχνους του ρήγματος του Καπαρελλίου.

Καθορίστηκαν αυστηρά γεωλογικά κριτήρια κατά την επιλογή της θέσης των σταθμών προκειμένου να εξασφαλιστούν σταθερές εγκαταστάσεις. Όλα τα γεωδαιτικά σημεία αναφοράς κατασκευάστηκαν σε ασβεστόλιθο.

Το δίκτυο έχει μετρηθεί ήδη τέσσερις φορές συνολικά (2004, 2005, 2006 και 2008). Οι συνεδρίες των μετρήσεων ήταν περίπου 8-12 ώρες ανά σημείο σε κάθε εποχή. Οι πρώτες 2 περιόδους μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν μόνο έξι από τα γεωδαιτικά σημεία και στη συνέχεια πέντε περισσότερα προστέθηκαν κυρίως στο ανατολικό τμήμα της περιοχής προς την περιοχή που αναπτύχθηκε το ρήγμα των Ερυθρών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΑΙΘΡΟΥ

Όπως έχει αναφερθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας αυτής (Κεφάλαιο 2), η ευρύτερη περιοχή του Καπαρελλίου αποτελεί μια περιοχή με έντονο ανάγλυφο, το οποίο οφείλεται στην τεκτονική δραστηριότητα που έχει υποστεί, εξαιτίας της ύπαρξης της ρηξιγενούς ζώνης Λιβαδόστρου – Καπαρελλίου, η οποία ανήκει στην ευρύτερη ρηξιγενή ζώνη του Ανατολικού Κορινθιακού κόλπου, καθώς επίσης και στη δράση του υδρογραφικού συστήματος, κυρίως του ποταμού Λιβαδόστρου.

Είναι μια περιοχή, η οποία τις τελευταίες δεκαετίες έχει επηρεαστεί, κατά κύριο λόγο, από την ενεργοποίηση του ρήγματος του Καπαρελλίου κατά τη σεισμική ακολουθία του 1981. Εκτός, βέβαια, από τα σεισμικά γεγονότα του 1981, οι παλαιοσεισμολογικές τομές δείχνουν ότι η περιοχή έχει επηρεαστεί και από παρελθόντα σεισμικά γεγονότα, με τη σεισμική ακολουθία του 1981 να αποτελεί την κορύφωση των σεισμολογικών συμβάντων έως και σήμερα.

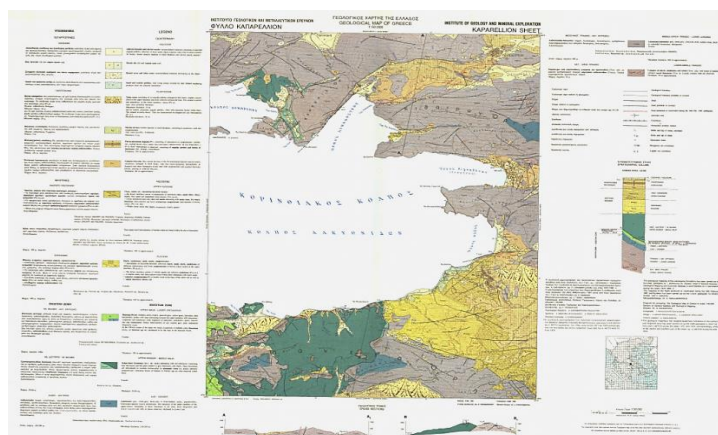
Το ρήγμα εμφανίζει έναν ετήσιο ρυθμό ολίσθησης, ο οποίος φτάνει τα μερικά mm/χρόνο, γεγονός που δεν επιτρέπει την παρατήρηση σημαντικών παραμορφώσεων στην περιοχή. Για το λόγο αυτό, όπως φαίνεται παρακάτω, (Κεφάλαια 4 και 5), “επιστρατεύθηκε” η επιστήμη της Συμβολομετρίας, ώστε να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε την παραμόρφωση που προκαλεί το ρήγμα του Καπαρελλίου στην ευρύτερη περιοχή σε πολύ μικρότερη κλίμακα (σε κλίμακα έως και <mm), καθώς επίσης και την όποια κίνηση του ρήγματος ή κάποιου τμήματος αυτού.

3.1. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΥΠΑΙΘΡΟΥ

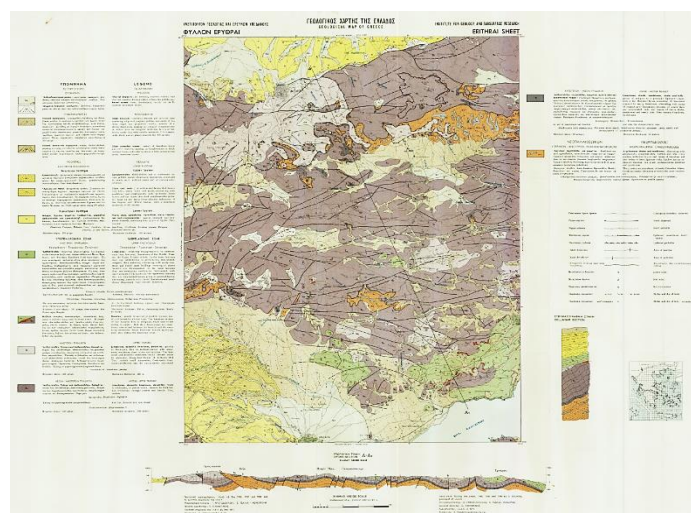
Για τη διεκπεραίωση της χαρτογράφησης της ευρύτερης περιοχής του Καπαρελλίου και προκειμένου να χαρτογραφηθεί με λεπτομέρεια το ρήγμα, αλλά και οι πιθανές, ακόμη εμφανείς, επιφανειακές του διαρρήξεις, χρησιμοποιήθηκαν δύο γεωλογικά φύλλα του ΙΓΜΕ, του Καπαρελλίου (Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος, Φύλλο Καπαρέλλιον, 1:50.000, Εικόνα 26) και των Ερυθρών (Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος, Φύλλο Ερυθραί, 1:50.000, Εικόνα 27).

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αφορούν κυρίως μετρήσεις κατά μήκος της κατοπτρικής επιφάνειας του ρήγματος (κλίση επιφάνειας, γραμμές ολίσθησης, πάχος τεκτονικού κροκαλοπαγούς, εμφάνιση στρώσης σε ασβεστολιθικό υπόβαθρο), από τις οποίες προέκυψε το μοντέλο υψομέτρου της επιφάνειας του ρήγματος, με τη χρήση της γεωλογικής πυξίδας και της εφαρμογής FieldMove Clino.

Η χαρτογράφηση της περιοχής επιβεβαίωσε τη σύνθετη γεωμετρία του ρήγματος και τη μέχρι και σήμερα εμφανή δομή κλιμακωτής διάταξης που παρουσιάζει, κυρίως στο Βόρειο τμήμα του (κοντά στο χωριό του Καπαρελλίου).



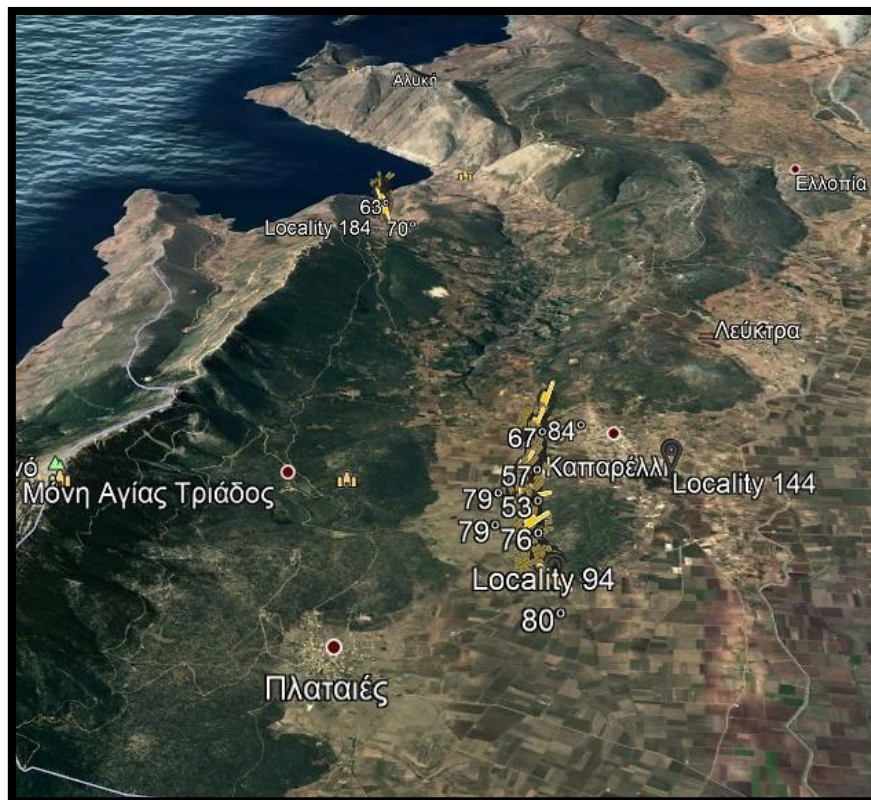
Εικόνα 26. Γεωλογικός χάρτης, Φύλλο Καπαρέλλιον, 1:50.000, ΙΓΜΕ



Εικόνα 27. Γεωλογικός χάρτης, Φύλλο Ερυθραί, 1:50.000, ΙΓΜΕ

3.2. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ (ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΣΕ ΧΑΡΤΗ)

Το σύνθετης γεωμετρίας ρήγμα του Καπαρελλίου χαρτογραφήθηκε (Εικόνα 28) και μελετήθηκε αφού χωρίστηκε σε δύο τμήματα, το Βόρειο και το Νότιο τμήμα.



Εικόνα 28. Η λεπτομερής χαρτογράφηση του ρήγματος του Καπαρελλίου, το οποίο καταλήγει τον Κορινθιακό κόλπο.

Οι λιθολογίες που αποτελούν την περιοχή χαρτογράφησης είναι κυρίως ασβεστολιθικές εμφανίσεις, τεταρτογενείς αποθέσεις (και αλλουβιακά ριπίδια) και κάποια λιμνοθαλάσσια ιζήματα κοντά στην απόληξη του Νότιου τμήματος του ρήγματος στον κόλπο του Καλαμακίου.

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 29), το Βόρειο τμήμα του ρήγματος αποτελεί και το μεγαλύτερο κομμάτι του, ενώ το Νότιο τμήμα του ρήγματος είναι μικρότερο και δεν έχει την επιφανειακή έκθεση που έχει το Βόρειο τμήμα, για αυτό και ήταν πιο δύσκολο να χαρτογραφηθεί και η έκταση που καλύπτει στον χάρτη είναι ελάχιστη. Τα δύο αυτά τμήματα του ρήγματος του Καπαρελλίου φαίνονται με κίτρινο χρώμα. Τα χαρτογραφημένα αυτά επιφανειακά στοιχεία του ρήγματος αποτελούν ουσιαστικά και τις επιφανειακές διαρρήξεις που είναι ορατές σήμερα. Υπάρχουν σαφώς και μικρότερες διαρρήξεις, αλλά δεν απεικονίζονται σε αυτό τον χάρτη διότι δε θα ήταν πολύ ευδιάκριτες. Με κόκκινο χρώμα φαίνονται οι διαρρήξεις που προκλήθηκαν από το σεισμικό γεγονός του 1981 και ήταν ορατές τότε και χαρτογραφήσιμες.



Εικόνα 29. Χάρτης που παράχθηκε έπειτα από τη χαρτογράφηση του ρήγματος του Καπαρελλίου. Κίτρινη γραμμή: Το χαρτογραφημένο ρήγμα του Καπαρελλίου, όπως φαίνεται σήμερα. Κόκκινη γραμμή: Οι διαρρήξεις της σεισμικής ακολουθίας του 1981. Μαύρη γραμμή: Άλλα ρήγματα της περιοχής. Πράσινη γραμμή: Πιθανά ρήγματα. Μπλε γραμμή: Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής και ο ποταμός Λιβαδόστρος. Μοβ γραμμή: Η συνέχεια των διαρρήξεων του 1981, σύμφωνα και με μαρτυρίες των κατοίκων της ευρύτερης περιοχής.

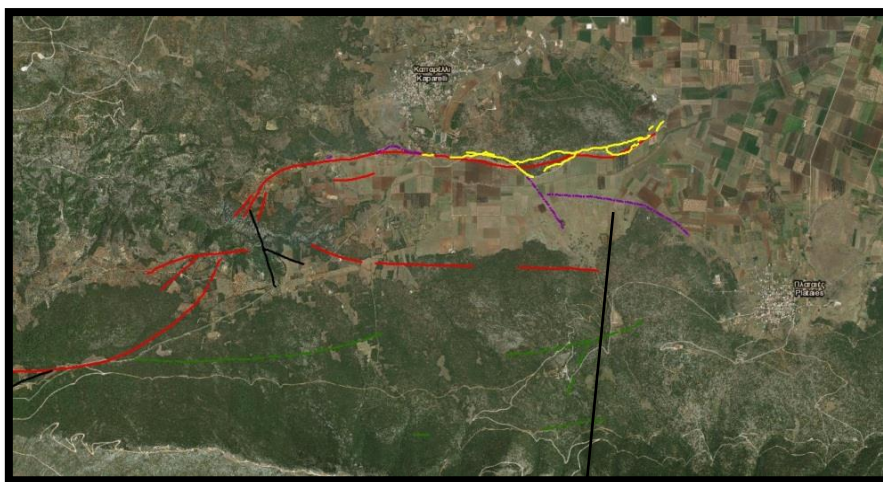
Όπως δείχνει και η εικόνα 30, σε ένα σημείο του Βορείου τμήματος του ρήγματος, φαίνεται η μία πλευρά της επικάλυψης που παρουσιάζει το ρήγμα του Καπαρελλίου σε κάποια σημεία της έκτασής του. Συγκεκριμένα, φαίνεται η κατοπτρική επιφάνεια του ρήγματος να συνεχίζει προς τα δυτικά, ενώ το κροκαλοπαγές έρχεται από μία ΔΝΔ διεύθυνση και προσκρούει πάνω στην επιφάνεια του ρήγματος.



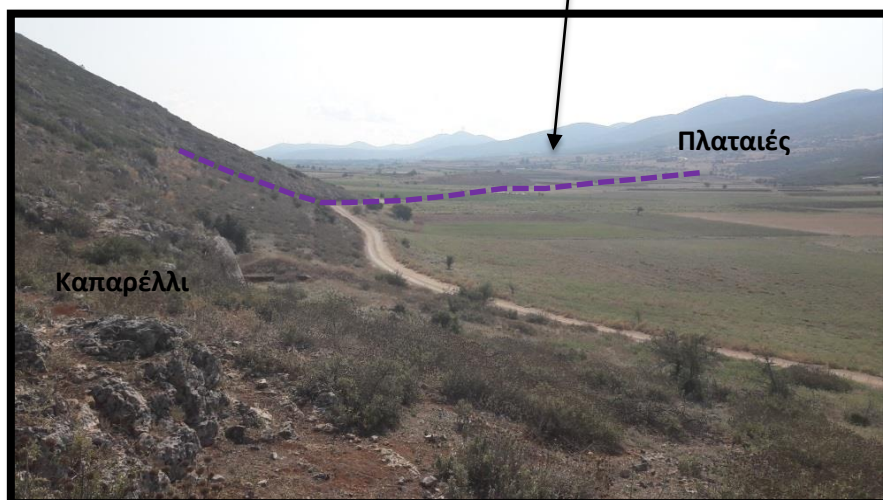
Εικόνα 30. Στην εικόνα αυτή φαίνονται η κατοπτρική επιφάνεια του ρήγματος και το τεκτονικό λατυποπαγές, σε ένα σημείο ένωσης – επικάλυψης. Δεξιά της μαύρης γραμμής διακρίνεται η επιφάνεια του ρήγματος του Καπαρελλίου (κομμάτι του βορείου τμήματος) και αριστερά το κροκαλοπαγές. Η φωτογραφία έχει τραβηχτεί κοιτώντας προς τα ΒΔ.

Στην εικόνα 31, φαίνεται καλύτερα το Βόρειο και πιο σημαντικό τμήμα του ρήγματος του Καπαρελλίου. Εδώ, είναι επίσης πιο εμφανείς και οι επικαλύψεις σε κάποια σημεία της έκτασης του ρήγματος, που εξηγούν το σύνθετο χαρακτήρα του.

Οι μοβ διακεκομμένες γραμμές υποδηλώνουν την πορεία της διάρρηξης (του ρήγματος) κατά την περίοδο του 1981, η οποία σύμφωνα με μαρτυρίες των κατοίκων της ευρύτερης περιοχής “χτύπησε” πρώτα το χωριό του Καπαρελλίου και έπειτα έκανε μία στροφή, περνώντας μέσα από την πεδιάδα ανάμεσα σε Καπαρέλλι – Πλαταιές και προκάλεσε καταστροφές στο χωριό των Πλαταιών (Εικόνα 32). Η διάρρηξη αυτή συνδέεται επίσης και με το ρήγμα των Ερυθρών.



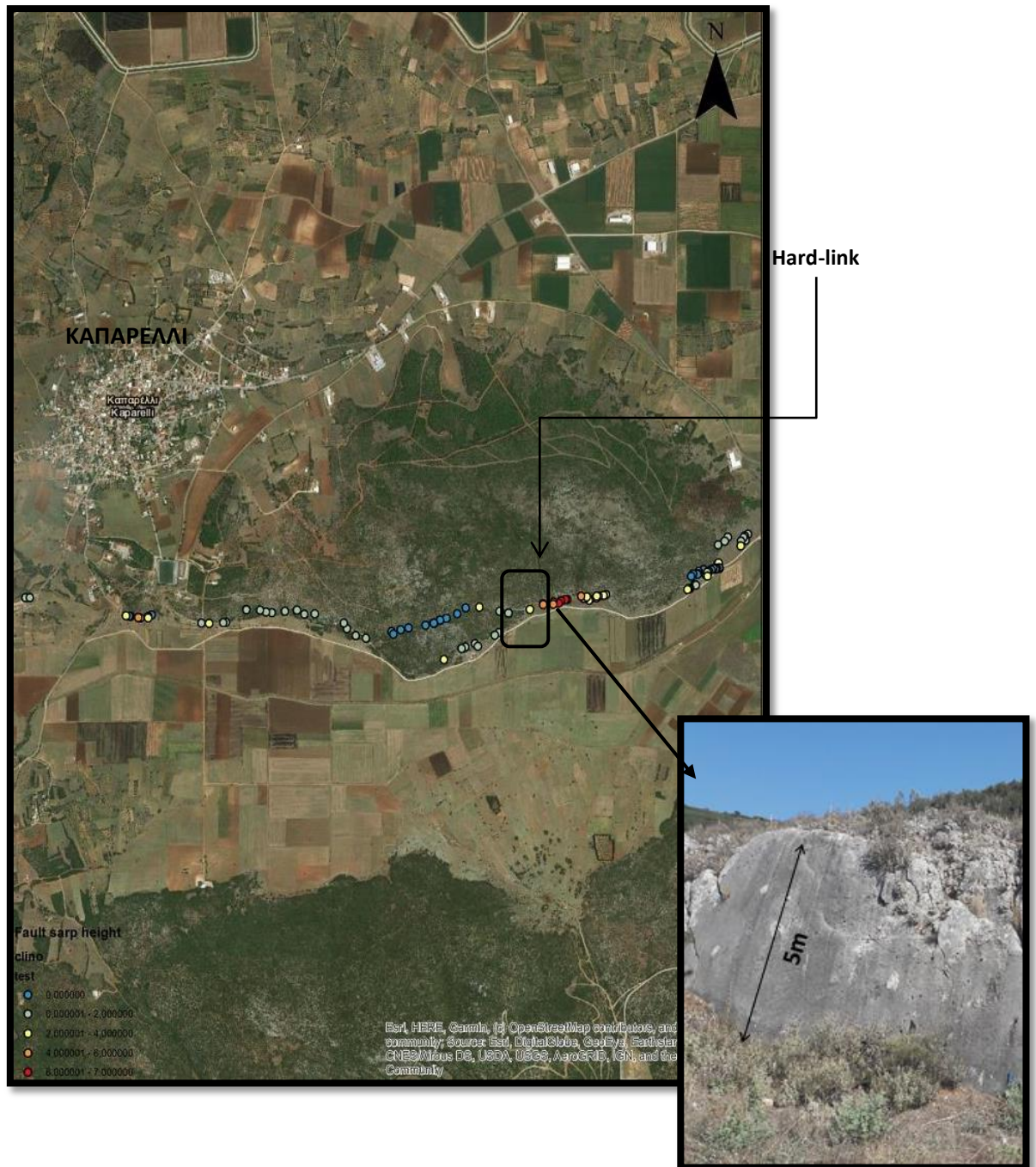
Εικόνα 31. Χάρτης στον οποίο απεικονίζεται το Βόρειο τμήμα του ρήγματος του Καπαρελλίου και οι διαρρήξεις του 1981.



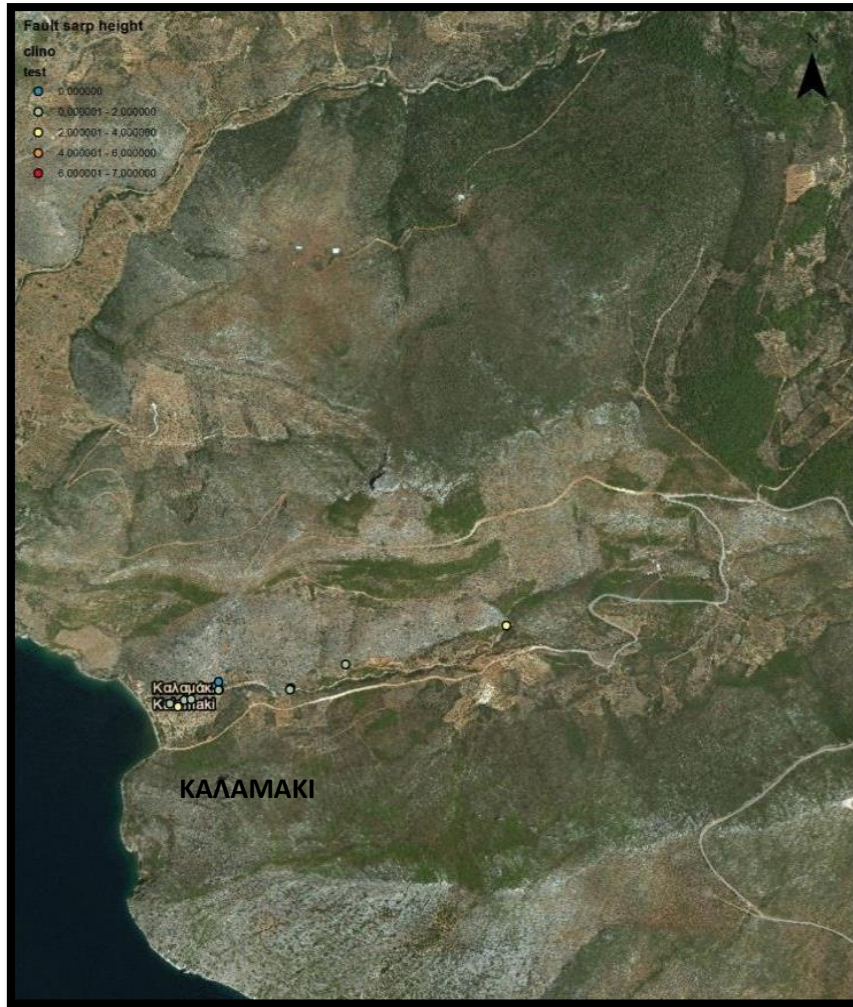
Εικόνα 32. Η "στροφή" της διάρρηξης του 1981 που επηρέασε τον οικισμό των Πλαταιών.

3.3. ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΥΨΟΜΕΤΡΟΥ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ

Η κατοπτρική επιφάνεια του ρήγματος του Καπαρελλίου (Εικόνα 33 και 34) αναπτύσσεται πάνω στο ασβεστολιθικό υπόβαθρο της περιοχής (ασβεστολιθική επιφάνεια ρήγματος). Σε ορισμένα σημεία είναι ορατό και το κροκαλοπαγές της ρηξιγενούς ζώνης του ρήγματος.



Εικόνα 33. Σημειακή αποτύπωση υψομέτρου κατά μήκος της κατοπτρικής επιφάνειας του Βόρειου τμήματος του ρήγματος του Καπαρελλίου. Κάτω δεξιά απεικονίζεται ένα μέρος της κατοπτρικής επιφάνειας του ρήγματος, όπου παρουσιάζεται ένα από τα μέγιστα (κόκκινο χρώμα) ύψη της έως σήμερα. Μπλε→ 0 m, Πράσινο→ 1 - 2 m, Κίτρινο→ 2 - 4 m, Πορτοκαλί→ 4 - 6 m, Κόκκινο→ 6 - 7 m.



Εικόνα 34. Σημειακή αποτύπωση υψομέτρου κατά μήκος της κατοπτρικής επιφάνειας του Νότιου τμήματος του ρήγματος του Καπαρελλίου. Μπλε→ 0 m, Πράσινο→ 1 - 2 m, Κίτρινο→ 2 - 4 m, Πορτοκαλί→ 4 - 6 m, Κόκκινο→ 6 - 7 m.

Επάνω στην κατοπτρική επιφάνεια είναι εμφανείς και οι καμπυλώσεις, καθώς επίσης και γραμμές ολίσθησης. Σε κάποιες θέσεις φαίνεται να υπάρχουν δύο συστήματα γραμμών ολίσθησης (Εικόνα 35), δηλαδή γραμμές κατά κλίση και γραμμές διάφορες της κλίσης της επιφάνειας του ρήγματος, γεγονός που υποδεικνύει τις δύο κινήσεις του ρήγματος, κανονική και πλαγιο-κανονική.



Εικόνα 35. Αριστερά, γραμμές ολίσθησης κατά κλίση. Δεξιά, πλάγιες γραμμές ολίσθησης.

Υπάρχουν περιοχές κατά μήκος του ρήγματος, όπου το πάχος των νεογενών ιζημάτων είναι μεγάλο, εκεί είναι τα σημεία όπου το ρήγμα παρουσιάζει κλιμακωτή διάταξη (en echelon).

Είναι κάποια επικαλυπτόμενα τμήματα, κυρίως στο βόρειο τμήμα του ρήγματος, με το μέγιστο πάχος να εντοπίζεται πάνω από τη θέση όπου έγινε η πρώτη παλαιοσεισμολογική τομή Καρ1, δυτικά του ασφαλτόδρομου Καπαρέλλι – Άγιος Βασίλειος (δυτικά του γηπέδου του Καπαρελλίου). Το πάχος αυτό των νεογενών σχηματισμών, όπως είναι φυσικό, με το πέρασ των χρόνων αυξάνει, για αυτό κάποια μέρη της επιφάνειας του ρήγματος έχουν θαφτεί κάτω από αυτά και δεν βρίσκονται πλέον στην επιφάνεια.

Κοντά στη δυτική απόληψη του Βόρειου τμήματος του ρήγματος του Καπαρελλίου, δίπλα στο δρόμο Καπαρελλίου – Αγίου Βασιλείου, συναντάμε μία μεγάλη εμφάνιση νεογενών αποθέσεων, οι οποίες αποτελούνται κυρίως από λιμναίες και ποταμοχερσαίες αποθέσεις. Οι νεογενείς αποθέσεις φέρουν νεότερες διαρρήξεις που φαίνεται να κόβουν μόνο τα νεογενή αυτά ιζήματα με διεύθυνση περίπου ΒΑ - ΝΔ.



Εικόνα 36. Απεικόνιση των Νεογενών ιζημάτων μεγάλου πάχους, κοντά στον οικισμό του Καπαρελλίου. Εδώ, φαίνονται οι πιο πρόσφατες ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης διαρρήξεις που κόβουν τα ιζήματα.



Εικόνα 37. (Συνέχεια Εικόνας 36) Εδώ βρισκόμαστε στην άλλη πλευρά του υψώματος των Νεογενών ιζημάτων, κοιτώντας προς τα ΝΔ. Μπορούμε να διακρίνουμε κάποιες διαρρήξεις που παρουσιάζουν σχεδόν λιστρικό χαρακτήρα, διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ.

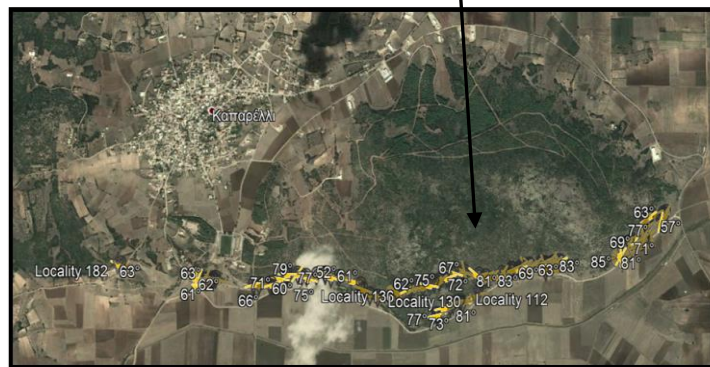
Όπως φαίνεται από τις παραπάνω δύο εικόνες (Εικόνες 36, 37), φαίνεται να υπάρχουν δύο διευθύνσεις κανονικών ρηγμάτων που επηρεάζουν τα Νεογενή ιζήματα. Η πρώτη διεύθυνση που διακρίνουμε είναι ΒΔ-ΝΑ (Εικόνα 36, διακεκομμένη γραμμή) και η δεύτερη είναι ΒΑ-ΝΔ (Εικόνα 36, μαύρες γραμμές). Υπάρχουν κάποιες διαρρήξεις που φαίνεται σε ορισμένες περιπτώσεις να πλησιάζουν τη διεύθυνση του κύριου ρήγματος του Καπαρελλίου. Εξαιτίας της χαοτικής διάταξης και της διαφοράς στο κοκκομετρικό μέγεθος

που παρουσιάζουν τα ιζήματα, δεν ήταν εφικτό να διακριθεί κάποια μετατόπιση εδαφικού ορίζοντα.

Για τη λεπτομερή αποτύπωση του καθρέφτη του ρήγματος συλλέχθηκαν 184 σημεία, ξεκινώντας από το βόρειο τμήμα του ρήγματος και καταλήγοντας στον κόλπο του Καλαμακίου, όπου και τελειώνει η επιφανειακή έκφρασή του πριν βυθιστεί στον κόλπο. Όπως ήταν αναμενόμενο, η πληθώρα των σημείων παρουσιάζεται στο Βόρειο τμήμα του ρήγματος (Εικόνα 38, πάνω δεξιά), ενώ το Νότιο τμήμα (Εικόνα 38, κάτω αριστερά) δεν προσέφερε πολλά σημεία για τη συλλογή δεδομένων της επιφάνειας του ρήγματος, παρ'όλα αυτά ήταν αρκετά για να υποδείξουν τη διεύθυνση, την πορεία και την κατάληξη του ρήγματος στον κόλπο του Καλαμακίου.



Εικόνα 38. Το σύνολο των μετρήσεων κατά μήκος της επιφάνειας του ρήγματος του Καπαρελλίου.



Βόρειο Τμήμα



Νότιο Τμήμα

Στο Καλαμάκι, στο νότιο τμήμα του ρήγματος, υπάρχουν δύο αντιθετικές επιφάνειες ρηγματών. Η μία είναι η επιφάνεια του ρήγματος του Καπαρελλίου που δημιουργήθηκε το 1981 και βρίσκεται βόρεια της παλαιάς κοίτης του ποταμού (ή του φαραγγιού που διευρύνθηκε περισσότερο κατά τη διάρκεια των σεισμικών δονήσεων του 1981) που κατέληγε στο Καλαμάκι και κλίνει προς το νότο και φαίνεται να κατεβάζει την περιοχή από την πλευρά βόρεια του φαραγγιού (Εικόνα 39, α), ενώ η άλλη ρηξιγενής επιφάνεια βρίσκεται ακριβώς απέναντι της πρώτης και είναι εκφρασμένη στην επιφάνεια καλύτερα κοντά στην παραλία του Καλαμακίου, κλίνει προς το βορρά και φαίνεται να ανεβάζει την περιοχή από την πλευρά νότια του φαραγγιού (πλευρά προς τον Κιθαιρώνα) (Εικόνα 39, β).



Εικόνα 39. Το Νότιο τμήμα του ρήγματος του Καπαρελλίου. Με τη κόκκινη γραμμή παρουσιάζεται η χαρτογραφημένη πορεία της διάρρηξης του ρήγματος κατά την περίοδο 1981, ενώ με κίτρινο αποτυπώνεται η επιφάνεια του ρήγματος εκεί που βρίσκεται σήμερα. Οι κίτρινες γραμμές που βρίσκονται στη πλευρά “α”, αποτελούν το ίχνος του ρήγματος του Καπαρελλίου, δηλαδή το Νότιο τμήμα του ρήγματος, ενώ η κίτρινη γραμμή που βρίσκεται στην πλευρά “β”, αντιπροσωπεύει το ίχνος ενός αντιθετικού ρήγματος που κλίνει προς βορρά, αντίθετα δηλαδή από ότι κλίνει το ρήγμα του Καπαρελλίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ

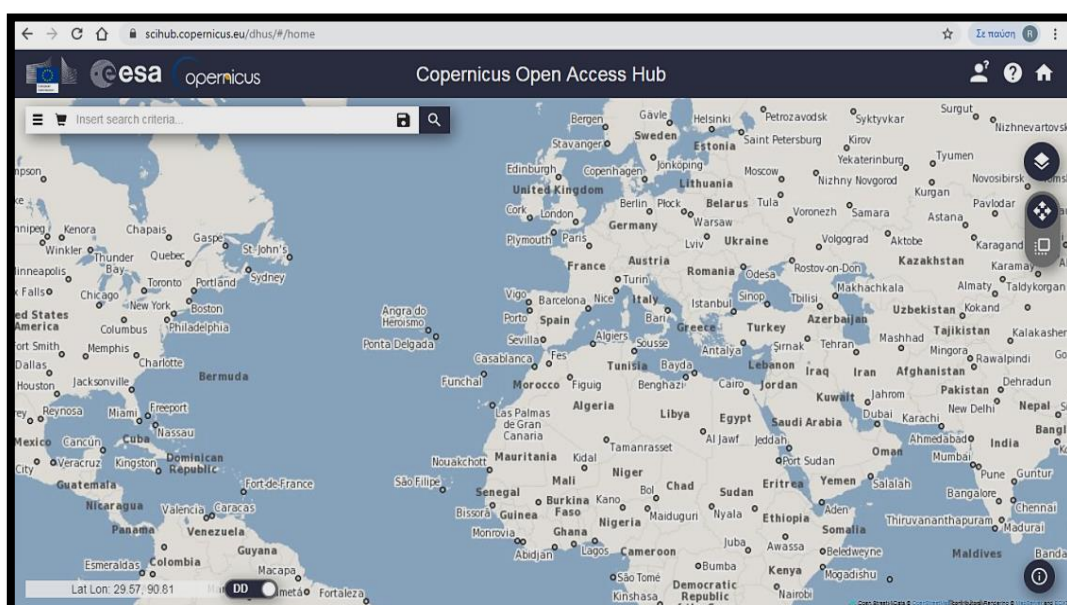
Η Συμβολομετρία αποτελεί ένα επιστημονικό κλάδο της Τηλεπισκόπησης, ο οποίος χρησιμοποιείται αρκετά, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, για την ακριβέστερη αποτύπωση του υψομέτρου μιας περιοχής (παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους (Ψ.Μ.Ε.)), καθώς και των επιφανειακών παραμορφώσεων.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου της Συμβολομετρίας είναι το χαμηλό κόστος εφαρμογής της, καθώς δεν είναι απαραίτητη η πρόσβαση και η εγκατάσταση ειδικού εξοπλισμού στην περιοχή μελέτης. Η χρήση της μικροκυματικής ακτινοβολίας δίνει την δυνατότητα διερεύνησης των παραμορφώσεων του εδάφους και παραγωγής χαρτών.

4.1. ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COPERNICUS

Το πρόγραμμα Copernicus αποτελεί ένα ευρωπαϊκό πρόγραμμα, για το οποίο συνεργάζονται η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (επικεφαλής), η οποία είναι υπεύθυνη για τη συνολική πρωτοβουλία, τον καθορισμό των απαιτήσεων και τη διαχείριση των υπηρεσιών, με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος, ο οποίος συντονίζει τη διαχείριση των δεδομένων για πάνω από 30 δορυφόρους. Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (Ε.Ο.Δ. - ESA) έχει βάλει σε τροχιά μια νέα οικογένεια δορυφόρων που ονομάζεται Sentinel, ειδικά για τις επιχειρησιακές ανάγκες του προγράμματος Copernicus.

Οι δορυφόροι παρέχουν ένα μοναδικό σύνολο των παρατηρήσεων, αρχικά εικόνες ραντάρ παντός καιρού, μέρα και νύχτα από τον Sentinel-1A (σε τροχιά από τις 3 Απριλίου 2014). Ο Sentinel-2 θα παρέχει υψηλής ανάλυσης οπτικές εικόνες, και ο Sentinel-3 θα παρέχει στοιχεία για τις υπηρεσίες που σχετίζονται με τη θάλασσα και τη γη. Ο Sentinel-4 και ο Sentinel-5 θα παρέχουν στοιχεία για την παρακολούθηση της σύνθεσης της ατμόσφαιρας από γεωστατική και πολική τροχιά, αντίστοιχα. Ο Sentinel-6 θα φέρει όργανα για τη μέτρηση του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας σε παγκόσμια κλίμακα, κυρίως για ζητήματα επιχειρησιακής ωκεανογραφίας και για τη μελέτη της κλιματικής αλλαγής. Τα δεδομένα και οι υπηρεσίες του Copernicus είναι διαθέσιμα σε μια πλήρη, ανοικτή και ελεύθερη βάση για τους χρήστες (Εικόνα 40), συμπεριλαμβανομένων των θεσμικών οργάνων της ΕΕ, των αρχών των κρατών μελών, του ιδιωτικού τομέα για την ανάπτυξη των εμπορικών εφαρμογών και υπηρεσιών, τους διεθνείς εταίρους, την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα και τους ενδιαφερόμενους πολίτες. Τα δεδομένα Sentinel-1 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές Συμβολομετρίας SAR. Η λήψη δεδομένων μπορεί να γίνει διαμέσου του κόμβου δεδομένων της ESA.



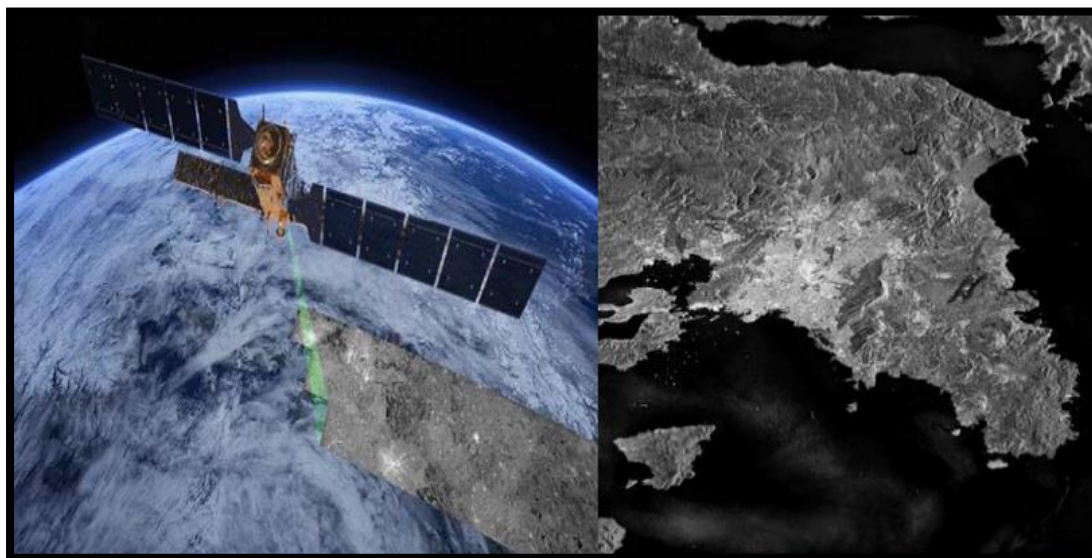
Εικόνα 40. Το περιβάλλον εργασίας του Copernicus.

Με το πρόγραμμα αυτό, η Ευρωπαϊκή Ένωση στοχεύει στην παρακολούθηση και παρατήρηση της Γης. Έχει σχεδιαστεί για να παρέχει ακριβείς, έγκαιρες και εύκολα προσβάσιμες πληροφορίες για τη βελτίωση της διαχείρισης του περιβάλλοντος, την κατανόηση και τον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και τη διασφάλιση της ασφάλειας των πολιτών.

4.2. Ο ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ SENTINEL 1

Ο Sentinel-1 είναι εξοπλισμένος με ένα προηγμένο όργανο ραντάρ που επιτρέπει τη λήψη εικόνων της επιφάνειας της Γης (Εικόνα 41). Έχει το πλεονέκτημα να λειτουργεί σε μήκη κύματος που δεν επηρεάζονται από νέφωση ή έλλειψη φωτισμού και μπορεί να αποκτήσει τα δεδομένα σε μια περιοχή κατά τη διάρκεια της ημέρας ή της νύχτας, κάτω από όλες τις καιρικές συνθήκες (χιόνι, βροχή, νεφοκάλυψη, πάγο, βλάστηση, κ.ά.). Το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR - synthetic aperture radar) στη μικροκυματική ζώνη C - Band λειτουργεί στην κεντρική συχνότητα των 5.405 GHz, με τέσσερις αποκλειστικές λειτουργίες απεικόνισης διαφορετικής ανάλυσης τουλάχιστον 15m και κάλυψη έως 400km. Περιλαμβάνει μια δεξιάς κατεύθυνσης ενεργή κεραία διάταξης φάσης που παρέχει γρήγορη σάρωση σε υψόμετρο και αζιμούθιο και χωρητικότητα αποθήκευσης δεδομένων 1.410GB.

Πρόκειται για αστερισμό δύο δορυφόρων Sentinel-1A και 1B σε τροχιά που έχουν απόσταση 180° και καλύπτουν ολόκληρη τη Γη κάθε έξι ημέρες. Ο Sentinel-1A, εκτοξεύθηκε στις 3/4/2014 και ο Sentinel-1B, στις 25/4/2016 (Geudtner et al., 2014). Ο Sentinel-1 φέρει ένα λέιζερ για την μετάδοση των δεδομένων στον γεωστατικό ευρωπαϊκό σύστημα αναμετάδοσης δεδομένων για συνεχή παροχή δεδομένων. Αποτελεί ένα δορυφόρο, ηλιοσύγχρονο, πολικής τροχιάς με υψόμετρο 693km, από την επιφάνεια της γης.



Εικόνα 41. Αριστερά Δορυφόρος Sentinel 1. Δεξιά εικόνα ραντάρ Sentinel-1 που απεικονίζει την περιοχή της Αττικής και τον Σαρωνικό κόλπο. Πηγή : ESA.

Ο σκοπός της αποστολής είναι η παρακολούθηση των εδαφών και των ωκεανών. Ο Sentinel-1, προσφέρει μία πληθώρα εφαρμογών στους ερευνητές οι οποίες είναι (ESA, 2013):

- Παρακολούθηση των πάγων
- Παρακολούθηση πλοίων
- Παρακολούθηση ρυπάνσεων από πετρελαιοκηλίδες
- Παρακολούθηση ανέμων και ωκεανών
- Βιώσιμη διαχείριση δασών
- Ταξινόμηση τυπολογίας δασών
- Εκτίμηση βιομάζας
- Χαρτογράφηση καταστροφών από πυρκαγιές
- Παρακολούθηση κατάστασης καλλιεργειών στον αγροτικό χώρο
- Ταξινόμηση τύπου καλλιεργειών
- Παρακολούθηση των εδαφών
- Παρακολούθηση πλημμύρων
- Ανάλυση σεισμών
- Παρακολούθηση αστικού χώρου
- Παρακολούθηση επιφανειακών εφαιδικών παραμορφώσεων
- Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους

4.3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΡΑΝΤΑΡ

Η συμβολομετρία Ραντάρ προσφέρει δεδομένα που προκύπτουν από τη λήψη απεικονίσεων μιας περιοχής, σε διαφορετικό χρόνο, από ελαφρώς διαφορετική θέση. Υπάρχουν δύο μέθοδοι:

- 1) Συμβολομετρία InSAR: Η τεχνική αυτή προσφέρει πληροφορίες, οι οποίες εξάγονται από την τοπογραφία της Γης και παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας υψηλής ποιότητας Ψηφιακού Υψομετρικού Μοντέλου (DEM).
- 2) Διαφορική Συμβολομετρία DInSAR: Με αυτή τη μέθοδο είναι δυνατή η ανάλυση της παραμόρφωσης στην επιφάνεια της γης, εστιάζοντας στην διαφορά φάσης ($\Delta\phi$) μεταξύ των εικόνων συνθετικού ανοίγματος. Η διαφορά φάσης μας προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες όσον αφορά τη γεωμετρία των εικόνων. Σε περιπτώσεις μικρομετακινήσεων και παραμορφώσεων της γήινης επιφάνειας, η διαφορική συμβολομετρία μας δίνει την δυνατότητα να αφαιρέσουμε την τοπογραφία, ώστε το τελικό προϊόν να απομονώνει την φάση και να αποδίδει τυχόν μετακινήσεις και παραμορφώσεις.

Στην επόμενη ενότητα (Ενότητα 4.4), θα αναφερθούμε περαιτέρω στη μέθοδο της Διαφορικής Συμβολομετρίας (DInSAR), η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων και κατ' επέκταση για την παρακολούθηση εδαφικών παραμορφώσεων στην περιοχή μελέτης.

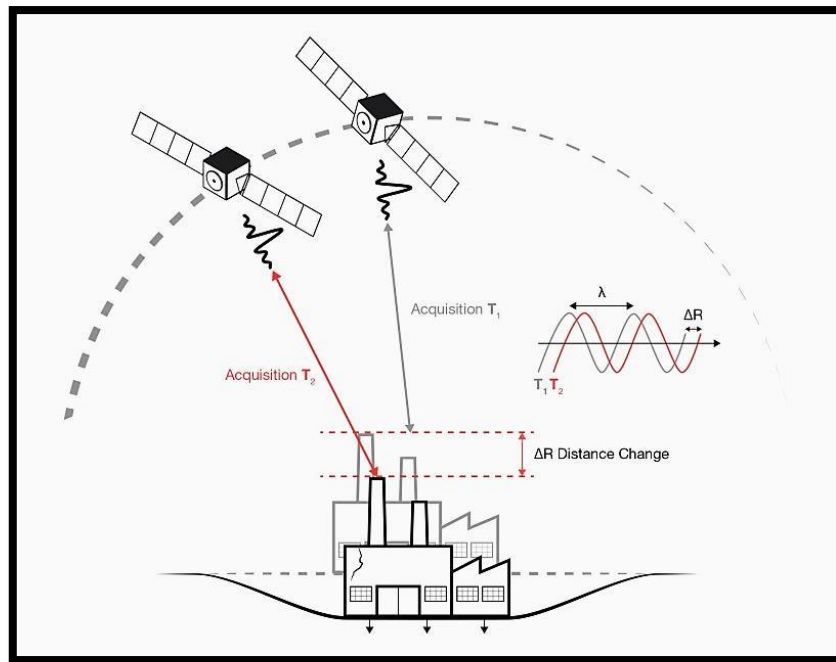
4.4. ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ (Differential Interferometry - DInSAR)

Η τεχνική της Διαφορικής Συμβολομετρίας αποτελεί ουσιαστικά μία επέκταση της βασικής Συμβολομετρίας. Η μέθοδος αυτή της διαφορικής επεξεργασίας του σήματος των δορυφόρων Ραντάρ μας δίνει τη δυνατότητα να παρακολουθούμε επιφανειακές εδαφικές μετατοπίσεις, παραμορφώσεις δηλαδή στην επιφάνεια της γης.

Η βασική ιδέα είναι η αφαίρεση του στοιχείου της τοπογραφίας από την παρατηρούμενη συμβολομετρική φάση, οπότε απομονώνεται η φάση που σχετίζεται με διαφορικές κινήσεις που παρατηρήθηκαν κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο λήψεων. Η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο διαφορετικών λήψεων, μπορεί να υπολογιστεί και να ερμηνευθεί σαν την εδαφική υποχώρηση σε κλίμακα εκατοστού.

Η φάση (δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται ώστε το σήμα να ταξιδέψει από τον δορυφόρο στην γήινη επιφάνεια και να επιστρέψει στον δορυφόρο) του ανακλώμενου σήματος Ραντάρ από δύο ή περισσότερες εικόνες της ίδιας περιοχής επεξεργάζεται, ώστε να ανιχνευθούν εδαφικές κινήσεις. Η φάση αλλάζει όταν η απόσταση “δορυφόρος – έδαφος” μεταβληθεί λόγω φυσικών ή ανθρωπογενών αιτίων.

Η Διαφορική Συμβολομετρία μας επιτρέπει να δημιουργήσουμε χάρτες παραμόρφωσης σε κλίμακα εκατοστού. Ένας αποτελεσματικός τρόπος καταγραφής και παρακολούθησης φαινομένων εδαφικών παραμορφώσεων είναι μέσω της δημιουργίας χρονοσειρών (time series) (De Luca et al., 2016). Η δημιουργία χρονοσειρών είναι σημαντική διότι, η καταγραφή παραμορφώσεων για ένα μικρό χρονικό διάστημα (π.χ. ένα μήνα), μπορεί να μην περιέχει κάποια σημαντική πληροφορία, εάν για παράδειγμα δεν έχει συμβεί κάποιο ακραίο φυσικό φαινόμενο, όπως ένας μεγάλος σεισμός. Η καταγραφή όμως των παραμορφώσεων κάθε μήνα και ο συνδυασμός τους για την δημιουργία μιας χρονοσειράς ενός έτους, μπορεί να μας δώσει πολύ σημαντικές πληροφορίες για μία συγκεκριμένη περιοχή στην οποία πραγματοποιείται μία μελέτη. Για παράδειγμα, μια μελέτη σε αστική περιοχή μπορεί να μας προσφέρει πληροφορίες για εδαφικές υποχωρήσεις σε κτήρια ή έργα υποδομής. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να αποτελέσουν ένα μέτρο πρόληψης για μελλοντικές κατασκευές και μπορούν να εξοικονομήσουν στους κατασκευαστές χρόνο και χρήμα.



Εικόνα 42. Απεικόνιση λειτουργίας διαφορικής συμβολομετρίας.

Η παραπάνω εικόνα (Εικόνα 42) απεικονίζει τη λειτουργία της Διαφορικής Συμβολομετρίας. Δηλαδή, απεικονίζεται ένας στόχος στην επιφάνεια του εδάφους που έχει υποστεί εδαφική υποχώρηση.

Η μέθοδος της Διαφορικής Συμβολομετρίας χαρακτηρίζεται από κάποιους βασικούς περιορισμούς, οι οποίοι κάνουν ακόμα πιο κατανοητή την αναγκαιότητα ανάπτυξης αυτής της μεθόδου, καθώς οι περιορισμοί αυτοί αναιρούνται μέσω της διαδικασίας της Διαφορικής Συμβολομετρίας. Οι περιορισμοί αυτοί είναι:

- Η γεωμετρική αποσυσχέτιση, λόγω χρήσης συμβολογραφημάτων με μεγάλη βασική κάθετη γραμμή.
- Η απώλεια συνοχής μεταξύ των εικόνων, λόγω της χρονικής αποσυσχέτισης μεταξύ των λήψεων.
- Οι ενδεχόμενες δυσκολίες στο «ξετύλιγμα» (unwrapping) φάσης των συμβολογραφημάτων, λόγω χρήσης μεγάλων βασικών κάθετων γραμμών.
- Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις (υδρατμοί [κυρίως στην τροπόσφαιρα και δευτερευόντως στην ιονόσφαιρα], πυκνότητα των ιονοσφαιρικών ηλεκτρονίων).

Η εφαρμογή της τεχνικής της Διαφορικής Συμβολομετρίας χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος, για αυτό μπορεί και χρησιμοποιείται σε έναν μεγάλο αριθμό επιστημονικών αντικειμένων. Ήδη, από το 1992, η συμβατική Διαφορική Συμβολομετρία χρησιμοποιείται για την μελέτη και την κατανόηση συγκεκριμένων φυσικών φαινομένων - διεργασιών που προκαλούν εδαφική παραμόρφωση, όπως σεισμοί, ηφαίστεια, κατολισθήσεις και καθιζήσεις, με άμεσες οικονομικές, περιβαλλοντικές και ανθρώπινες επιπτώσεις (Massonnet et al., 1993, Zebker et al., 1994, Fielding et al., 1998, Galloway et al., 1998, Write

& Stow 1999, Carnec & Fabriol 1999, Avallone et al., 1999, Carnec & Delacourt., 2000, Strozzi et al., 2001).

4.5. ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΩΝ Ή ΟΠΙΣΘΟΣΚΕΔΑΣΤΩΝ (PERSISTENT SCATTERER INTERFEROMETRY – PSI)

Η μέθοδος PSI αναπτύχθηκε για πρώτη φορά το 2000 από μια ερευνητική ομάδα στο Πολυτεχνείο του Μιλάνο, με σκοπό να ξεπεραστούν οι περιορισμοί που χαρακτηρίζουν την διαφορική συμβολομετρία και να αυξηθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, να ξεπεραστούν δηλαδή οι περιορισμοί της χρονικής και χωρικής αποσυσχέτισης της συμβολομετρίας Radar (InSAR).

Υπάρχουν κάποιοι “στόχοι” στη γήινη επιφάνεια, οι οποίοι ανακλούν μεγάλα και σταθερά στον χρόνο ποσά ενέργειας πίσω στον αισθητήρα του δορυφόρου. Αυτοί οι “στόχοι”, ονομάζονται και ανακλαστές ή ανακλαστήρες (scatterers), και είναι σταθεροί (permanent or persistent scatterers). Ως σταθεροί ανακλαστήρες θεωρούνται κτίρια, γέφυρες, φράγματα, υδάτινοι αγωγοί, κεραιές ή άλλες αντίστοιχες ανθρώπινες κατασκευές, μεταλλικά αντικείμενα, βραχώδεις περιοχές (πετρώματα, φυσικοί ανακλαστήρες). Μπορούμε, λοιπόν, να πούμε ότι οι σταθεροί ανακλαστήρες συνθέτουν ένα «φυσικό γεωδαιτικό δίκτυο» με σκοπό την παρατήρηση της παραμόρφωσης της γήινης επιφάνειας με ακρίβεια χιλιοστού (αφορά κυρίως στη γραμμική παραμόρφωση αλλά όχι μόνο), καθώς επίσης και της σταθερότητας των μεμονωμένων κατασκευών.

Η τεχνική PSI βασιζόμενη στα πλεονεκτήματα της σταθερής στο χρόνο ανάκλασης, έχει την δυνατότητα της ανίχνευσης πολυάριθμων στόχων σταθερής ανάκλασης, με αποτέλεσμα να είναι σε θέση να εξαγει πολύ ακριβείς πληροφορίες όσον αφορά τις εδαφικές παραμορφώσεις. Μπορούν να παρατηρηθούν μετακινήσεις μικρότερες των 28mm, όμως επειδή η τεχνική αυτή αντιμετωπίζει επιτυχώς προβλήματα που προκύπτουν από τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις, μπορούν, σε εξαιρετικές περιπτώσεις, να παρατηρηθούν μετατοπίσεις έως και 1mm ετησίως. Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις αποτελούν τον σημαντικότερο, ίσως, περιοριστικό παράγοντα στην αναγνώριση μικρότερης κλίμακας μετακινήσεων βάσει των τεχνικών της συμβατικής Διαφορικής Συμβολομετρίας Ραντάρ.

Τα τελευταία χρόνια προκειμένου να ξεπεραστούν οι ατμοσφαιρικοί, κυρίως, περιορισμοί έχουν αναπτυχθεί πιο εξελιγμένες τεχνικές επεξεργασίας των δεδομένων SAR. Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό κινήσεων της τάξης των μερικών χιλιοστών σε μεμονωμένα εδαφικά ή δομικά σημεία και για εκτεταμένες περιοχές, που καλύπτουν κυρίως αστικά ή ημιαστικά περιβάλλοντα. Λόγω ακριβώς της φύσης των συγκεκριμένων τεχνικών, όπου η ανάλυση λαμβάνει χώρα αποκλειστικά σε συγκεκριμένα σημεία των οποίων τα χαρακτηριστικά ανάκλασης του σήματος Ραντάρ παραμένουν σταθερά, καλούνται τεχνικές σταθερών ανακλαστήρων.

Η τεχνική χρησιμοποιεί ένα πλούσιο αρχείο δορυφορικών εικόνων Ραντάρ, με σκοπό να αναγνωρίσει δίκτυα από επιφανειακά χαρακτηριστικά τα οποία ανακλούν σταθερά το σήμα του Ραντάρ, όπως για παράδειγμα κτίρια, μεταλλικές κατασκευές κλπ. Για τα παραπάνω

σημεία-στόχους (ανακλαστήρες) πραγματοποιούνται ακριβείς υπολογισμοί των μικρο-μετακινήσεων, σε επίπεδο μικρότερου του χιλιοστού, για την περίοδο που καλύπτουν οι εικόνες Ραντάρ. Ο ακριβής εντοπισμός των σταθερών αυτών ανακλαστήρων δεν μπορεί να προβλεφθεί πριν την επεξεργασία αλλά γενικά πάνω από αστικές περιοχές η πυκνότητά τους κυμαίνεται μεταξύ 200-600 σημείων ανά km².

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της τεχνικής των σταθερών ανακλαστήρων είναι η δυνατότητα εξαγωγής χαρτών ταχύτητας της ετήσιας εδαφικής μετατόπισης για ένα διάστημα που μπορεί να φτάσει έως και τα 25 χρόνια.

4.6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΩΝ

Η πιθανότητα επιτυχίας της εφαρμογής της τεχνικής των σταθερών ανακλαστήρων εξαρτάται από : 1) τον αριθμό των εικόνων Radar και τη χρονική διασπορά τους, 2) την πυκνότητα των σταθερών ανακλαστήρων στην εκάστοτε περιοχή μελέτης, 3) την κίνηση των ανακλαστήρων πάντα προς τη διεύθυνση του δορυφόρου (LOS) και 4) την κάλυψη ή μη της περιοχής από χιόνι.

Η τεχνική των σταθερών ανακλαστήρων μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις παραμόρφωσης της εδαφικής επιφάνειας, που προκαλείται από (Ferretti et al., 2006):

1. Την καθίζηση εδάφους: Η χρονική και η χωρική διακριτική ικανότητα των δεδομένων Radar καθιστά δυνατή την παρατήρηση της καθίζησης σε αστικές περιοχές. Η πυκνότητα των ανακλαστήρων είναι συνήθως μεγαλύτερη από 100 ανακλαστήρες ανά km² και χιλιάδες km² μπορούν να παρατηρηθούν σε μηνιαία βάση (Ferretti et al., 2000). Ακόμα, μπορεί να ανιχνευτεί η παραμόρφωση σε περιαστικές περιοχές ή και γενικά μεμονωμένες κατασκευές (κτίρια, κ.ά.). Τα δεδομένα που συλλέγονται χρησιμοποιούνται από εταιρείες των τομέων πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η παραμόρφωση που προκύπτει από δραστηριότητες σε περιοχές ορυχείων μπορεί να ανιχνευτεί με την τεχνική PS (Colesanti, Le Mouelic & Bennani et al., 2005).
2. Τη δράση ρηγμάτων και ηφαιστειών: Προκειμένου να παρατηρηθούν τα ρήγματα σε μία περιοχή απαιτούνται μετρήσεις πολύ μεγάλης ακρίβειας, επειδή η μετακίνηση του εδάφους μπορεί να είναι εξαιρετικά αργή (Massonnet & Feigl, 1998). Όσο καλύτερη είναι η ακρίβεια τόσο καλύτερη θα είναι η εκτίμηση ενός σεισμικού κινδύνου. Τα δεδομένα PS παίζουν σημαντικό ρόλο κυρίως για δύο λόγους. Η πυκνότητα των ανακλαστήρων είναι μεγαλύτερη από εκείνη των σταθμών GPS και η ακρίβεια των μετρήσεων στην κατακόρυφη διεύθυνση είναι μεγαλύτερη από εκείνη των GPS.
3. Κατολισθήσεις: Περιοχές που χαρακτηρίζονται από αστάθεια πρανών και κατολισθήσεις μπορούν να παρακολουθηθούν εάν συνδυάσουμε μετρήσεις που πραγματοποιούνται με την τεχνική των σταθερών ανακλαστήρων με πληροφορίες σχετικά με τον μηχανισμό μετακίνησης, που έχουν προέλθει από in situ δεδομένα

(Colesanti et al., 2003, Colesanti & Wasowski, 2006, Farina et al., 2006, Hilley et al., 2004, Ferretti et al., 2005).

4. Μεμονωμένες κατασκευές και κτίρια: Προκειμένου να λάβουμε πληροφορίες και να εκτιμήσουμε τη σταθερότητα κατασκευών, θα πρέπει οι μετρήσεις των κινήσεων της γήινης επιφάνειας να έχουν ακρίβεια χιλιοστού. Με την τεχνική των PS είναι δυνατό περισσότεροι από ένας ανακλαστήρες να βρίσκονται σε ένα μόνο κτίριο. Πιθανή φαίνεται να είναι η δημιουργία ενός γεωδαιτικού δικτύου που θα αποτελείται από κτίρια, πάνω στα οποία θα έχουν τοποθετηθεί τεχνητοί ανακλαστήρες. Τα αποτελέσματα των PS έχουν χρησιμοποιηθεί και ως αποδεικτικό στοιχείο σε δίκες.
5. Τον σχεδιασμό χρήσεων γης: Η τεχνική των PS διευκολύνει τη σχεδίαση κύριων κατασκευαστικών έργων, όπως οι αυτοκινητόδρομοι και οι γραμμές τρένου, προσδιορίζοντας σταθερούς διαδρόμους για τις εγκαταστάσεις αυτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ως μέθοδος εξήγησης γεωλογικών φαινομένων, η Συμβολομετρία έχει χρησιμοποιηθεί από νωρίς από την επιστημονική κοινότητα, όπως για παράδειγμα για τις επιδράσεις σεισμικών φαινομένων και την κατανομή της ενέργειάς τους, για κοιτασματολογικές έρευνες, για την παρατήρηση δραστηριότητας ηφαιστειών, ακόμη και στη μελέτη του φαινομένου της ερημοποίησης. Γενικά, βρίσκει χρήση ως μέθοδος παρατήρησης οποιασδήποτε επιφανειακής, εδαφικής μετατόπισης.

Στην παρούσα εργασία, η Συμβολομετρία έχει χρησιμοποιηθεί για αυτό ακριβώς το σκοπό, δηλαδή για την παρατήρηση εδαφικών μετατοπίσεων και παραμορφώσεων της επιφάνειας του εδάφους, που οφείλονται κυρίως στο ρήγμα του Καπαρελλίου και στη γεωδυναμική (μετασεισμικά) του σεισμού του 1981, που επηρέασαν την ευρύτερη περιοχή.

Το κομμάτι της Συμβολομετρίας, όπως φαίνεται και στις παρακάτω ενότητες, βασίστηκε, κυρίως, στην επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων, από τον Sentinel 1 A& B, που αποκτήθηκαν από τη βάση δεδομένων Copernicus (Copernicus Open Access Hub, <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), μέσω του εξειδικευμένου λογισμικού SARPROZ.

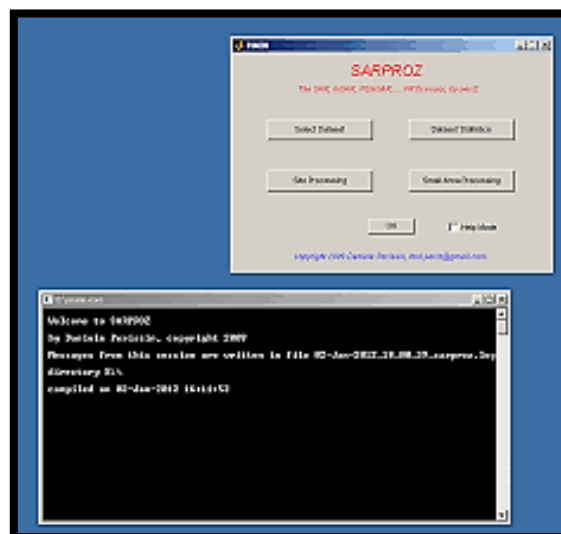
5.1. ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΚΑΙ Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το SARPROZ είναι ένα πολύ ισχυρό και ευέλικτο λογισμικό που υλοποιεί ένα ευρύ φάσμα τεχνικών επεξεργασίας InSAR με σύνθετο άνοιγμα (SAR), τεχνικές Συμβολομετρίας SAR (InSAR) και πολλαπλών χρονικών διαστημάτων.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του προγράμματος SARPROZ (Εικόνα 43) είναι τα εξής:

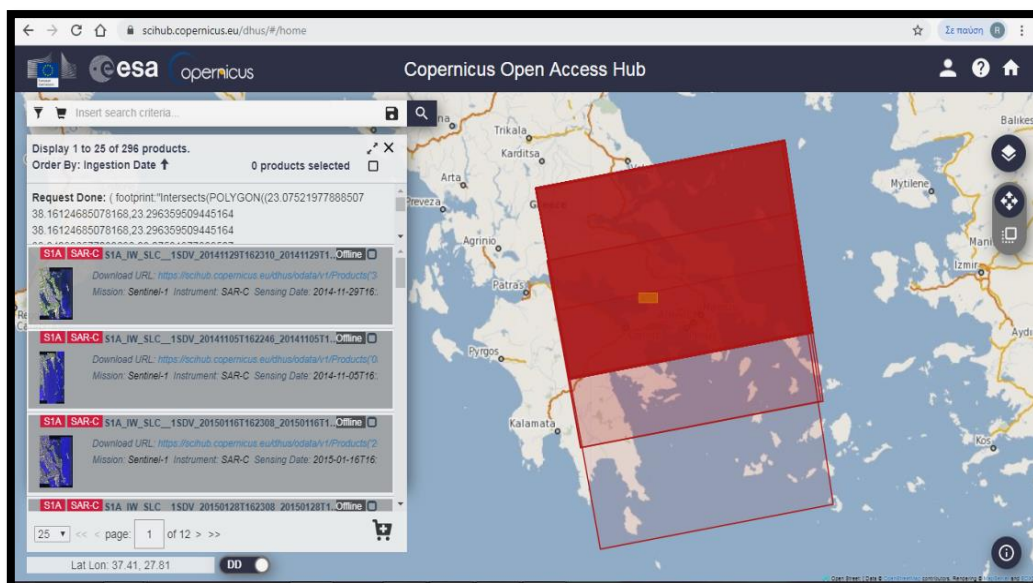
- Εύχρηστο Graphic Interface: δεν απαιτούνται γνώσεις κωδικοποίησης για τυποποιημένες χρήσεις.
- Βασίζεται στη Matlab: οι προηγμένοι (πιο έμπειροι) χρήστες μπορούν πολύ εύκολα να αναπτύξουν τις δικές τους επεκτάσεις λογισμικού.
- Μπορεί να καταρτιστεί και να λειτουργεί ανεξάρτητα από τη Matlab σε οποιαδήποτε πλατφόρμα (Unix, PC, Mac).
- Πλήρως parallelized (παράλληλη): Το SARPROZ μπορεί να τρέχει σε πολλαπλούς πυρήνες CPU ή συστοιχίες υπολογιστών αυτόματα.
- Οι περισσότεροι δορυφόροι / μορφές δεδομένων υποστηρίζονται, συμπεριλαμβανομένων των δεδομένων Sentinel 1.
- Μπορεί να εκτελεστεί σε αυτόματη μορφή (automatic mode) από τη γραμμή εντολών χωρίς Graphic Interface.

Το SARPROZ αποτελεί μία μέθοδο, η οποία επιτρέπει τη διερεύνηση δεδομένων SAR/InSAR και για λεπτομερή παρακολούθηση της υποδομών. Εφαρμόστηκε και στη συγκεκριμένη εργασία για την αναγνώριση σταθερών ανακλαστήρων στην επιφάνεια του εδάφους μέσω της χρήσης δορυφορικών εικόνων, προκειμένου να παρατηρηθεί οποιαδήποτε εδαφική μετατόπιση και να υπολογιστεί η παραμόρφωση που προκαλείται στους οικισμούς και γενικά στην ευρύτερη περιοχή από τη γεωδυναμική και την ενεργό τεκτονική δραστηριότητα.



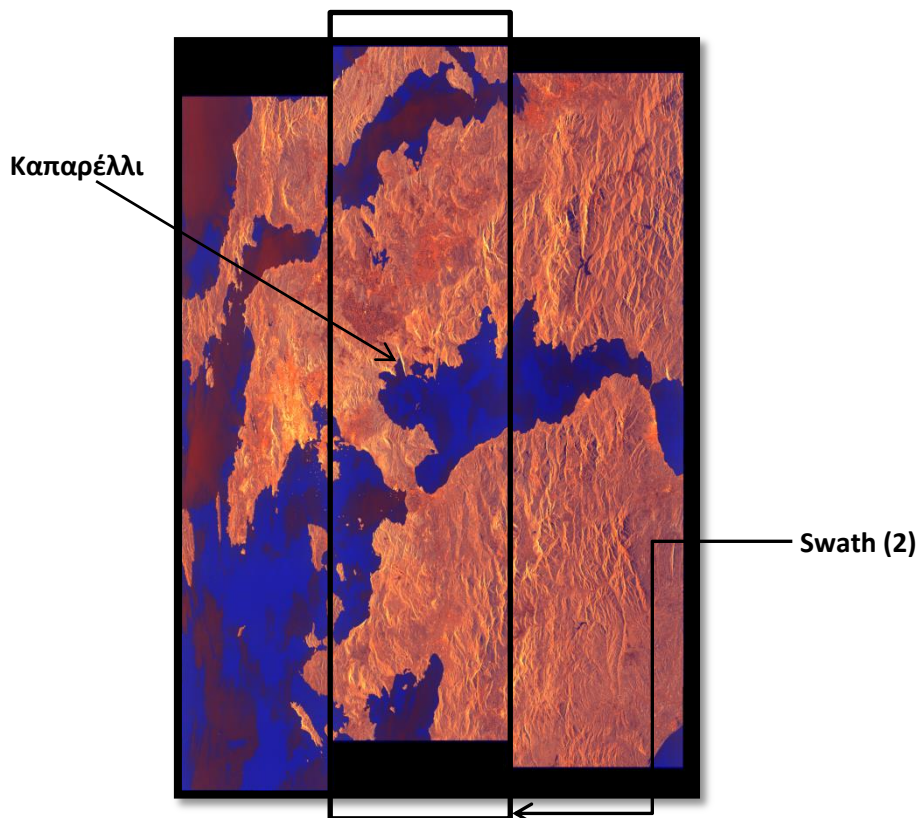
Εικόνα 43. Το περιβάλλον εργασίας του SARPROZ. Κάτω αριστερά βρίσκεται το command window του προγράμματος και επάνω δεξιά οι επιλογές έναρξης της επεξεργασίας δεδομένων.

Τα δορυφορικά δεδομένα (δορυφορικές εικόνες) SAR που χρησιμοποιήθηκαν συνολικά ήταν 92 εικόνες ανοδικής τροχιάς (Ascending Orbit), για την περίοδο 10/2014 – 10/2018 και 55 εικόνες καθοδικής τροχιάς (Descending Orbit), για την περίοδο 10/2014 – 12/2018 (Εικόνα 44).



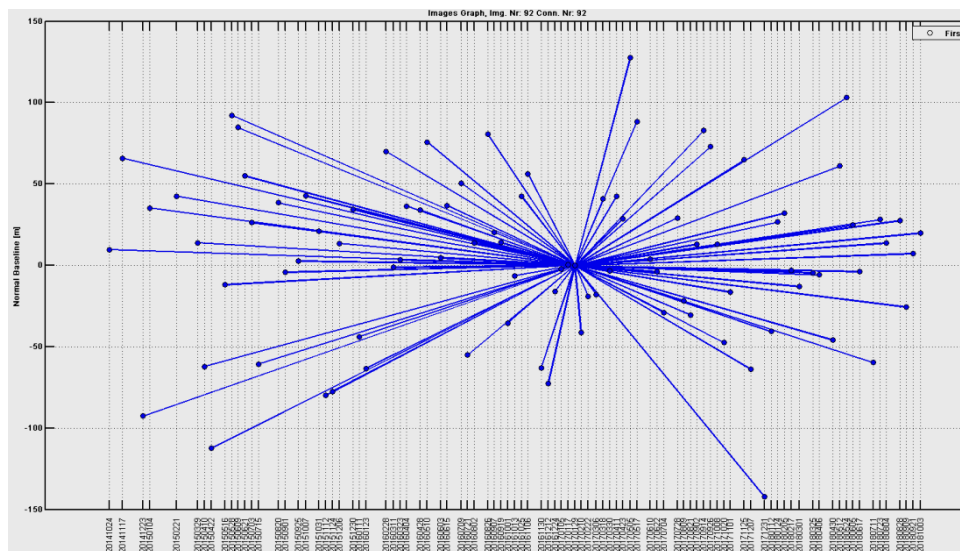
Εικόνα 44. Η διαδικασία επιλογής δεδομένων (εικόνων) για την περιοχή μελέτης. Στο πορτοκαλί πλαίσιο βρίσκεται η περιοχή ενδιαφέροντος.

Ο δορυφόρος Sentinel 1 σαρώνει την επιφάνεια της Γης, με αποτέλεσμα την παραγωγή εικόνων. Κάθε εικόνα αποτελείται από τρεις φασματικές λωρίδες, τα swath. Η περιοχή μελέτης εντοπίζεται στο δεύτερο swath, για αυτό το swath που επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την επεξεργασία είναι το δεύτερο (2) (Εικόνα 45).



Εικόνα 45. Δορυφορική εικόνα ανοδικής τροχιάς στην οποία φαίνονται τα τρία swath από τα οποία αποτελείται.

Ακόμα, επιλέχθηκε μία master εικόνα, η οποία, όπως ελέγχθηκε από τοπικούς μετεωρολογικούς σταθμούς, δεν ήταν επηρεασμένη από ατμοσφαιρικούς παράγοντες (βροχή, χιόνι, ομίχλη κ.ά.) και έπειτα συσχετίστηκε με τις υπόλοιπες εικόνες (slave images). Στη συνέχεια, ακολούθησε η διαδικασία εγγραφής των εικόνων (Coregistration). (Εικόνα 46).



Εικόνα 46. Συσχέτιση των εικόνων master – slave. Η ένωση των ακτίνων στο κέντρο αποτελεί την master εικόνα, ενώ όλες οι υπόλοιπες είναι οι slave εικόνες. Στον άξονα των y φαίνονται οι αποστάσεις μεταξύ των λήψεων (perpendicular baseline), ενώ στον άξονα των x φαίνεται ο χρόνος (ημερομηνίες λήψης των εικόνων της περιοχής μελέτης).

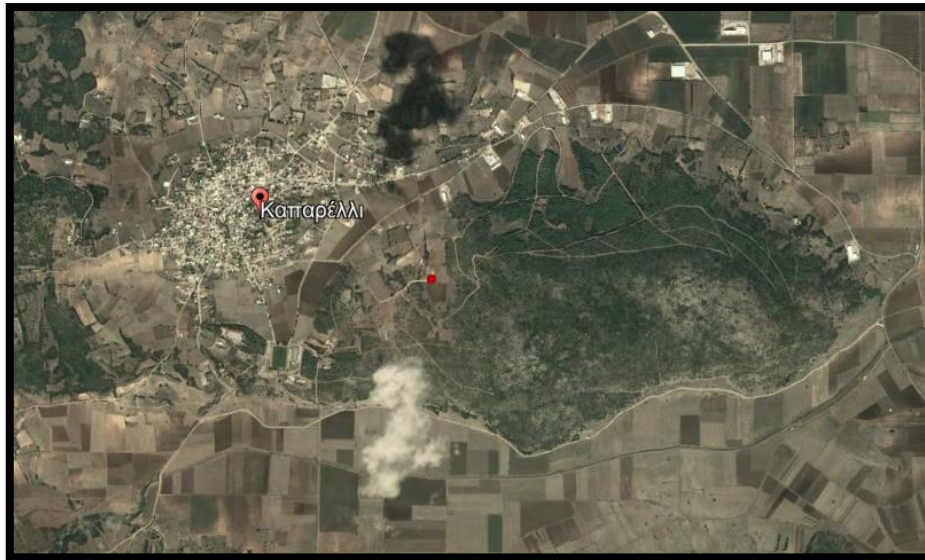
Το πρόγραμμα, βέβαια, εκτελείται ξεχωριστά για τις δύο τροχιές που πραγματοποιεί ο δορυφόρος. Πρώτα, για παράδειγμα, επεξεργάζονται οι εικόνες της ανοδικής τροχιάς, οι οποίες εισάγονται στο λογισμικό, ελέγχονται οι τροχιές τους και συνεχίζουμε τη διαδικασία. Έπειτα, αφού τελειώσει η διαδικασία (processing) για τις εικόνες της ανοδικής τροχιάς, συνεχίζουμε με τις εικόνες της καθοδικής τροχιάς του δορυφόρου.

Προτού ξεκινήσει η επεξεργασία των εικόνων, πρέπει να οριοθετήσουμε την περιοχή για την οποία θα γίνει η διαδικασία επεξεργασίας (Εικόνα 47), η οποία εννοείται πως είναι ένα μόνο κομμάτι ολόκληρης της εικόνας που λαμβάνουμε από το Copernicus Open Access Hub. Μπορούμε, βέβαια να τρέξουμε το λογισμικό για ολόκληρη την έκταση που καλύπτει η εικόνα, με τη διαφορά μόνο ότι θα είναι περισσότερο χρονοβόρα διαδικασία.



Εικόνα 47. Οριοθέτηση της περιοχής μελέτης μέσω SARPROZ.

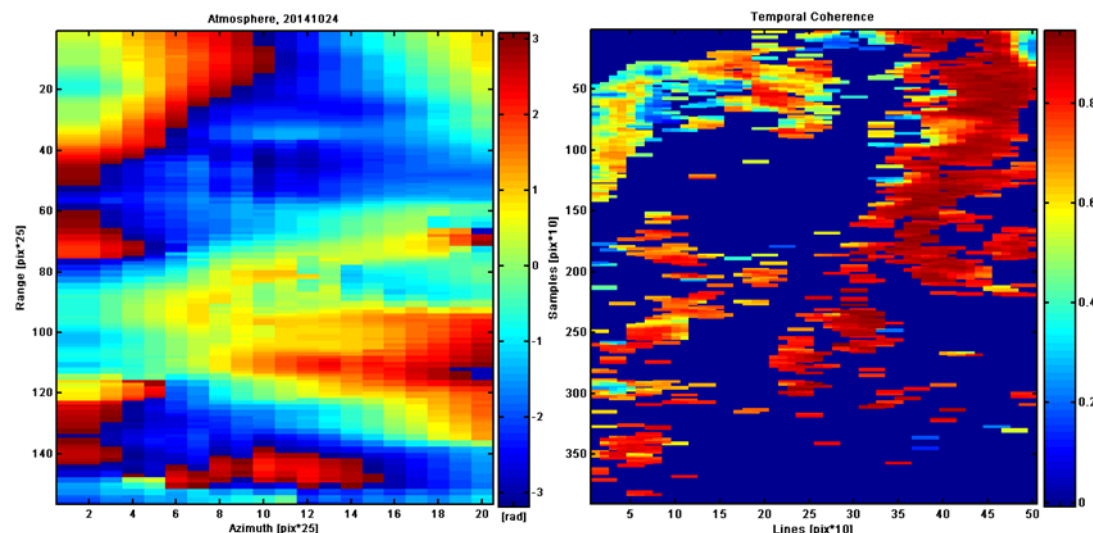
Στη συνέχεια επιλέχθηκε ένα σημείο εδαφικού ελέγχου (GCP or Ground Control Point) (Εικόνα 48), προκειμένου να έχουμε καλύτερη εγγραφή μεταξύ των σημείων των εικόνων. Συνήθως, τα κτίρια αποτελούν την ιδανική επιλογή λόγω σταθερότητας και λόγω, σχεδόν κάθε φορά, υψηλής ευκρίνειας, είναι δηλαδή ευδιάκριτο από τον δορυφόρο. Στη δική μας περίπτωση, το σημείο που επιλέχθηκε είναι ένα κτίριο κοντά στον οικισμό του Καπαρελλίου.



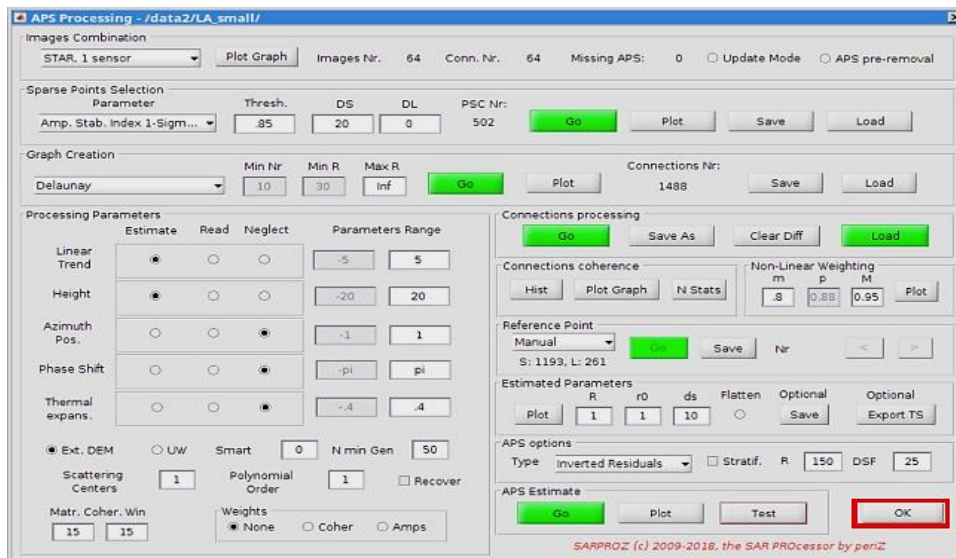
Εικόνα 48. Το σημείο GCP (κόκκινη τελεία).

Μέσω του λογισμικού αυτού πραγματοποιήθηκε και η μέθοδος PS (Persistent Scatterers InSAR (**PSI**)), με την οποία μας επιτρέπεται να εξάγουμε πληροφορίες για τη μέση ετήσια ταχύτητα παραμόρφωσης του εδάφους και την εκτίμηση ατμοσφαιρικών παραγόντων.

Με τη διαδικασία APS - Atmospheric Phase Screen (APS estimation through Multi image InSAR processing) (Εικόνα 50), ήταν δυνατό το φιλτράρισμα των ατμοσφαιρικών επιδράσεων, δηλαδή η αφαίρεση οποιονδήποτε ατμοσφαιρικών φαινομένων (Εικόνα 49), για την καλύτερη παραγωγή αποτελεσμάτων.



Εικόνα 49. Η συνοχή των σημείων με ατμοσφαιρικά δεδομένα (αριστερά) και η χρονική συνοχή (temporal coherence) των σημείων χωρίς ατμοσφαιρικά (δεξιά).

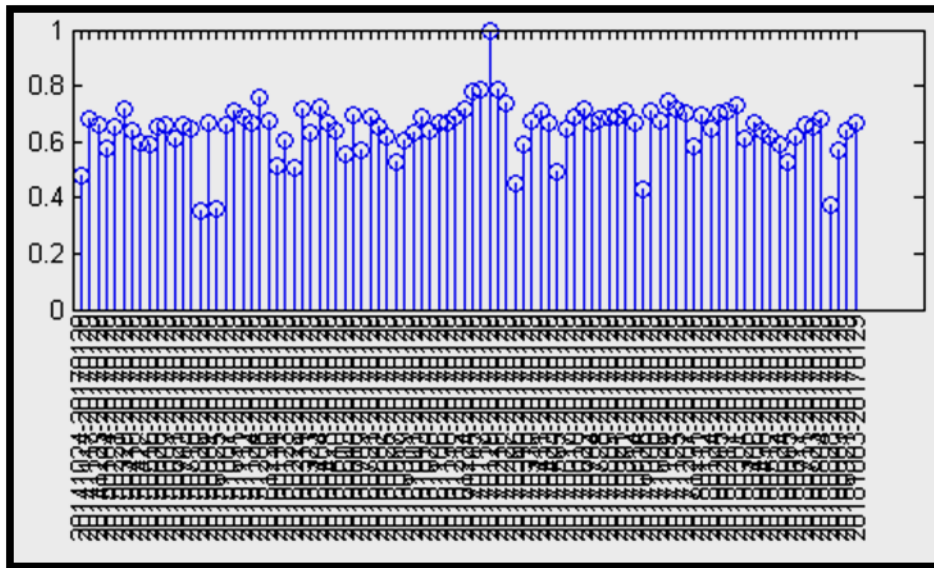


Εικόνα 50. Η διαδικασία επεξεργασίας με τη μέθοδο APS.

Αντικείμενα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως “στόχοι” σε εικόνες Radar είναι και φυσικοί και ανθρώπινες κατασκευές. Μπορεί, δηλαδή, να είναι εκτεθειμένοι βράχοι και πετρώματα στην επιφάνεια του εδάφους, γυμνά από βλάστηση, κάποιες ασυνέχειες στο ανάγλυφο που έχουν δημιουργήσει φυσικές τομές ιζημάτων και πετρωμάτων, ογκόλιθοι, κτίρια, κολόνες ρεύματος, πύργοι μετάδοσης σήματος, ταράτσες σπιτιών, φράγματα και εκτεθειμένοι αγωγοί, κ.ά.

Μετά τη διαδικασία εκτίμησης APS και αφού έχουν αφαιρεθεί τα ατμοσφαιρικά “παράσιτα”, ελέγχεται ξανά η σχέση μεταξύ master και slave εικόνων, καθώς και η συνοχή των ανακλαστήρων – στόχων που έχουν βρεθεί στην περιοχή.

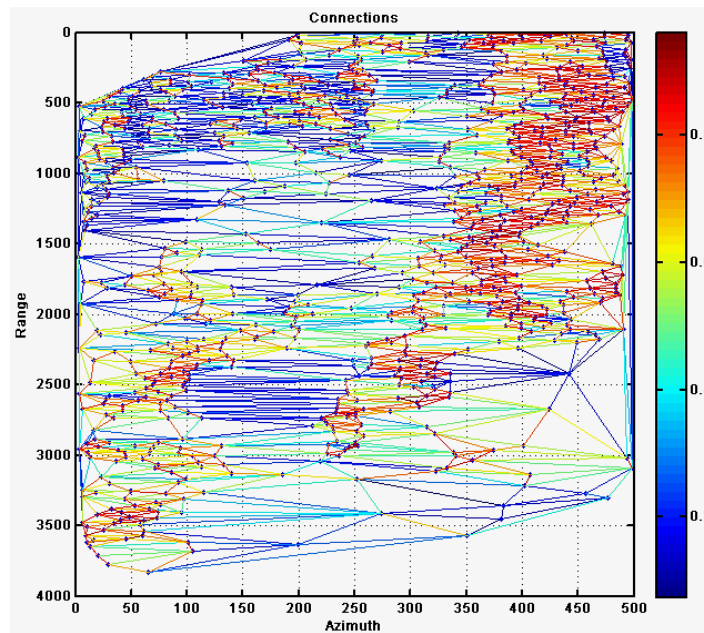
Ψάχνουμε πάντα τη master εικόνα που θα μας δώσει την υψηλότερη συνοχή σχετικά και με τις slave εικόνες. Εξαρτάται, βέβαια και από την περιοχή μελέτης. Η Εικόνα 51, αντιπροσωπεύει την περιοχή μελέτης, η οποία δεν αποτελείται μόνο από κτίρια και κατασκευές, αλλά και μεγάλες εκτάσεις γης. Βασιζόμενοι σε αυτό το διάγραμμα, μπορούμε να ελέγξουμε και να αποφασίσουμε στη συνέχεια αν είμαστε σε θέση να διορθώσουμε τη συνοχή μέσω του προγράμματος. Για παράδειγμα, εδώ θα μπορούσαμε να αποκλείσουμε τις τιμές συνοχής $<0,5$ ή $<0,6$.



Εικόνα 51. Η συνοχή μεταξύ των σημείων μετά την αφαίρεση και των ατμοσφαιρικών δεδομένων. Στον άξονα των γ βρίσκονται οι τιμές συνοχής (coherence), ενώ στον άξονα των x βρίσκονται οι εικόνες που επεξεργάζονται μέσω του προγράμματος. Η τιμή συνοχής στο κέντρο που ισούται με 1 αντιπροσωπεύει τη συνοχή της master εικόνας με τον εαυτό της, είναι δηλαδή η μοναδική εικόνα που θα έχει την τέλεια αντιστοιχία με την εικόνα master. Οι υπόλοιπες συσχετίσεις, φυσικά, αφορούν τις slave εικόνες.

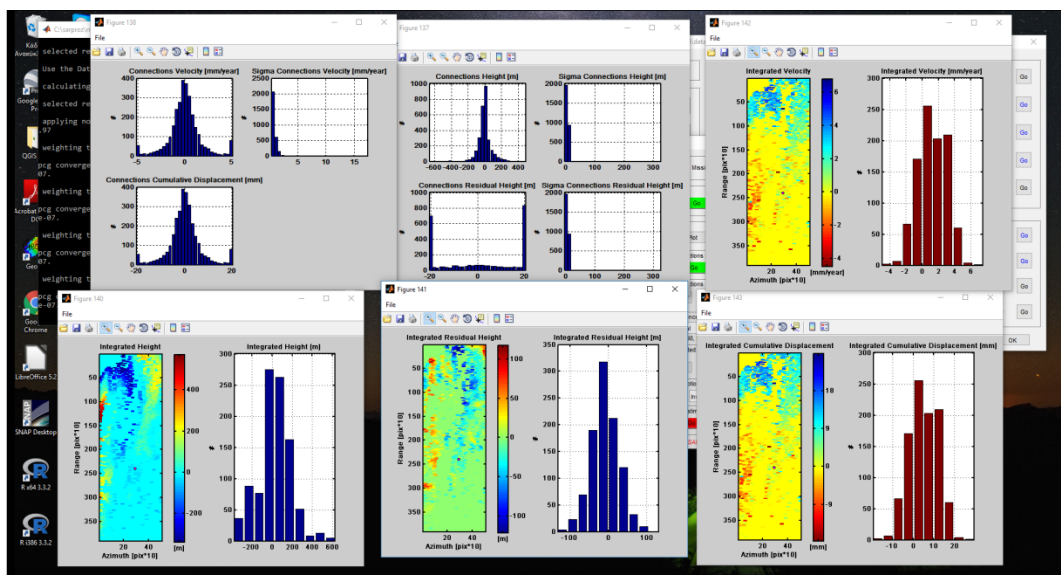
Επίσης, προσπαθούμε, με την επιλογή του κατάλληλου σημείου αναφοράς (Reference Point), να πετύχουμε μηδενική ταχύτητα και μηδενική συνολική μετατόπιση. Το reference point σχετίζεται με κάθε σημείο PS της κάθε εικόνας SAR. Το σημείο αυτό θα πρέπει, ανάλογα με τα γεωλογικά κ.ά. κριτήρια της περιοχής, να είναι σταθερό. Μπορεί να επιλεγεί κάποιο σημείο που θα βρίσκεται κοντά σε ένα σταθμό GPS.

Στη συνέχεια, μας δίνεται η δυνατότητα να δούμε την ισχύ της σύνδεσης που έχουν οι αναγνωρισμένοι ανακλαστήρες. Προσπαθούμε να επιτύχουμε όσο το δυνατό καλύτερη σύνδεση μεταξύ των ανακλαστήρων (Εικόνα 52). Αυτό το στάδιο αποτελεί μία πρώτη επιβεβαίωση ότι έχουμε επιλέξει ένα σωστό reference point, εφόσον δηλαδή υπάρχει υψηλό ποσοστό καλής (κίτρινες γραμμές) ή μέγιστης (κόκκινες γραμμές) σύνδεσης των ανακλαστήρων.



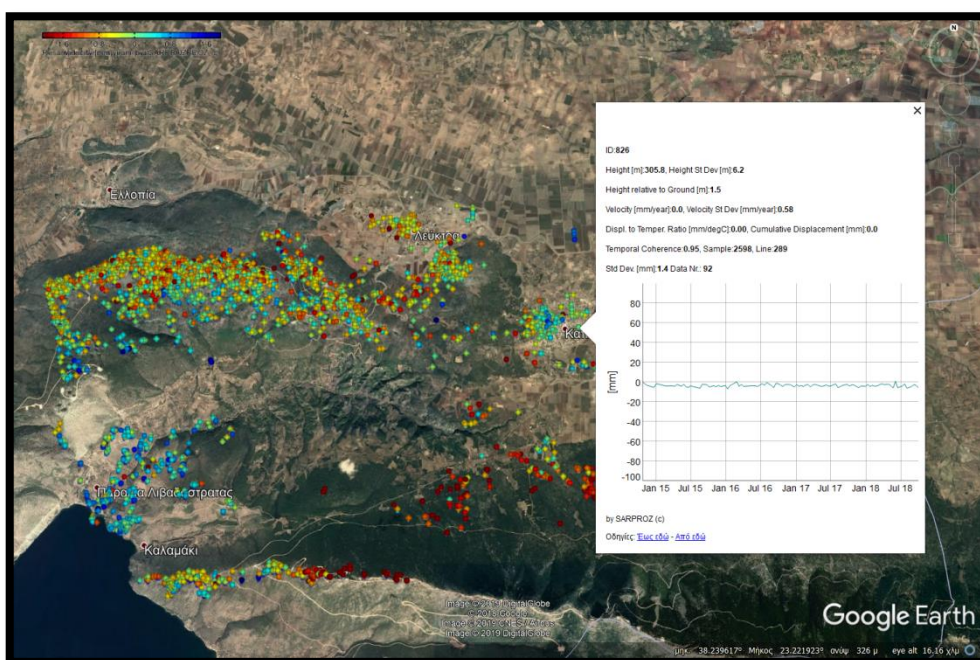
Εικόνα 52. Απεικόνιση της σύνδεσης των σημείων-στόχων μεταξύ τους. Το κόκκινο χρώμα ισούται με τη μέγιστη δυνατή, καλύτερη σύνδεση.

Είναι σημαντικό, κατά τη διάρκεια της μεθόδου, και μετά την επιλογή του Reference Point, να ελέγχουμε τους παράγοντες της ταχύτητας, της συνολικής μετατόπισης, κυρίως, αλλά και του ύψους. Όταν αυτοί οι τρεις παράγοντες απεικονίζονται στα διαγράμματα (Εικόνα 53) ως μηδενικοί, τότε είμαστε σίγουροι ότι το Reference Point που επιλέξαμε είναι σωστό. Τότε, είμαστε έτοιμοι να συνεχίσουμε με τη μέθοδο και να εκτιμήσουμε τα αποτελέσματα PS (APS estimation), με τα ατμοσφαιρικά χαρακτηριστικά να έχουν πλέον αφαιρεθεί.



Εικόνα 53. Απεικόνιση διαγραμμάτων ταχύτητας και συνολικής μετατόπισης. Βλέπουμε ότι όλες οι τιμές βρίσκονται στο μηδέν, που σημαίνει ότι έχουμε επιλέξει σωστό σημείο αναφοράς.

Προς το τέλος της μεθόδου PS, παράγονται δεδομένα της χρονικής σειράς ή χρονοσειράς (time series) της μετατόπισης όλων των σημείων που αναγνωρίστηκαν στις εικόνες, η οποία οπτικοποιείται μέσω Google Earth και εξάγεται ως εικόνα, η απεικόνιση δηλαδή των αποτελεσμάτων γίνεται στο περιβάλλον του Google Earth, καθώς όλα τα δεδομένα είναι γεωαναφερμένα (έχουν δηλαδή συντεταγμένες). Εκεί, μπορούμε να δούμε μαζί πλέον όλα τα στοιχεία για κάθε σημείο της χρονοσειράς (Εικόνα 54), όπως την ταχύτητα, τη συνολική μετατόπιση, το υψόμετρο, την τυπική απόκλιση, την ταυτότητα του σημείου (ID), τη χρονική συνοχή (temporal coherence), ένα διάγραμμα συσχέτισης μετατόπισης (σε mm)-χρόνου κ.ά. Καταλήγουμε, λοιπόν, στην παραγωγή πολλαπλών συμβολογραφημάτων (έναντι απλών συμβολογραφημάτων που παράγονται εκτός διαδικασίας PS), τα οποία μας δίνουν μία συνοπτική εικόνα του πεδίου της μετατόπισης που επηρεάζει την περιοχή, για μία χρονική περίοδο που καλύπτουν και οι εικόνες που εισαγάγαμε. Επίσης, παίρνουμε ακριβείς πληροφορίες για την κίνηση του κάθε σημείου, σε κάθε εικόνα Radar.



Εικόνα 54. Παράδειγμα χρονοσειράς των σημείων που αναγνωρίστηκαν στην περιοχή. Στην εικόνα έχουμε εστιάσει σε ένα σημείο στον οικισμό του Καπαρελλίου.

Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων δοκιμάστηκαν δύο πιθανές μέθοδοι όσον αφορά κυρίως την παραμόρφωση εξαιτίας του ρήγματος του Καπαρελλίου, η γραμμική (linear) και η μη-γραμμική (non-linear). Η πρώτη, περιγράφει την παραμόρφωση ως τη μέση ετήσια ταχύτητα των στόχων στην περιοχή (ταχύτητα με την οποία μετατοπίζονται οι “στόχοι” στην επιφάνεια του εδάφους), ενώ η δεύτερη επιλέγει να περιορίσει τον παράγοντα ταχύτητα και εξάγει αποτελέσματα αναφορικά με τη συνολική μετατόπιση.

Για την παρουσίαση των παρακάτω αποτελεσμάτων, έχει επιλεγεί η μη-γραμμική μέθοδος παραμόρφωσης, καθώς αυτή είχε καλύτερο αντίκτυπο σχετικά και με τα δεδομένα που

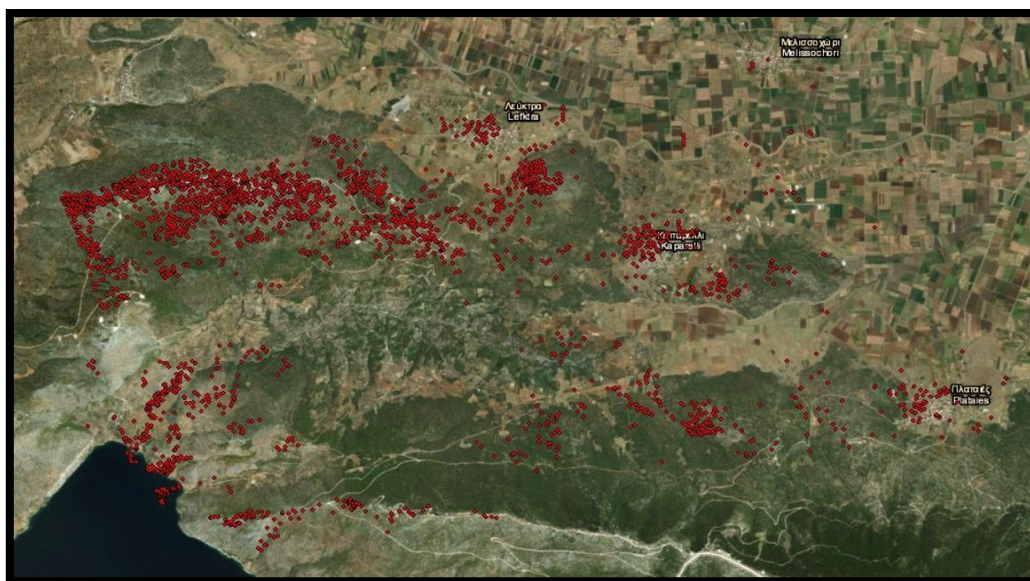
χρησιμοποιήθηκαν και συνάδει καλύτερα με τη συμπεριφορά του ρήγματος του Καπαρελλίου.

5.2. ΕΡΜΗΝΕΙΑ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

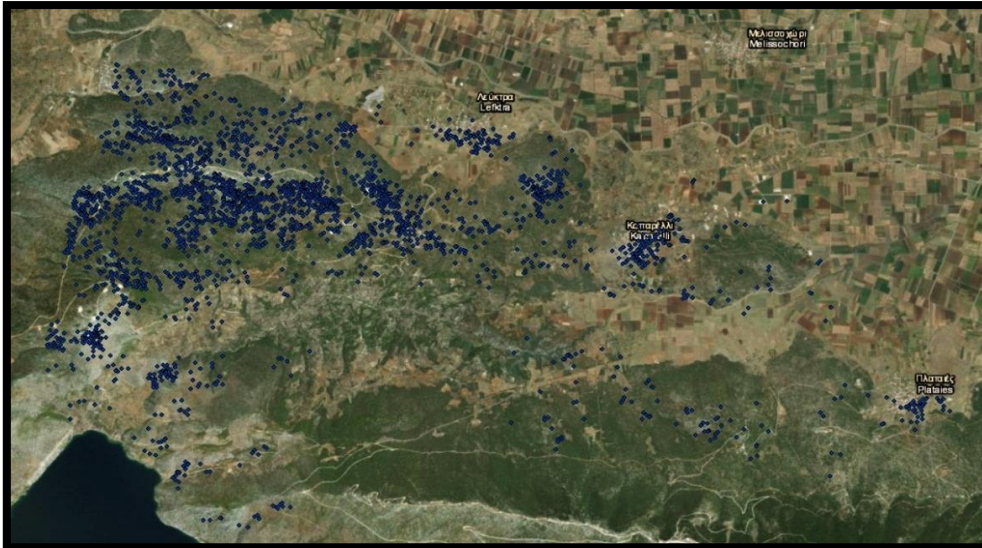
Τα αποτελέσματα που παράγονται από τη μέθοδο ανάλυσης PS των πολυχρονικών δεδομένων εικόνων SAR, είναι κυρίως, ένα σύνολο σημείων που αναγνωρίζονται μέσα στις εικόνες και οι συντεταγμένες τους (γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος, ακριβές υψόμετρο), η εκτίμηση της κίνησης κάθε σημείου PS σε σχέση με το χρόνο, η εκτίμηση ενός μέσου ρυθμού μετατόπισης κάθε σημείου, η ταχύτητα και η τυπική απόκλιση των μετρήσεων για κάθε σημείο.

Μέσω του λογισμικού SARPROZ και έπειτα από την επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων προέκυψαν δεδομένα και από τις δύο τροχιές που εκτελεί ο δορυφόρος, την ανοδική τροχιά (Ascending Orbit) (Εικόνα 55), με κατεύθυνση από Νότο προς Βορρά και ανατολική εστίαση ως προς την επιφάνεια της γης, και την καθοδική τροχιά (Descending Orbit) (Εικόνα 56), με κατεύθυνση από Βορρά προς Νότο και δυτική εστίαση ως προς την επιφάνεια της γης. Η κάθε τροχιά μας δίνει τα δικά της σημεία – στόχους, τα οποία έχουν το καθένα τα δικά τους στοιχεία. Στην ανοδική τροχιά αναγνωρίστηκαν μεταξύ 3500 – 3900 στόχοι, ενώ στην καθοδική τροχιά αναγνωρίστηκαν ελάχιστα λιγότεροι στόχοι, μεταξύ 3300 – 3500.

Όπως βλέπουμε και στις δύο εικόνες (Εικόνες 55,56), έχουν αναγνωρισθεί από το πρόγραμμα αρκετοί σταθεροί ανακλαστήρες στους δύο οικισμούς, του Καπαρελλίου (και κοντά στο ρήγμα του Καπαρελλίου), των Πλαταιών, της Λιβαδόστρας (στα δυτικά), στον κόλπο του Καλαμακίου, καθώς επίσης, όπως ήταν αναμενόμενο, στους ορεινού όγκους που περιβάλλουν τις περιοχές αυτές.

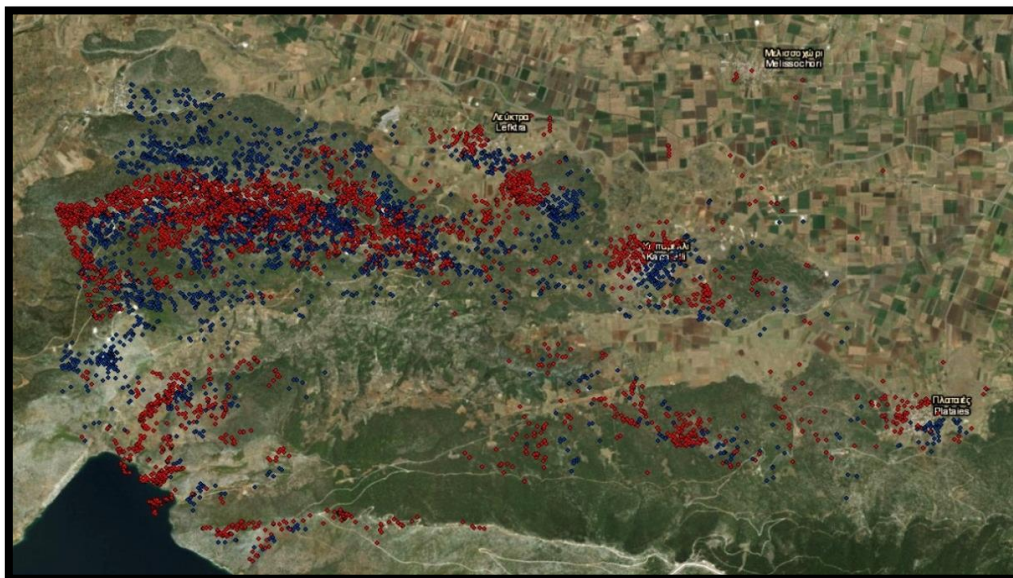


Εικόνα 55. Αρχική επιλογή σκεδαστών της ανοδικής τροχιάς του δορυφόρου.



Εικόνα 56. Αρχική επιλογή σκεδαστών της καθοδικής τροχιάς του δορυφόρου.

Είναι λογικό κάποιοι ανακλαστήρες που υπάρχουν στη μία τροχιά να μην υπάρχουν στην άλλη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 57, λόγω της διαφορετικής εστίασης του δορυφόρου. Για παράδειγμα, σε έναν ορεινό όγκο, ο οποίος έχει κωνικό σχήμα, ο δορυφόρος δε θα μπορεί με ένα πέρασμά του να στοχεύσει προς όλες τις πλευρές του, παρά μόνο σε μία. Όταν αλλάξει τροχιά ο δορυφόρος θα στοχεύσει στην άλλη πλευρά του όρους, άρα θα έχουμε πληροφορία για δύο διαφορετικές πλαγιές. Στην Εικόνα 57, φαίνονται όλοι οι ανακλαστήρες, και από τις δύο τροχιές, που αναγνωρίστηκαν για την περιοχή ενδιαφέροντος.



Εικόνα 57. Συνδυασμός σημείων ανοδικής και καθοδικής τροχιάς. Οι σκεδαστές που υπάρχουν στο ΝΔ άκρο της περιοχής, μέσα στο θαλάσσιο χώρο, δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν, διότι δεν είναι δυνατό να υπάρχουν ανακλαστήρες στην επιφάνεια της θάλασσας. Το γεγονός αυτό, οφείλεται σε πιθανό shift που υπάρχει μεταξύ των δορυφορικών δεδομένων και του περιβάλλοντος του Google Earth.

5.2.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΟΔΙΚΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ

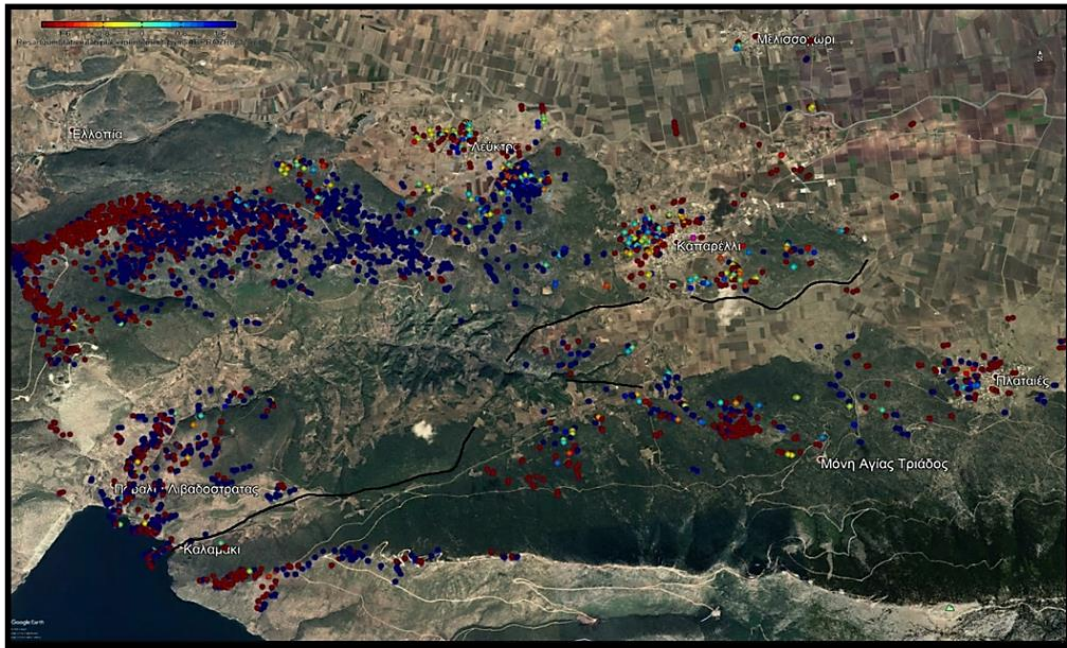
Οι δορυφορικές εικόνες της ανοδικής τροχιάς ήταν αυτές που επεξεργάστηκαν πρώτες. Μετά το πέρας της επεξεργασίας είχαν αρχίσει να φαίνονται κάποια πρώτα αποτελέσματα όσον αφορά στην παραμόρφωση της περιοχής, παρ' όλα αυτά έπρεπε να γίνει και η επεξεργασία των εικόνων της καθοδικής τροχιάς, ώστε να επαληθευτούν οι όποιες παρατηρήσεις από την πρώτη διαδικασία.

Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 58), μπορούμε να διακρίνουμε πως οι περισσότεροι στόχοι είναι συγκεντρωμένοι στους ορεινούς όγκους της περιοχής, καθώς επίσης και στις κατοικίες. Ας έχουμε υπό όψη ότι όσο πλησιάζουμε προς το κόκκινο χρώμα, οι στόχοι απομακρύνονται από τον δορυφόρο, ενώ όσο πλησιάζουμε προς το μπλε χρώμα, οι στόχοι πλησιάζουν προς το δορυφόρο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, μπορούμε λοιπόν να δούμε πως ο οικισμός του Καπαρελλίου και η περιοχή γύρω από αυτό, παρότι παρουσιάζουν ένα πλήθος ως προς το χρώμα των στόχων, αυτό που κυριαρχεί είναι το μπλε, άρα μπορούμε να πούμε ότι το Καπαρέλλι φαίνεται να πλησιάζει προς τον δορυφόρο, άρα ίσως να υπάρχει κάποια πιθανή ανύψωση της περιοχής. Σε αντίθεση με το Καπαρέλλι, οι Πλαταιές παρουσιάζουν πληθώρα κόκκινων στόχων, κάτι που υποδεικνύει απομάκρυνση από τον δορυφόρο, άρα εδώ ίσως να υπάρχει βύθιση της περιοχής. Δεν υπάρχουν αρκετοί στόχοι κοντά στο Βόρειο τμήμα του ρήγματος του Καπαρελλίου (Εικόνα 58, μαύρη γραμμή), ώστε να μπορέσουμε ακόμα να βγάλουμε κάποιο συμπέρασμα ως προς την παραμόρφωση που προκαλεί σε αυτό το τμήμα της περιοχής. Θα έχουμε περισσότερα στοιχεία για αυτό από τη καθοδική τροχιά του δορυφόρου. Λίγοι κόκκινοι στόχοι κοντά στην ανατολική απόληψη του ρήγματος φαίνεται να υποδεικνύουν κίνηση απομάκρυνσης από το δορυφόρο.

Στον κόλπο του Καλαμακίου, στα ΝΔ της Εικόνας 58, η πλευρά που βρίσκεται βόρεια της γραμμής του ρήγματος φαίνεται να πλησιάζει το δορυφόρο, ενώ εκείνη που βρίσκεται νότια της γραμμής φαίνεται να απομακρύνεται από αυτόν. Δεν υπάρχουν άλλες ενδείξεις κατά μήκος του υπόλοιπου τμήματος του ρήγματος, κυρίως εξαιτίας του φαραγγιού του ποταμού Λιβαδόστρου που βρίσκεται στο κέντρο της εικόνας.

Η παραμόρφωση που αντιπροσωπεύεται από την κλίμακα που βρίσκεται πάνω αριστερά στην εικόνα μετριέται σε mm και αφορά τη συνολική μετατόπιση του κάθε στόχου/χρόνου. Η ελάχιστη τιμή είναι -2 mm και η μέγιστη +2 mm.



Εικόνα 58. Χωρική κατανομή των σημείων της ανοδικής δορυφορικής τροχιάς. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι θετικές τιμές (μέγιστο = +2mm), ενώ όσο πλησιάζουμε προς το κόκκινο (μέγιστο = -2mm) οι τιμές γίνονται πιο αρνητικές. Με μαύρη γραμμή φαίνεται το ρήγμα του Καπαρελλίου. Η παραμόρφωση εδώ κυμαίνεται από -2 mm έως +2 mm.

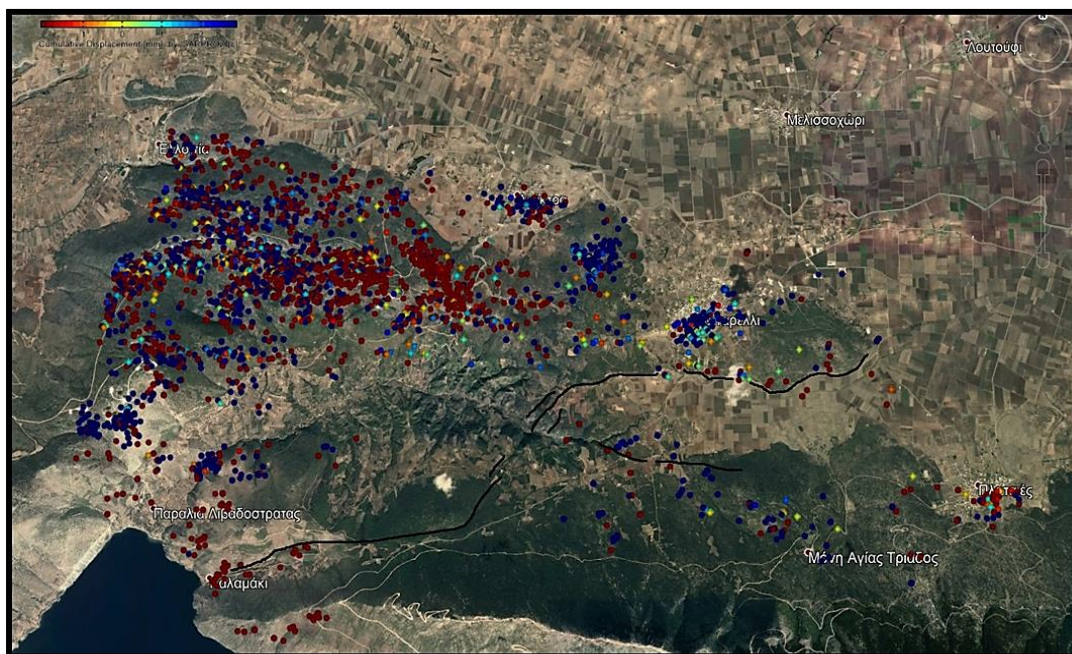
5.2.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΘΟΔΙΚΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ

Όπως ακριβώς και στην προηγούμενη επεξεργασία, και εδώ τα αποτελέσματα, δηλαδή οι ανακλαστές φαίνεται να συγκεντρώνονται περισσότερο στους ορεινούς όγκους και στους οικισμούς. Σε αυτή την εικόνα (Εικόνα 59), μπορούμε να διακρίνουμε καλύτερα το μπλε χρώμα που κυριαρχεί στον οικισμό του Καπαρελλίου, δηλαδή επιβεβαιώνουμε ότι το Καπαρέλλι φαίνεται να πλησιάζει προς τον δορυφόρο. Επίσης, βλέπουμε περισσότερους στόχους – ανακλαστές κοντά στη γραμμή του ρήγματος, εξαιτίας της προς τα δυτικά εστίασης του δορυφόρου, με κόκκινους στόχους να βρίσκονται στην πλευρά της πεδιάδας και άλλους μπλε χρώματος να βρίσκονται στην πλευρά του οικισμού του Καπαρελλίου, κάτι που υποδηλώνει πως η πεδιάδα απομακρύνεται από τον δορυφόρο και η πλευρά προς τον οικισμό πλησιάζει προς τον δορυφόρο. Άρα, θα μπορούσαμε να πούμε ότι το ρήγμα λογικά υποβιβάζει την πεδιάδα και ανυψώνει τον οικισμό του Καπαρελλίου και τη γύρω περιοχή. Επιβεβαιώνουμε, ακόμη, ότι ο οικισμός των Πλαταιών απομακρύνεται από τον δορυφόρο.

Εστιάζοντας στο κεντρικό μέρος της εικόνας, θα παρατηρήσουμε την ύπαρξη κάποιων μικρότερων κανονικών ρηγμάτων (μικρότερες μαύρες γραμμές), κοντά στα οποία είναι συγκεντρωμένοι κάποιοι στόχοι. Φαίνεται, λοιπόν, πως υπάρχει κάποια κίνηση και σε αυτή τη περιοχή, συγκεκριμένα η βόρεια πλευρά προς τη πεδιάδα φαίνεται να πλησιάζει προς τον δορυφόρο, ενώ η νότια πλευρά απομακρύνεται από αυτόν. Ίσως, δηλαδή αυτά τα

μικρότερα ρήγματα να ανυψώνουν μέρος της πεδιάδας και να υποβιβάζουν ένα μέρος του πόδα του όρους Κιθαιρώνα στα νότια.

Και πάλι, το κόκκινο χρώμα αντιπροσωπεύει τους στόχους με αρνητικές τιμές, οι οποίες έχουν σαν μέγιστο την τιμή -2 και το μπλε χρώμα αντιπροσωπεύει τους στόχους με θετικές τιμές, οι οποίες φτάνουν στο μέγιστο το +3.



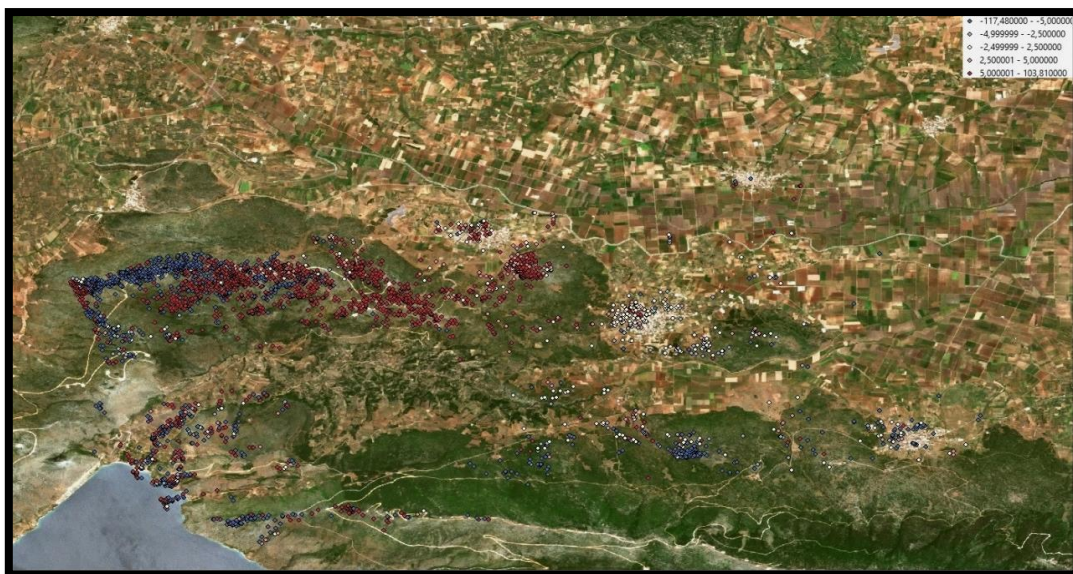
Εικόνα 59. Χωρική κατανομή των σημείων της καθοδικής δορυφορικής τροχιάς. Οι μπλε, θετικές τιμές έχουν μέγιστο το +3mm, ενώ οι κόκκινες, αρνητικές τιμές έχουν μέγιστο το -2mm. Η μαύρη γραμμή αντιπροσωπεύει το ρήγμα του Καπαρελλίου. Η παραμόρφωση, δηλαδή, κυμαίνεται από -2 mm έως +3 mm.

5.2.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΙΜΩΝ

Προκειμένου να έχουμε όσο το δυνατό πιο αντικειμενικά αποτελέσματα ως προς την παραμόρφωση στην περιοχή, πραγματοποιήθηκε ο αποκλεισμός των πολύ ακραίων τιμών συνολικής μετατόπισης και για τις δύο δορυφορικές τροχιές, προκειμένου να εστιάσουμε καλύτερα στη μετατόπιση που προκαλείται κυρίως κοντά στους οικισμούς, στην κατάληξη της περιοχής έρευνας στον ανατολικό Κορινθιακό και στην ενδιάμεση περιοχή.

Για να γίνει λοιπόν αυτή η διάκριση, χρησιμοποιήθηκε σαν φίλτρο η τυπική απόκλιση των τιμών (σ) των στόχων (ακραίες τιμές που λειτουργούν σαν σφάλμα) για κάθε περίπτωση και διακρίθηκαν σε πέντε (5) κατηγορίες σύμφωνα με τον παρακάτω διαχωρισμό:

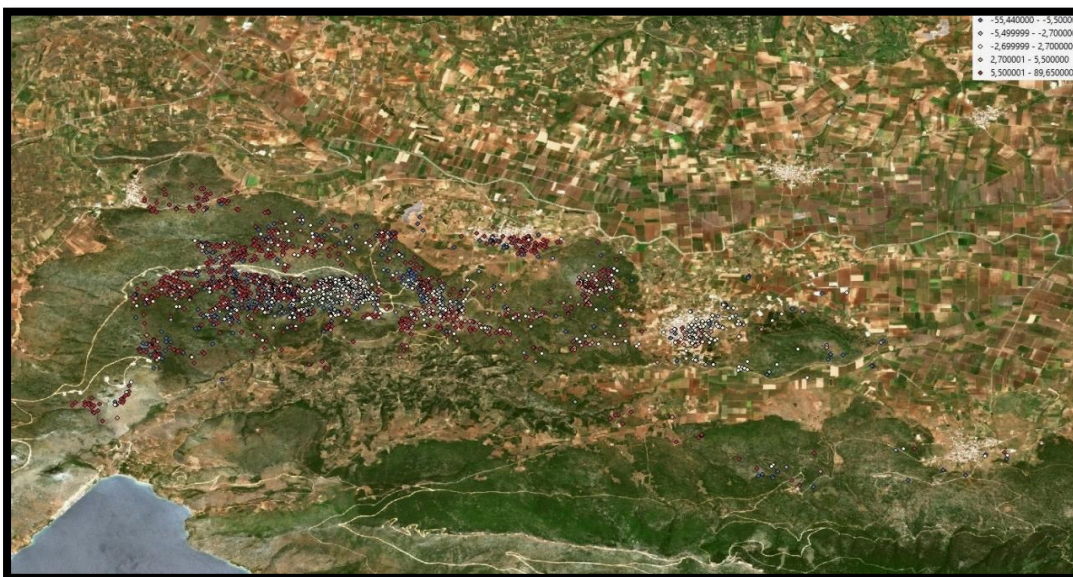
$$\text{i) } < -2*\sigma, \text{ ii) } -2*\sigma \text{ έως } -\sigma, \text{ iii) } -\sigma \text{ έως } \sigma, \text{ iv) } \sigma \text{ έως } 2*\sigma, \text{ v) } > 2*\sigma$$



Εικόνα 60. Η χρονοσειρά της ανοδικής δορυφορικής τροχιάς. Ταξινόμηση της ταχύτητας των ανακλαστήρων με βάση την τυπική απόκλιση. Εδώ, οι αρνητικές τιμές αντιπροσωπεύονται από το μπλε χρώμα, ενώ οι θετικές εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα.

Η τυπική απόκλιση για τις τιμές της ανοδικής τροχιάς είναι 2,5 και για τις τιμές της καθοδικής τροχιάς 2,7.

Οπότε, έχουμε αποδεκτές τιμές για αυτές τις ανοδικής τροχιάς (Εικόνα 60), από -5 έως +5 (αφού $\sigma=2,5$), όλες οι υπόλοιπες τιμές <-5 και $>+5$ αποκλείονται για αυτή τη περίπτωση. Το ίδιο ισχύει και για τα αποτελέσματα των τιμών της καθοδικής τροχιάς (Εικόνα 61), δηλαδή αποδεκτές είναι οι τιμές από -5,5 έως +5,5 (περίπου, αφού $\sigma=2,7$), οι υπόλοιπες τιμές $<-5,5$ και $>+5,5$ αποκλείονται.



Εικόνα 61. Η χρονοσειρά της καθοδικής δορυφορικής τροχιάς. Ταξινόμηση της ταχύτητας των ανακλαστήρων με βάση την τυπική απόκλιση. Εδώ, οι αρνητικές τιμές αντιπροσωπεύονται από το μπλε χρώμα, ενώ οι θετικές εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα.

Αφού αποκλείστηκαν οι ακραίες τιμές της συνολικής μετατόπισης των στόχων στην περιοχή, αυτό που μπορούμε να συμπεράνουμε είναι ότι πλέον φαίνεται λίγο πιο ξεκάθαρα το γεγονός ότι στην περιοχή του Καπαρελλίου και γενικότερα στην ευρύτερη περιοχή αναγνωρίζεται μικρή μετατόπιση (πιο ήπιοι χρωματικά οι στόχοι στο κέντρο του οικισμού του Καπαρελλίου και στην πεδιάδα, κυρίως) (Εικόνες 60,61). Η παραμόρφωση εξαιτίας της τεκτονικής δραστηριότητας και της γεωδυναμικής των φαινομένων που επηρεάζουν την περιοχή με το πέρασ του χρόνου είναι μικρή. Ο ρυθμός ολίσθησης του ενεργού ρήγματος του Καπαρελλίου είναι πολύ μικρός για να προκαλέσει αύξηση των τιμών μετατόπισης. Βέβαια, ας έχουμε υπό όψη ότι τα αποτελέσματα αυτά, δηλαδή οι τιμές που προέκυψαν, είναι εκπεφρασμένες και συνδεδεμένες με το χρόνο, για παράδειγμα σύμφωνα και με τις παραπάνω εικόνες θα μπορούσαμε να πούμε ότι η μετατόπιση στον οικισμό του Καπαρελλίου είναι περίπου 2 - 3mm/χρόνο, όμως είναι μια ετήσια μετατόπιση που βρίσκεται σε εξέλιξη, κυρίως εξαιτίας της ενεργότητας του ρήγματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η τεκτονική ανάλυση, η γεωμορφολογία, έως και η δομή του υδρογραφικού δικτύου της ευρύτερης περιοχής του Καπαρελλίου μαρτυρούν την ένταση των γεωλογικών φαινομένων που έχουν εκδηλωθεί μέχρι σήμερα και έχουν επηρεάσει σημαντικά την περιοχή μελέτης.

Η περιοχή μελέτης συνορεύει στα ΝΔ της περιθώρια με τον ανατολικό Κορινθιακό κόλπο, ένα από τα πιο ενεργά γεωλογικά περιβάλλοντα στον κόσμο, κάτι που καθιστά απίθανο το γεγονός ότι θα μπορούσε να μείνει ανεπηρέαστη από την έντονη τεκτονική δραστηριότητα του κόλπου. Η ευρύτερη περιοχή του Καπαρελλίου είναι γνωστή στην επιστημονική κοινότητα, κυρίως, για έναν από τους πρωταγωνιστικούς ρόλους που έπαιξε στην εκδήλωση της σεισμικής ακολουθίας του 1981. Η επαναδραστηριοποίηση τμήματος του ρήγματος του Καπαρελλίου προκάλεσε μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον και εξαιτίας της έκτασης των ζημιών που προκλήθηκαν από το σεισμικό συμβάν, η περιοχή γνώρισε μεγάλη ερευνητική αίγλη για αρκετά χρόνια μετά, έως και σήμερα, καθώς το ρήγμα του Καπαρελλίου παραμένει ενεργό.

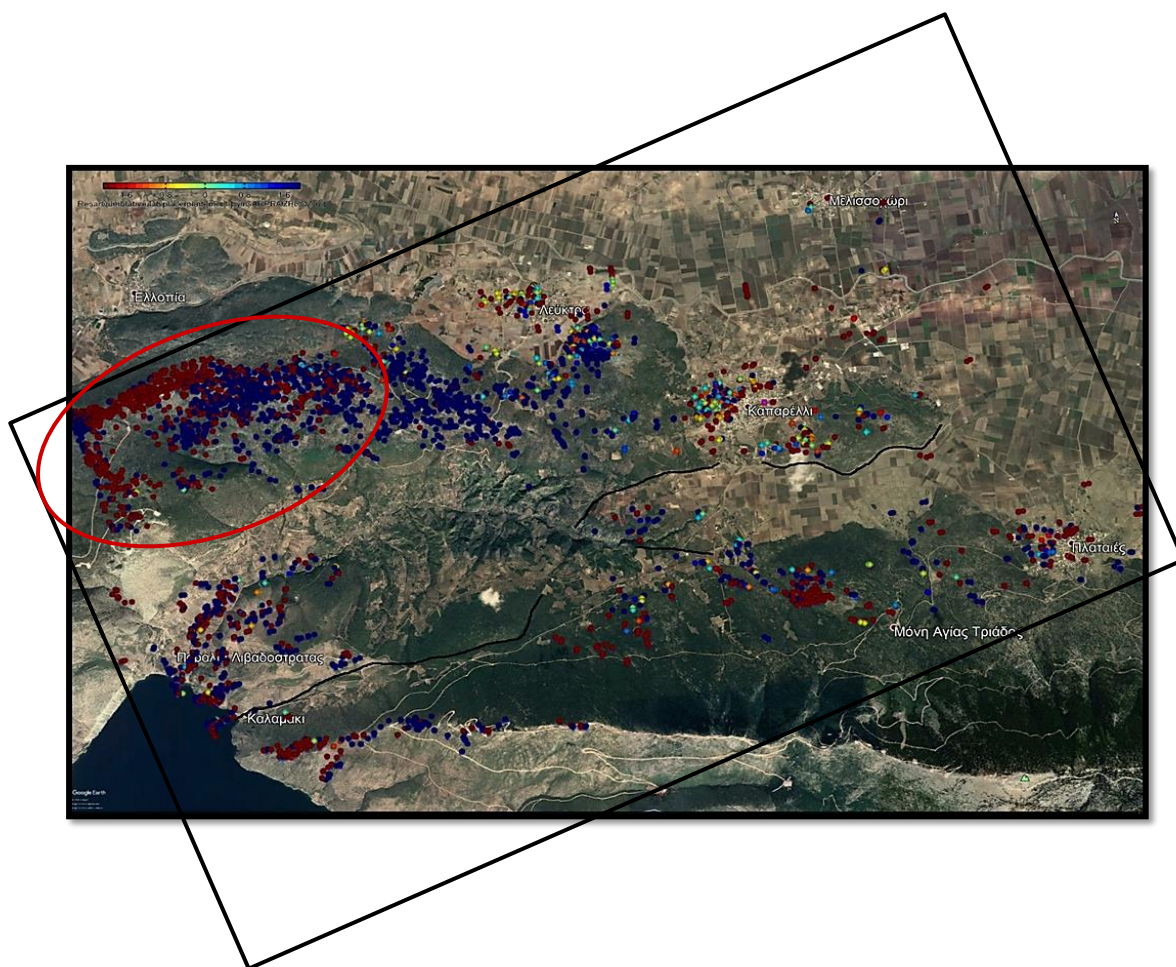
Με το πέρασ αυτής της εργασίας, στόχος ήταν η αποτύπωση αυτού του ενεργού ρήγματος, η χαρτογράφησή του και η προσπάθεια προσδιορισμού της παραμόρφωσης-μετατόπισης που προκαλεί στους οικισμούς και στη γύρω περιοχή, με τη χρήση της συμβολομετρίας.

Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, η λεπτομερειακή σημειακή αποτύπωση του υψομέτρου της κατοπτρικής επιφάνειας του ρήγματος προσφέρει νέα δεδομένα και πληροφορίες για το ρήγμα του Καπαρελλίου, ενώ κατέστη δυνατός σε ικανοποιητικό βαθμό ο προσδιορισμός της παραμόρφωσης του εδάφους στην περιοχή (μέθοδος PSI).

Η μέθοδος της συμβολομετρίας που χρησιμοποιήθηκε, βοήθησε στον εντοπισμό κάποιων σημείων-στόχων στην επιφάνεια του εδάφους της περιοχής μελέτης, τα οποία οδηγούν σε αποτελέσματα ως προς τη μετατόπισή τους σε σχέση με το χρόνο. Αν εξαιρέσουμε το γεγονός ότι τα περισσότερα σημεία-στόχοι βρίσκονται στους ορεινούς όγκους της περιοχής

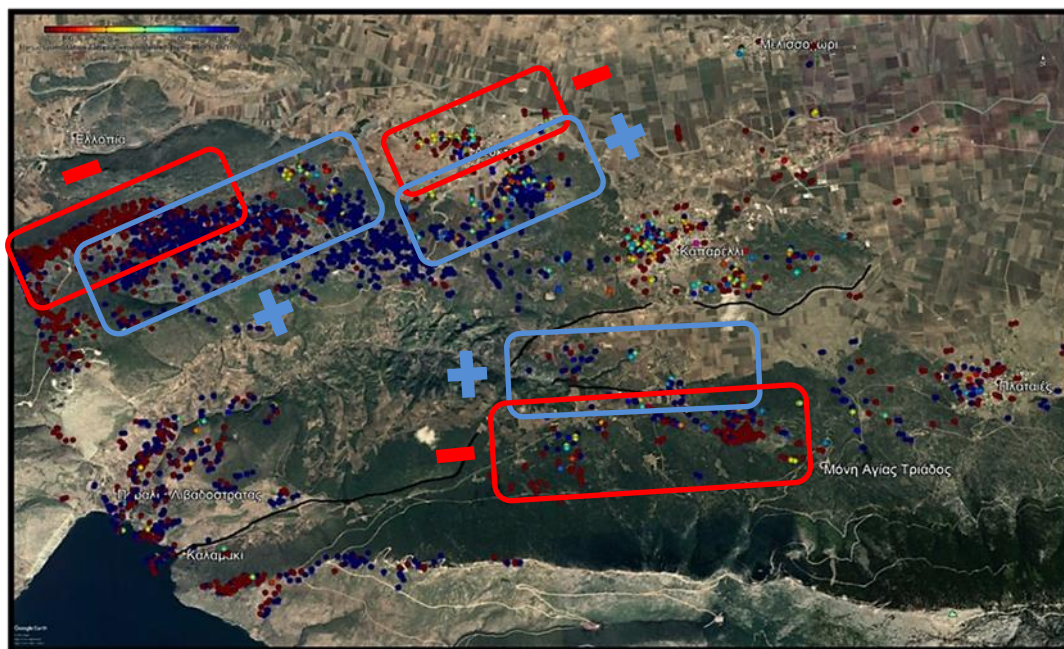
και ελάχιστοι στην πεδιάδα (μαλακά, χαλαρά ιζήματα, όχι καλή ανάκλαση σήματος προς το δορυφόρο), ήταν εφικτή η εξαγωγή αποτελεσμάτων για όλη την περιοχή μελέτης. Όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενες παραγράφους (5.2.1., 5.2.2. και 5.2.3.), φαίνεται να υπάρχουν μετατοπίσεις μέσα στους οικισμούς του Καπαρελλίου, των Πλαταιών και του Καλαμακίου, αλλά και στην πεδιάδα μεταξύ αυτών των περιοχών που οφείλονται, κυρίως, στην ενεργότητα του ρήγματος.

Εκτός των περιοχών που αναφέρθηκαν προηγουμένως, υπάρχει ένα τμήμα στα ΒΔ της περιοχής μελέτης, πάνω από τον οικισμό της Λιβαδόστρας, όπου φαίνεται μία αρκετά μεγάλη συγκέντρωση σημείων-στόχων, μάλιστα η ανοδική δορυφορική τροχιά την απεικονίζει με μία γραμμικότητα διεύθυνσης σχεδόν ΒΑ - ΝΔ (Εικόνα 62). Αυτή η απεικόνιση των σημείων θα μπορούσε να μας οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι σε εκείνη την περιοχή υπάρχει πιθανά κάποιο ρήγμα που προκαλεί κάποια μετατόπιση, όπως φαίνεται και από τη διαφορά στο χρώμα των σημείων. Δεν είναι σίγουρο τί ακριβώς υπάρχει εκεί, διότι δεν υπάρχει κάποια αναφορά ή κάποια υπόδειξη σε γεωλογικό χάρτη έως σήμερα, όμως ούτε πραγματοποιήθηκε έρευνα πεδίου, καθώς απέχει αρκετά από την περιοχή ενδιαφέροντος και είναι ένα οπτικό αποτέλεσμα που προέκυψε αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία της μεθόδου PS. Παρ' όλα αυτά, είναι κάτι που αξίζει να ερευνηθεί στο μέλλον.



Εικόνα 62. Οι στόχοι της ανοδικής δορυφορικής τροχιάς. Με μαύρο πλαίσιο οριοθετείται η περιοχή που επεξεργάστηκε στο SARPROZ. Με την κόκκινη έλλειψη επισημαίνεται η γραμμική συγκέντρωση στόχων, μακριά από την περιοχή ενδιαφέροντος (Λιβαδόστρα).

Από τα αποτελέσματα των χρονοσειρών που προκύπτουν για τις δύο δορυφορικές τροχιές, μπορούμε να παρατηρήσουμε, και με τη βοήθεια της παρακάτω εικόνας (Εικόνα 63), τη συγκέντρωση των σημείων – στόχων υπό μία μορφή ζώνωσης παράλληλης στην έκταση του ρήγματος. Η ζώνωση αυτή είναι πιο εμφανής στη χρονοσειρά των σημείων – στόχων της ανοδικής τροχιάς, ενώ σε αυτή της καθοδικής τροχιάς δε μπορούμε να διακρίνουμε την ίδια μορφή ζώνωσης, και αυτό έχει να κάνει κυρίως με την τροχιά λήψης του δορυφόρου.



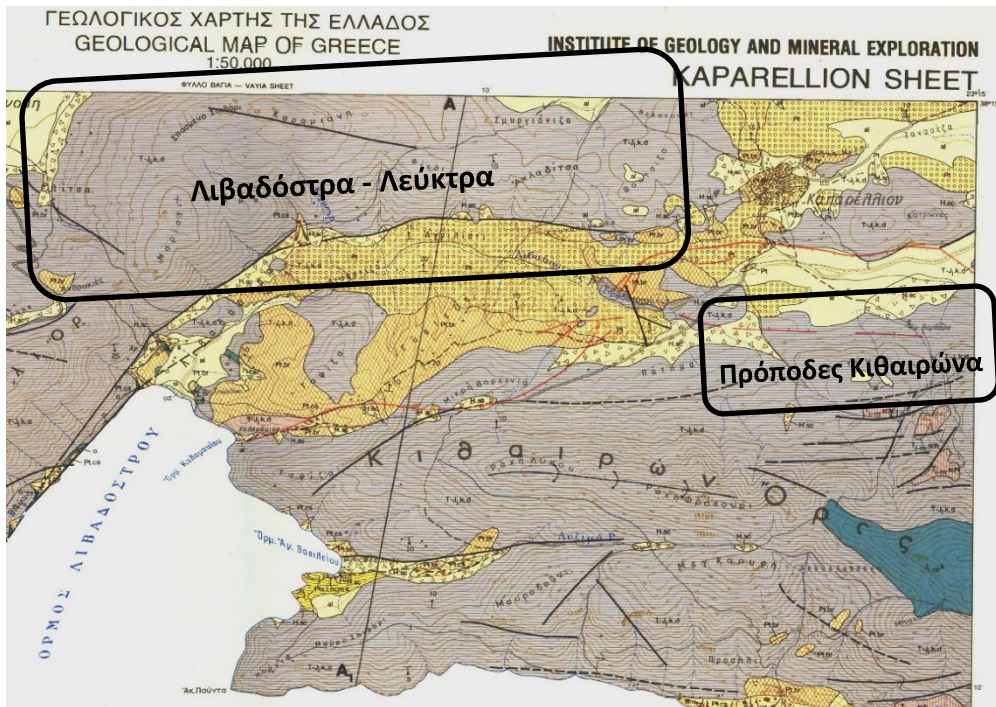
Εικόνα 63. Οι περιοχές που παρουσιάζουν γραμμική συγκέντρωση ανακλαστήρων – ζώνωση στην ευρύτερη περιοχή του Καπαρελλίου.

Είναι δυνατό να διακρίνουμε, λοιπόν, δύο μεγάλες ζώνες – περιοχές:

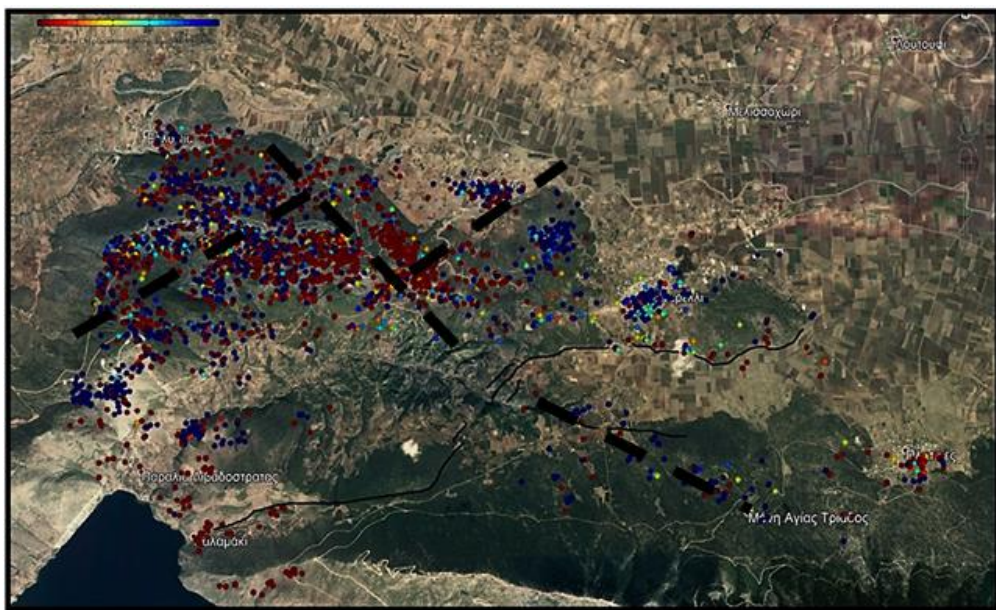
1. Μία εσωτερική ζώνη, η οποία οριοθετείται από τις ζώνες με θετικές τιμές (+) και φαίνεται να κινούνται προς τον δορυφόρο, και
2. Μία εξωτερική ζώνη, αρνητικών τιμών (-), η οποία περικλείει την πρώτη ζώνη των θετικών τιμών και φαίνεται να απομακρύνεται από το δορυφόρο.

Οι ζώνες αυτές των σημείων που παρατηρήθηκαν, δεν μπορούν να αποδοθούν με βεβαιότητα σε κάποιο γεωλογικό φαινόμενο ή κάποια ήδη χαρτογραφημένη τεκτονική δομή σε αυτές τις περιοχές, διότι, σύμφωνα και με τους γεωλογικούς χάρτες της περιοχής, δεν υπάρχουν για παράδειγμα κάποια ρήγματα, τα οποία να δικαιολογούν αυτές τις μετατοπίσεις. Στην κεντρική περιοχή, στους πρόποδες του Κιθαιρώνα, υπάρχουν δευτερογενή, μικρότερα κανονικά ρήγματα, τα οποία ίσως να ευθύνονται για τη μετατόπιση που παρατηρείται σε αυτή την περιοχή, όμως στις ΒΔ περιοχές, δεν έχει χαρτογραφηθεί καμία τεκτονική δομή στην οποία θα μπορούσε να οφείλονται οι μετατοπίσεις που παρατηρούνται κοντά στους οικισμούς της Λιβαδόστρας και των Λεύκτρων. Η μόνη τεκτονική δομή που υπάρχει στην περιοχή αυτή της Λιβαδόστρας – Λεύκτρων είναι το ρήγμα της Λιβαδόστρας, του οποίου η διεύθυνση είναι σύμφωνη με τη διεύθυνση διάταξης των ανακλαστήρων, όμως βρίσκεται νοτιότερα, στους πρόποδες του

όρους Κορομπίλι, άρα δεν μπορούμε να αποδώσουμε σε αυτό το ρήγμα την μετατόπιση που φαίνεται να υπάρχει πάνω στο όρος (Εικόνα 64).



Εικόνα 64. Τμήμα του γεωλογικού φύλλου Καπαρέλλιον. Εδώ, φαίνονται οι δύο περιοχές κοντά στον οικισμό του Καπαρέλλιου που παρουσιάζουν τη στρωμάτωση – ζώνωση των ανακλαστήρων που προαναφέρθηκαν. Στους πρόποδες του όρους Κιθαιρώνα φαίνονται οι τεκτονικές δομές που έχουν αναγνωρισθεί και χαρτογραφηθεί, ενώ στην περιοχή Λιβαδόστρας – Λεύκτρων φαίνεται πως δεν υπάρχουν αναγνωρισμένες τεκτονικές δομές που να αντιστοιχούν και να δικαιολογούν τη διαφοροποίηση των ανακλαστήρων που παρατηρήθηκε.



Εικόνα 65. Η χρονοσειρά των ανακλαστήρων της καθοδικής τροχιάς του δορυφόρου. Περισσότερα σημεία – στόχοι στα ΒΔ της περιοχής με πιο χαοτική διάταξη. Με έντονες, μαύρες, διακεκομμένες γραμμές επισημαίνονται οι γραμμικές συγκεντρώσεις ανακλαστήρων.

Ακόμα, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 65), μπορούμε να δούμε πως κάνουν την εμφάνισή τους κάποιες γραμμικές διατάξεις, κάποιες νέες δηλαδή δομές, τόσο ΒΔ – ΝΑ όσο ΒΑ – ΝΔ διεύθυνσης, οι οποίες προκύπτουν από την παρατήρηση της μετατόπισης που προσφέρουν οι αναγνωρισμένοι ανακλαστήρες στην περιοχή. Το ενδιαφέρον με αυτές τις νεοαποκαλυφθείσες διατάξεις είναι ότι παρατηρήθηκαν με τη μέθοδο των Σταθερών Ανακλαστήρων, δηλαδή δεν αντιστοιχούν σε κάποιο χαρτογραφημένο τεκτονικό στοιχείο που υπάρχει ήδη στην περιοχή μελέτης. Φυσικά, αυτό είναι κάτι το οποίο χρήζει περαιτέρω έρευνας, κυρίως έρευνας πεδίου, ώστε να μπορέσουμε να αναγνωρίσουμε και να μελετήσουμε, εάν υπάρχουν, τεκτονικές δομές οι οποίες ίσως προκαλούν αυτές τις μετατοπίσεις.

Κάτι που θα έπρεπε να ληφθεί υπό όψη, είναι το γεγονός ότι η επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν αντιπροσώπευε μόνο ένα μικρό χρονικό διάστημα παρατήρησης εδαφικών μετατοπίσεων στην περιοχή (περίπου 4 χρόνια). Αξίζει μελλοντικά να παρακολουθηθεί η παραμόρφωση στη συγκεκριμένη περιοχή για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, δεδομένου ότι το ρήγμα είναι ενεργό.

Η μέθοδος PSI, εν τέλει, αποδείχθηκε ότι μπορεί να προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την εξέλιξη της παραμόρφωσης σε μία περιοχή, παρ' όλα αυτά υπάρχει ένα ερώτημα που αφορά τα αίτια της κίνησης που προκαλείται στην περιοχή μελέτης. Για παράδειγμα, δεν μπορούμε να διευκρινίσουμε μέσω αυτής της μεθόδου, εάν η παραμόρφωση στην πεδιάδα οφείλεται στη δράση του ρήγματος ή αν πρόκειται για παραμόρφωση που προκαλείται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως η άντληση νερού για την αξιοποίηση της κοιλάδας, καθώς πρόκειται για μία περιοχή πλήρως εκμεταλλεζόμενη γεωργικά. Επίσης, η παραμόρφωση που παρατηρείται κοντά στην περιοχή του ρήγματος, θα μπορούσε, πιθανά, να οφείλεται στον σεισμικό ερπυσμό του ρήγματος του Καπαρελλίου. Μία ακόμη πτυχή που θα πρέπει να μελετηθεί, είναι οι διακυμάνσεις στις οποίες υπόκειται το έδαφος, εξαιτίας των μεταβολών του υδρολογικού κύκλου (π.χ. περίοδοι ξηρασίας, περίοδοι κορεσμού του εδάφους σε νερό, κ.ά.), καθώς είναι μία περιοχή, η οποία μετρά αρκετές βροχερές μέρες την περίοδο του χειμώνα.

Σε σύγκριση με όλα τα παραπάνω και έχοντας υπό όψη τα αποτελέσματα που προέκυψαν, αποδείχθηκε ότι η μέθοδος PSI αποτελεί μία εξαιρετικά αξιόπιστη μέθοδο για την παρακολούθηση της εδαφικής παραμόρφωσης. Σε σχέση με άλλες μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη περιοχή, όπως η εγκατάσταση επιμηκυνσιομέτρων και η χρήση GPS, η μέθοδος των σταθερών ανακλαστήρων αποδεικνύεται πιο αποτελεσματική, όσον αφορά στον όγκο και την ποιότητα των αποτελεσμάτων. Τα επιμηκυνσιομέτρα είναι όργανα, τα οποία καταγράφουν κινήσεις που αφορούν το ρήγμα στο οποίο τα εγκαθιστούμε και αντιπροσωπεύουν ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Παρόμοια, η χρήση GPS αφορά συγκεκριμένες χρονικές περιόδους και προσφέρει πληροφορίες από επιλεγμένα σημεία της περιοχής μελέτης κάθε φορά. Η μέθοδος PSI, είναι σαφώς πιο αποτελεσματική, διότι χρησιμοποιεί δορυφορικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από την επεξεργασία μίας βάσης δεδομένων που προσφέρει πληροφορίες σε καθημερινή βάση, ανεξαρτήτου καιρικών συνθηκών. Μπορούν να αναγνωριστούν πολλαπλά σημεία σε μία συγκεκριμένη περιοχή, τα οποία είναι δυνατό να φτάσουν πάνω από 100/Km² σε μία αστική περιοχή (πολλά περισσότερα σημεία από

σταθμούς GPS). Τα αποτελέσματα της παραμόρφωσης που παίρνουμε από την επεξεργασία δίνονται με ακρίβεια mm (με λεπτομέρειες για κάθε σημείο της περιοχής). Οι δορυφόροι που χρησιμοποιούνται προσφέρουν εικόνες πολύ υψηλής ποιότητας και ανάλυσης και αποτελούν όργανα, τα οποία ελέγχονται και συντηρούνται συνεχώς, σε αντίθεση με τα επιμηκυνσιόμετρα και τα όργανα GPS που δεν τυγχάνουν της ίδιας προσοχής και συντήρησης.

Σίγουρα υπάρχουν κι άλλες μέθοδοι, με τις οποίες γίνεται η παρακολούθηση της παραμόρφωσης, συσχετιζόμενες με τη Συμβολομετρία και μη, όμως η μέθοδος PSI που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία μπορούμε να πούμε ότι σε κάθε περίπτωση δίνει τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, σύμφωνα με όλα τα παραπάνω και συγκριτικά με άλλες μεθόδους που έχουν δοκιμαστεί στην ευρύτερη περιοχή του Καπαρελλίου.

Ενδεχομένως, η γεωμετρία της περιοχής να είναι πιο σύνθετη, το δίκτυο των ρηγμάτων της περιοχής είναι πυκνότερο και ίσως να υπάρχουν μικρότερης τάξης ρηξιγενείς δομές, οι οποίες είτε δεν δραστηριοποιήθηκαν είτε δεν προκάλεσαν τέτοιες μετατοπίσεις ώστε να αναγνωριστούν από την εργασία υπαίθρου. Για το λόγο αυτό, λοιπόν, αξίζει στο μέλλον να γίνει μία πιο λεπτομερής χαρτογράφηση της ευρύτερης περιοχής, έτσι ώστε να αναγνωρισθούν, εφόσον υπάρχουν, όποιες τεκτονικές δομές που μπορούν να δικαιολογούν αυτές τις εδαφικές μετατοπίσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το ρήγμα του Καπαρελλίου παρουσιάζει χαμηλό ετήσιο ρυθμό ολίσθησης (<1mm/χρόνο), όμως η κίνηση αυτή είναι αρκετή για να μας δώσει στοιχεία για την παρακολούθηση της ετήσιας μετατόπισης-παραμόρφωσης που προκαλεί στην ευρύτερη περιοχή του Καπαρελλίου.

Η διεύθυνση έκτασης του ρήγματος του Καπαρελλίου είναι παράλληλη στον Κορινθιακό κόλπο. Σε σχέση με το δορυφόρο, η έκταση του ρήγματος γίνεται, επίσης, παράλληλα στο αζιμούθιο των τροχιών, γεγονός που μπορεί να δυσχεράνει τη διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων όσον αφορά την παραμόρφωση.

Μέσω της μεθόδου της συμβολομετρίας που χρησιμοποιήσαμε, δεν μπορούμε να γνωρίζουμε εάν η κίνηση των ανακλαστήρων που αναγνωρίστηκαν στην περιοχή μελέτης είναι κατακόρυφη ή οριζόντια. Γι' αυτό, λοιπόν, όταν αναφερόμαστε στην κίνηση που εμφανίζουν τα σημεία στην περιοχή λέμε ότι πλησιάζουν ή ότι απομακρύνονται από τον δορυφόρο και κάνουμε λόγο για πιθανή ανύψωση ή αντίστοιχα πιθανή καθίζηση στην περιοχή.

Η χρήση της τεχνικής της Συμβολομετρίας Σταθερών Ανακλαστήρων και ο συνδυασμός της με δεδομένα υπαίθρου, για την τεκτονική της περιοχής μελέτης, οδήγησε στα εξής αποτελέσματα, όσον αφορά στην παραμόρφωση της περιοχής:

- I. Το κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης, και συγκεκριμένα η πεδιάδα μεταξύ Καπαρελλίου – Πλαταιών φαίνεται πως απομακρύνεται από το δορυφόρο, άρα μπορούμε, ίσως, να πούμε ότι η πεδιάδα υφίσταται καθίζηση.
- II. Οι οικισμοί του Καπαρελλίου και των Πλαταιών είναι σχετικά σταθεροί. Φαίνεται να υπάρχει μία σχετική κίνηση και στους δύο οικισμούς, με αυτόν του Καπαρελλίου να παρουσιάζει κίνηση προς τον δορυφόρο και αυτόν των Πλαταιών να παρουσιάζει κίνηση απομάκρυνσης από τον δορυφόρο. Οπότε, μπορούμε να πούμε ότι το Καπαρέλλι φαίνεται πιθανά να ανυψώνεται, ενώ οι Πλαταιές πιθανά να υφίστανται καθίζηση. Το Καπαρέλλι και οι Πλαταιές παρουσιάζουν ετήσια μετατόπιση (πιθανή ανύψωση, πιθανή καθίζηση αντίστοιχα) μερικά mm/χρόνο (~1-2 mm/χρόνο).
- III. Επίσης, αναγνωρίστηκε ετήσια μετατόπιση στο Καλαμάκι, με τη βόρεια πλευρά του φαραγγιού να κινείται προς τον δορυφόρο (πιθανή ανύψωση) και τη νότια πλευρά του φαραγγιού να απομακρύνεται από τον δορυφόρο (πιθανή καθίζηση).
- IV. Παρατηρήθηκαν γραμμικές συγκεντρώσεις ανακλαστήρων σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν χαρτογραφημένες τεκτονικές δομές. Ίσως, η τεκτονική στην περιοχή είναι πιο σύνθετη, για αυτό κρίνεται απαραίτητη στο μέλλον επιπλέον έρευνα, προκειμένου να χαρακτηριστούν οι δομές που προκαλούν αυτές τις μετατοπίσεις του εδάφους.
- V. Τέλος, είναι απαραίτητο να υπάρξει συνέχεια στην παρακολούθηση της περιοχής με συμβολομετρικές μεθόδους, προκειμένου να μπορέσουμε να καταλήξουμε σε ασφαλέστερα συμπεράσματα όσον αφορά στην παραμόρφωση που υφίσταται.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abercrombie, R. E., Main, I. G., Douglas, A., Burton, P. W., The nucleation and rupture process of the 1981 Gulf of Corinth earthquakes from deconvolved broad-band data, *Geophys. J. Int.*, v. 120, p. 393-405, 1995.
- Ambraseys, N. N., Jackson, J. A., Seismicity and associated strain of central Greece between 1890 and 1988, *Geophys. J. Int.*, v. 101, p. 663-708, 1990.
- Armijo, R., Meyer, B., King, G. C. P., Rigo, R., Papanastassiou, D., Quaternary evolution of the Corinth Rift and its implications for the Late Cenozoic evolution of the Aegean, *Geophys. J. Int.*, 126, p. 11-53, 1996.
- Beckers, A., Hubert-Ferrari, A., Beck, C., Bodeux, S., Tripsanas, E., Sakellariou, D., De Batist, M., Active faulting at the western tip of the Gulf of Corinth, Greece, from high-resolution seismic data, *Marine Geology*, v. 360, p. 55–69, 2015.
- Bell, R. E., Tectonic Evolution of the Corinth Rift, University of Southampton, 2008.
- Benedetti, L., Finkel, R., King, G., Armijo, R., Papanastassiou, D., Ryerson, F. J., Flerit, F., Farber, D., Stavrakakis, G., Motion on the Kaparelli fault (Greece) prior to the 1981 earthquake sequence determined from ³⁶Cl cosmogenic dating, *Terra Nova*, v. 15, p. 118–124, 2003.
- CHAMOT-ROOKE, N., RANGIN, C., & LE PICHON, X. (2005). DOTMED (Deep Offshore Tectonics of the Mediterranean): A Synthesis of deep marine data in the Eastern Mediterranean. *Mémoires de la Société géologique de France (1924)*, 177.
- Chatzipetros, A., Kokkalas, S., Pavlides, S., Koukouvelas, I., Palaeoseismic data and their implication for active deformation in Greece, *Journal of Geodynamics*, v. 40, p. 170–188, 2005.
- Clarke, P. J., Tectonic Motions and Earthquake Deformation in Greece from GPS Measurements, Faculty of Physical Sciences, University of Oxford, 1996.
- Crider, J. G., Pollard, D. D., Fault linkage: Three-dimensional mechanical interaction between echelon normal faults, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 103, NO. B10, PAGES 24,373-24,391, 1998.
- DRAKATOS, G., PETRO, L., GANAS, A., MELIS, N., KOŠŤÁK, B., KONTNY, B., CACON, S., STERCZ, M., MONITORING OF STRAIN ACCUMULATION ALONG ACTIVE FAULTS IN THE EASTERN GULF OF CORINTH: INSTRUMENTS AND NETWORK SETUP, *Acta Geodyn. Geomater.* Vol.2, No.1 (137), p. 13-23, 2005.
- Ferrill, D. A., Stamatakos, J. A., Sims, D., Normal fault corrugation: implications for growth and seismicity of active normal faults, *Journal of Structural Geology*, v. 21, p.1027±1038, 1999.
- GANAS, A., BOSY, J., PETRO, L., DRAKATOS, G., KONTNY, B., STERCZ, M., MELIS, N. S., CACON, S., KIRATZI, A., MONITORING ACTIVE STRUCTURES IN EASTERN CORINTH GULF (GREECE): THE KAPARELLI FAULT, *Acta Geodyn. Geomater.*, Vol. 4, No. 1 (145), P. 67-75, 2007.
- Ganas, A., Drakatos, G., Bosy, J., Petro, L., Kontny, B., Stercz, M., Melis, N. S., Cacon, S.,

- Papanikolaou, M., Pirentis, A., Kiratzi, A., COST Action 625 Results: Monitoring of the Kaparelli fault, 2003-2006, Bulletin of the Geological Society of Greece, vol. XXXX, 2007.
- Gkika, F., Tselentis, G.-A., Danciu, L., Seismic risk assessment of Corinth Canal, Greece, Coastal Engineering, WIT Transactions on The Built Environment, Vol 78, 2005.
- Jackson, J, A., Gagnepain, J., Houseman, G., King, G, C, P., Papadimitriou, P., Soufleris, C., Virieux, J., Seismicity, normal faulting, and the geomorphological development of the Gulf of Corinth (Greece)" the Corinth earthquakes of February and March 1981, Earth and Planetary Science Letters, v. 57, p. 377-397, 1982.
- Kokkalas, S., Koukouvelas, I, K., Fault-scarp degradation modeling in central Greece: The Kaparelli and Eliki faults (Gulf of Corinth) as a case study, Journal of Geodynamics, v. 40, p. 200–215, 2005.
- KOKKALAS, S., PAVLIDES, S., KOUKOUVELAS, K., GANAS, A., STAMATOPOULOS, L., Paleoseismicity of the Kaparelli fault (eastern Corinth Gulf): evidence for earthquake recurrence and fault behavior, Boll.Soc.Geol.It. (Ital.J.Geosci.), Vol. 126, No. 2, pp. 387-395, 2007.
- LEEDER, M, R., PORTMAN, C., ANDREWS, J, E., COLLIER, R, E, LL., FINCH, E., GAWTHORPE, R, L., MCNEILL, L, C., PEREZ-ARLUCEA, M., ROWE, P., Normal faulting and crustal deformation, Alkyonides Gulf and Perachora peninsula, eastern Gulf of Corinth rift, Greece, Journal of the Geological Society, London, Vol. 162, pp. 1–13, 2005.
- Lykousis, V., Sakellariou, D., Moretti, I., Kaberi, H., Late Quaternary basin evolution of the Gulf of Corinth: Sequence stratigraphy, sedimentation, fault–slip and subsidence rates, Tectonophysics, v. 440, p. 29–51, 2007.
- Marinou, A., Ganas, A., Papazissi, K., Paradissis, D., Strain patterns along the Kaparelli–Asopos rift (central Greece) from campaign GPS data, ANNALS OF GEOPHYSICS, 58, 2, 2015.
- Nixon, C, W., McNeill, L, C., Bull, J, M., Bell, R, E., Gawthorpe, R, L., Henstock, T, J., Christodoulou, D., Ford, M., Taylor, B., Sakellariou, D., Ferentinos, G., Papatheodorou, G., Leeder, M, R., Collier, R, E, Ll., Goodliffe, A, M., Sachpazi, M., Kranis, H., Rapid spatiotemporal variations in rift structure during development of the Corinth Rift, central Greece, AGU Tectonics, 2016.
- Nomikou, P., Alexandri, M., Lykousis, V., Sakellariou, D., Ballas, D., SWATH BATHYMETRY AND MORPHOLOGICAL SLOPE ANALYSIS OF THE CORINTH GULF, 2nd INQUA-IGCP-567 International Workshop on Active Tectonics, Earthquake Geology, Archaeology and Engineering, Corinth, Greece, 2011.
- Pantostli, D., Collier, R., D'Addeziol, G., Masana, E., Sakellariou, D., Direct geological evidence for prior earthquakes on the 1981 Corinth fault (central Greece), GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, v.23, no. 25, p. 3795-3798, 1996.
- Papazachos, B, C., Comninakis, P, E., Papadimitriou, E, E., Scordilis, E, M., Properties of the February – March 1981 seismic sequence in the Alkyonides Gulf of Central Greece, Annales Geophysicae, 1984.
- POSCOLIERI, M., LAGIOS, E., GREGORI, G. P., PAPARO, G., SAKKAS, V. A., PARCHARIDIS, I., MARSON, I., SOUKIS, K., VASSILAKIS, E., ANGELUCCI, F., VASSILOPOULOU, S., Crustal stress and seismic activity in the Ionian archipelago as inferred by

- satellite- and ground-based observations, Kefallinia, Greece, Geological Society, London, Special Publications, 261, p. 63–78
- POULIMENOS, G., DOUSOS, T., BARRIERS ON SEISMOGENIC FAULTS IN CENTRAL GREECE, J. Geodynamics Vol. 22. No. 1/2, pp. 119-135, 1996.
- Roberts, G., Papanikolaou, I., Vött, A., Pantosti, D., Hadler, H., Active Tectonics and Earthquake Geology of the Perachora Peninsula and the Area of the Isthmus, Corinth Gulf, Greece, Field Trip Guide, 2011.
- Rotevatn, A., Peacock, D, C, P., Strike-slip reactivation of segmented normal faults: implications for basin structure and fluid flow, Basin Research, 2018.
- Sakellariou, D., Lykousis, V., Alexandri, S., Kaberi, H., Rousakis, G., Nomikou, P., Georgiou, P., Ballas, D., Faulting, seismic-stratigraphic architecture and Late Quaternary evolution of the Gulf of Alkyonides Basin-East Gulf of Corinth, Central Greece, Basin Research, v. 19, p. 273–295, 2007.
- Stiros, S, C., Psimoulis, P., Pitharouli, S., Geodetic constraints to the kinematics of the Kapareli fault, reactivated during the 1981, Gulf of Corinth earthquakes, Tectonophysics, v. 440, p. 105–119, 2007.
- Theodoratou, C, S., Differential interferometry land deformation analysis in Cephalonia due to seismic activity, Master Thesis, Volos, 2018.
- Tsodoulos, I, M., Koukouvelas, I, K., Pavlides, S., Tectonic Geomorphology of the easternmost extension of the Gulf of Corinth (Beotia, Central Greece).
- Wiatr, T., Reicherter, K., Papanikolaou, I., TERRESTRIAL LASER SCANNING OF AN ACTIVE FAULT IN GREECE: KAPARELLI FAULT, 1st INQUA-IGCP-567 International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology, Baelo Claudia, Spain, 2009.
- Xin-Sheng, X., Xiao-Ping, R., Mechanical analysis of en echelon structure and its significance of controlling earthquakes, ACTA SEISMOLOGICA SINICA, Vol. 7 No. 1, p. 55—65, 1994.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ανδρονούπουλου, Β., Σεισμοί και Τεχνική Γεωλογία, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Τμήμα Δυτικής Μακεδονίας.
- Βαλκανιώτης, Σ., Συσχέτιση Νεοτεκτονικών Δομών και Σεισμικότητας στην Ευρύτερη Περιοχή του Κορινθιακού Κόλπου (Κεντρική Ελλάδα), Διπλωματική εργασία, Θεσσαλονίκη, 2009.
- Γκέντσος, Κ., ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΔΟΥΡΥΦΟΡΟΥ SENTINEL-1 ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΤΟΥ, ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ, ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, Θεσσαλονίκη, 2013.
- ΔΕΛΗΚΑΡΑΟΓΛΟΥ, Δ., ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ, ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ SAR, Σημειώσεις.
- Ζαναρίρι, Ε., Τσόμπος, Π., Φωτιάδης, Α., Χιώτης, Ε., Η ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ ΣΕ ΔΙΕΘΝΕΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ. ΙΔΙΑΙΤΕΡΗ

- ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΑΧΩΡΑ ΛΟΥΤΡΑΚΙΟΥ, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τομ. XXXVI, 2008.
- Ζυγούρη, Β., Αλληλεπίδραση ρηγμάτων και Σεισμική επικινδυνότητα στον Ανατολικό Κορινθιακό, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2009.
- ΚΑΛΟΓΕΡΑΣ, Η., Συσχέτιση του μεγέθους σεισμικών μετατοπίσεων με τα γεωλογικά χαρακτηριστικά των ρηγμάτων στον Ελληνικό χώρο, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΑΘΗΝΑ, 2012.
- ΚΟΛΙΟΠΟΥΛΟΣ, Κ., ΝΟΜΑΡΧΙΑΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΝΟΜΟΥ ΒΟΙΩΤΙΑΣ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ, ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ, ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ, 2005.
- Λέτσιος, Β., Δεδομένα Ραντάρ: ανάλυση επιφανειακών εδαφικών παραμορφώσεων μέσω συμβολομετρίας στην ευρύτερη περιοχή της λίμνης Κάρλας, Διπλωματική εργασία, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ, Βόλος, 2017.
- Λόζιος, Αναγνώριση ρηγμάτων στο ύπαιθρο, Κεφάλαιο 8, Σημειώσεις Τεκτονικής Γεωλογίας Παναγοπούλου, Α., ΡΗΞΙΓΕΝΗΣ ΙΣΤΟΣ, ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ Σ.Γ.Π. ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2017.
- ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ, Δ., ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΕΛΛΑΔΑΣ, 1986
- ΠΑΠΑΝΤΩΝΙΟΥ, Γ, Α., ΔΟΜΗ ΚΑΙ Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΚΥΡΟΥ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ – ΒΟΡΕΙΟ ΑΙΓΑΙΟ, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΑΘΗΝΑ, 2015.
- Παρχαρίδης, Ι., Αρχές δορυφορικής τηλεπισκόπησης, Θεωρία και Εφαρμογές, Ηλεκτρονικό Σύγγραμμα, 2015.
- Παρχαρίδης, Ι., Χαρτογράφηση της Εδαφικής Παραμόρφωσης στη περιοχή του νομού Ηλείας με την Χρήση της Διαφορικής Συμβολομετρίας από Δορυφόρους Ραντάρ, Μελέτη, ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ, ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ, Αθήνα, 2009.
- Παυλίδης, Σ., κ.ά., ΠΑΛΑΙΟΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΑ ΕΝΕΡΓΑ ΡΗΓΜΑΤΑ ΤΗΣ ΒΟΛΒΗΣ (ΜΥΓΔΟΝΙΑ – Κ. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ), ΩΡΩΠΟΥ – ΑΥΛΩΝΑ – ΚΑΠΑΡΕΛΛΙΟΥ (ΑΤΤΙΚΗ – ΒΟΙΩΤΙΑ – ΣΤΕΡΕΑ ΕΛΛΑΔΑ), Ερευνητικό έργο, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2003.
- ΤΣΟΔΟΥΛΟΣ, Ι, Μ., ΕΝΕΡΓΟΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΝΑ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ, ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ, ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗΣ, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ, ΠΑΤΡΑ, 2009.
- Φλίγκου, Μ., ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ ΣΤΗ ΒΟΙΩΤΙΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, Αθήνα, 2012.