



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Τμήμα Γεωγραφίας

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

``Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και Διαχείριση του Χώρου``

Κατεύθυνση ``Διαχείριση και Ανάλυση Γεωγραφικών Δεδομένων``
(Γεωπληροφορική)

Διαχρονική Συμβολομετρία Ραντάρ για την ανίχνευση της επιφανειακής
παραμόρφωσης στην περιοχή του Φράγματος Μόρνου για την χρονική
περίοδο (1993-2010)

Διπλωματική εργασία του

Σπύρου Νεοκοσμίδη

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Τμήμα Γεωγραφίας

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

``Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και Διαχείριση του Χώρου``

Κατεύθυνση ``Διαχείριση και Ανάλυση Γεωγραφικών Δεδομένων``
(Γεωπληροφορική)

Διαχρονική Συμβολομετρία Ραντάρ για την ανίχνευση της επιφανειακής
παραμόρφωσης στην περιοχή του Φράγματος Μόρνου για την χρονική
περίοδο (1993-2010)

Διπλωματική εργασία του

Σπύρου Νεοκοσμίδη

Επιβλέπων καθηγητής:
Ισαάκ Παρχαρίδης,
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος	9
Περίληψη	11
Abstract	12
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	13
Κεφάλαιο 2 Περιοχή μελέτης	15
2.1 Γενικά στοιχεία	15
2.2 Γεωλογικό υπόβαθρο	16
2.2.1 Γεωτεκτονική δομή.....	16
2.2.1.1 Ζώνη Ωλονού- Πίνδου.....	18
2.2.1.2 Σειρά Βαρδουσίων.....	21
2.2.1.3 Ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας.....	22
2.3 Νεοτεκτονική δομή	27
2.4 Σεισμικότητα	28
Κεφάλαιο 3 Φράγματα.....	31
3.1 Σκοπός Κατασκευής.....	31
3.2 Τύποι Φραγμάτων	32
3.3 Αστοχία Φραγμάτων – αίτια και αποτελέσματα	33
3.4 Το φράγμα του Μόρνου	35
3.4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	37
Κεφάλαιο 4 Δορυφορικά Συστήματα Παρακολούθησης	39
4.1 Συστήματα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος.....	40
4.1.1 Γενικά στοιχεία.....	40
4.1.2 Γεωμετρία εικονοληψίας συστημάτων SAR	41
4.1.3 Χαρακτηριστικά SAR απεικονίσεων.....	44
4.1.4 Δορυφορικά συστήματα ERS και ENVISAT.....	45
4.2 Συμβολομετρία Ραντάρ	48
4.2.1 Βασικές αρχές της Συμβολομετρίας.....	49
4.2.2 Διαφορική Συμβολομετρία Ραντάρ	52

4.2.2.1 Μεθοδολογία Σώρευση Διαφορικών Συμβολογραμάτων (Stacking)	54
4.2.2.2 Μέθοδος Small Baseline Subset (SBAS)	55
Κεφάλαιο 5 Δεδομένα και μεθοδολογία	57
5.1 Δεδομένα SAR απεικονίσεων	57
5.2 Επεξεργασία SAR απεικονίσεων	62
5.2.1 Μετατροπή των SLC εικόνων σε MLI και βελτίωση των τροχιακών δεδομένων.	63
5.2.2 Συμπροσαρμογή (co-registration)	63
5.2.3 Υπολογισμός της βασικής συμβολομετρικής γραμμής	65
5.2.5 Παραγωγή Απλού Συμβολογράματος	68
5.2.8 Εκτύλιξη Συμβολομετρικής Φάσης (Phase Unwrapping).....	70
5.2.9 Σώρευση Διαφορικών Συμβολογραμάτων και εφαρμογή του αλγορίθμου SVD	74
Κεφάλαιο 6 Αποτελέσματα.....	75
6.1 Ανάλυση σε ευρεία κλίμακα (Regional Scale)	75
6.1.1 Διαχρονική εδαφική παραμόρφωση για την χρονική περίοδο 1993-2000.....	76
6.1.2 Διαχρονική εδαφική παραμόρφωση για την χρονική περίοδο 2003-2010.....	87
6.2 Ανάλυση σε τοπική κλίμακα (Local scale)	99
6.2.1 Διαχρονική εδαφική παραμόρφωση για την χρονική περίοδο 2003-2010.....	99
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα	104
Βιβλιογραφία	106

Πίνακας Περιεχομένων Εικόνων

Εικόνα 1: Γεωμορφολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης. (πηγή: ίδια επεξεργασία)	16
Εικόνα 2: Γεωγραφική εξάπλωση της Γεωτεκτονικής Ζώνης Πίνδου (πηγή: Μουντράκης, 1985)	18
Εικόνα 3: Στρωματογραφική κολώνα της ενότητας Πίνδου. (πηγή: Ζαμπετάκη, 2011)	21
Εικόνα 4: : Γεωγραφική εξάπλωση της Γεωτεκτονικής Ζώνης Παρνασσού	23
Εικόνα 5: Στρωματογραφική κολώνα της ενότητας Παρνασσού. (πηγή: Ζαμπετάκη, 2011)	25
Εικόνα 6: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης (πηγή: ΙΓΜΕ, ίδιας επεξεργασίας).....	26
Εικόνα 7: Τεκτονικός χάρτης του Κορινθιακού κόλπου (πηγή: Valkaniotis, 2009).....	28
Εικόνα 8: Σεισμικότητα της ευρύτερης περιοχής του Κορινθιακού κόλπου	29
Εικόνα 9: Μηχανισμοί γένεσης των κυριότερων σεισμικών γεγονότων του Κορινθιακού κόλπου	30
Εικόνα 10: Δορυφορική εικόνα του Φράγματος Μόρνου και της λεκάνης απορροής.	36
Εικόνα 11: Η κατάντη (Αριστερά) και ανάντη (Δεξιά) πλευρά του φράγματος Μόρνου.	36
Εικόνα 12: Τυπική διατομή του φράγματος Μόρνου	38
Εικόνα 13: Κάτοψη φράγματος Μόρνου	38
Εικόνα 14: Κατηγορίες δορυφορικών συστημάτων παρακολούθησης	39
Εικόνα 15: Γεωμετρία εικονοληπτικού συστήματος SAR (Colesanti and Wasowski, 2006)	42
Εικόνα 16: Τύποι παραμορφώσεων λόγω της γεωμετρίας της παρατήρησης και του ανάγλυφου.	44
Εικόνα 17: Τα όργανα καταγραφής με τα οποία είναι εξοπλισμένος ο δορυφόρος ERS -2.....	46
Εικόνα 18: Τα όργανα καταγραφής με τα οποία είναι εξοπλισμένος ο δορυφόρος ENVISAT ...	47
Εικόνα 19: Γεωμετρία ενός συμβολογραφικού συστήματος SAR (Πηγή: Luzzi, 2010)	49
Εικόνα 20: Το πλαίσιο των εικόνων Ραντάρ ανοδικής (415) και καθοδικής (279) τροχιάς της περιοχής μελέτης	58
Εικόνα 21: Average Multi-look ERS ascending ERS descending	Εικόνα 22: Average Multi-look 64
Εικόνα 23: Average Multi-look ENVISAT ascending ENVISAT descending	Εικόνα 24: Average Multi-look 65
Εικόνα 25: Δίκτυο των ERS ascending	66
Εικόνα 26: Δίκτυο των ERS descending	66
Εικόνα 27: Δίκτυο των ENVISAT ascending.....	67
Εικόνα 28: Δίκτυο των ENVISAT descending.....	67

Εικόνα 29: Μέσος όρος επιπέδων συνοχής των ERS ascending επιπέδων συνοχής ERS descending.....	Εικόνα 30: Μέσος όρος επιπέδων συνοχής ERS descending.....
69	69
Εικόνα 31: Μέσος όρος επιπέδων συνοχής των ENVISAT επιπέδων συνοχής ENVISAT	Εικόνα 32: Μέσος όρος επιπέδων συνοχής ENVISAT
69	69
Εικόνα 33: Διαγράμματα δεδομένων GPS του σημείου αναφοράς στο Λιδωρίκι όπου φαίνεται η σταθερότητα του. (πηγή: https://gpscope.dt.insu.cnrs.fr)	
71	
Εικόνα 34: Μέση Multi look εικόνα (Average) ανοδικής τροχιάς της περιοχής μελέτης όπου...	
73	
Εικόνα 35: Χάρτης διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης στην διεύθυνση του LOS (ανοδικής τροχιάς/ERS-1,2) της ευρύτερης περιοχής του φράγματος Μόρνου για την χρονική περίοδο 1995-2000. Με κόκκινο αστέρι απεικονίζεται το επιλεγμένο σημείο αναφοράς.	
76	
Εικόνα 36: Εστιαζόμενες περιοχές (παράθυρα) αξιολόγησης του χάρτη διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης (ERS ascending).....	
77	
Εικόνα 37: Χάρτης διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης στην διεύθυνση του LOS (καθοδικής τροχιάς/ERS-1,2) της ευρύτερης περιοχής του φράγματος Μόρνου για την χρονική περίοδο 1995-2000. Με κόκκινο αστέρι απεικονίζεται το επιλεγμένο σημείο αναφοράς.	
78	
Εικόνα 38: Εστιαζόμενες περιοχές (παράθυρα) αξιολόγησης του χάρτη διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης (ERS descending).....	
79	
Εικόνα 39: Επιλεγμένα σημεία στα οποία έγινε η διαχρονική ανάλυση παραμόρφωσης	
80	
Εικόνα 40: Χάρτης διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης στην διεύθυνση του LOS (ανοδικής τροχιάς/ENVISAT) της ευρύτερης περιοχής του φράγματος Μόρνου για την χρονική περίοδο 2003-2010. Με κόκκινο αστέρι απεικονίζεται το επιλεγμένο σημείο αναφοράς.	
87	
Εικόνα 41: Εστιαζόμενες περιοχές (παράθυρα) αξιολόγησης του χάρτη διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης (Envisat ascending).....	
88	
Εικόνα 42: Χάρτης διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης στην διεύθυνση του LOS (καθοδικής τροχιάς/ENVISAT) της ευρύτερης περιοχής του φράγματος Μόρνου για την χρονική περίοδο 2003-2010. Με κόκκινο αστέρι απεικονίζεται το επιλεγμένο σημείο αναφοράς.	
89	
Εικόνα 43: Εστιαζόμενες περιοχές (παράθυρα) αξιολόγησης του χάρτη διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης (Envisat descending).....	
90	
Εικόνα 44: Επιλεγμένα σημεία στα οποία έγινε η διαχρονική ανάλυση παραμόρφωσης	
91	
Εικόνα 45: Χάρτης διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης στην διεύθυνση του LOS (ανοδικής τροχιάς/ENVISAT) στο φράγμα του Μόρνου για το χρονικό διάστημα 2003-2010. Με κόκκινο αστέρι απεικονίζεται το επιλεγμένο σημείο αναφοράς.	
99	
Εικόνα 46: Χάρτης διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης στην διεύθυνση του LOS (ανοδικής τροχιάς/ENVISAT) στο φράγμα του Μόρνου για το χρονικό διάστημα 2003-2010. Με κόκκινο αστέρι απεικονίζεται το επιλεγμένο σημείο αναφοράς.	
100	
Εικόνα 47: Γραφικό σκαρίφημα του συνδυασμού των ανοδικών και καθοδικών τροχιών προκειμένου να αναλυθούν κινήσεις τεμαχών. (Πηγή: Tele-Rilevamento Europa, 2011)	
101	
Εικόνα 48: Τομή πάνω στο Βόρειο αντέρεισμα κατά μήκος της οποίας απεικονίζεται το προφίλ παραμόρφωσης	
102	

Πίνακας Περιεχομένων Πινάκων

Πίνακας 1: : Εύρη συχνοτήτων και μηκών κύματος φασματικών καναλιών λειτουργίας των Ραντάρ.....	43
Πίνακας 2: Δεδομένα του δορυφόρου ERS-1&2.....	58
Πίνακας 3: Δεδομένα του δορυφόρου ENVISAT	60

Πίνακας Περιεχομένων Σχημάτων

Σχήμα 1: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης του σημείου αναφοράς στο χωριό Λιδωρίκι στο οποίο φαίνεται η σταθερότητα του.	71
Σχήμα 2: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης του σημείου αναφοράς στο Νότιο Αντέρεισμα στο οποίο φαίνεται η σταθερότητα του.	72
Σχήμα 3: Διαγράμματα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένα σημεία πάνω στο φράγμα..	81
Σχήμα 4: Διαγράμματα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένα σημεία κατά μήκος του Δεξιού Βόρειου αντερείσματος.	82
Σχήμα 5: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένο σημείο στο Αριστερού Νότιο αντέρεισμα.	83
Σχήμα 6: Διάγραμμα της στάθμης της τεχνητής λίμνης του φράγματος Μόρνου για το χρονικό διάστημα 1995-2000.	84
Σχήμα 7: Συσχέτιση των διαγραμμάτων της διαχρονικής παραμόρφωσης του φράγματος και της στάθμης της τεχνητής λίμνης Μόρνου για το χρονικό διάστημα 1995-2000.....	84
Σχήμα 8: Συσχέτιση των διαγραμμάτων της διαχρονικής παραμόρφωσης του Αριστερού Βόρειου αντερείσματος και της στάθμης της τεχνητής λίμνης Μόρνου για το χρονικό διάστημα 1995-2000.....	85
Σχήμα 9: Συσχέτιση των διαγραμμάτων της διαχρονικής παραμόρφωσης του φράγματος Μόρνου και της σεισμικής δραστηριότητας Μόρνου για το χρονικό διάστημα 1995-2000.....	85
Σχήμα 10: Συσχέτιση των διαγραμμάτων της διαχρονικής παραμόρφωσης του φράγματος Μόρνου, της στάθμης της τεχνητής λίμνης και της σεισμικής δραστηριότητας για το χρονικό διάστημα 1995-2000.	86
Σχήμα 11: Διαγράμματα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένα σημεία πάνω στο φράγμα.	92
Σχήμα 12: Διαγράμματα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένα σημεία κατά μήκος του Δεξιού Βόρειου αντερείσματος.	93
Σχήμα 13: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένο σημείο κατά μήκος του Δεξιού Βόρειου αντερείσματος.	94
Σχήμα 14: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένο σημείο κατά μήκος του Δεξιού Βόρειου αντερείσματος.	94

Σχήμα 15: Διάγραμμα της στάθμης της τεχνητής λίμνης του φράγματος Μόρνου για το χρονικό διάστημα 2003-2010.	95
Σχήμα 16: Συσχέτιση των διαγραμμάτων της διαχρονικής παραμόρφωσης του φράγματος Μόρνου και της στάθμης της τεχνητής λίμνης για το χρονικό διάστημα 2003-2010.	96
Σχήμα 17: Συσχέτιση των διαγραμμάτων της διαχρονικής παραμόρφωσης του Αριστερού Βόρειου αντερείσματος και της στάθμης της τεχνητής λίμνης για το χρονικό διάστημα 2003-2010.....	96
Σχήμα 18: Συσχέτιση των διαγραμμάτων της διαχρονικής παραμόρφωσης του φράγματος Μόρνου και της σεισμικής δραστηριότητας για το χρονικό διάστημα 2003-2010.	97
Σχήμα 19: Συσχέτιση των διαγραμμάτων της διαχρονικής παραμόρφωσης του φράγματος Μόρνου, της στάθμης της τεχνητής λίμνης και της σεισμικής δραστηριότητας για το χρονικό διάστημα 2003-2010.	97
Σχήμα 20: Προφίλ παραμόρφωσης κατά μήκος του Δεξιού Βόρειου Αντερείσματος (επεξεργασία ανοδικής τροχιάς)	103
Σχήμα 21: Προφίλ παραμόρφωσης κατά μήκος του Δεξιού Βόρειου Αντερείσματος (επεξεργασία καθοδικής τροχιάς)	103

Πρόλογος

Η παρούσα Μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών ``Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και Διαχείριση του Χώρου``, στην κατεύθυνση ``Γεωπληροφορικής`` κατά τα ακαδημαϊκά έτη 2012-2014. Αντικείμενο της μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της Διαφορικής Συμβολομετρίας ραντάρ για την ανίχνευση της επιφανειακής παραμόρφωσης στην ευρύτερη περιοχή του φράγματος Μόρνου αλλά και στο φράγμα. Αναλυτικά πραγματοποιήθηκε:

- Έρευνα της εδαφικής παραμόρφωσης στην ευρύτερη περιοχή του φράγματος Μόρνου.
- Παρακολούθηση των κινδύνων κατολισθητικών φαινομένων του Βόρειου και Νότιου Αντερείσματος.
- Παρακολούθηση της συμπεριφοράς του φράγματος Μόρνου σε σχέση με πιθανές πηγές παραμόρφωσης.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους με την βοήθεια τους συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω:

- ✚ Τον Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής Γεωγραφίας του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου, κ. Ισαάκ Παρχαρίδη, επιβλέποντα καθηγητή, ο οποίος μου εμπιστεύτηκε την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, για την άριστη συνεργασία, την πολύτιμη και συνεχή καθοδήγησή του καθώς και το ενδιαφέρον και την βοήθεια του σε όλα τα στάδια της εργασίας αυτής.
- ✚ Τον Δρ. Παναγιώτη Ηλία, ειδικό επιστημονικό προσωπικό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, για την πολύτιμη συμβολή του στην εκτέλεση και αξιολόγηση της παρούσας εργασίας καθώς επίσης και για την παροχή δεδομένων που μου προσέφερε.
- ✚ Τον Καθηγητή κ. Pierre Briole, Διευθυντής ερευνών του CNRS, Ecole Normale Supérieure, για τις πολύτιμες συμβουλές.
- ✚ Τον υποψήφιο διδάκτορα Γιώργο Μπενέκο για την πολύτιμη βοήθειά του τόσο μεταδίδοντάς μου τις γνώσεις του πάνω σε θέματα της Συμβολομετρίας όσο και σε πρακτικά ζητήματα που αφορούσαν στα στάδια της επεξεργασίας της μελέτης.

- ✚ Την Ερευνητική ομάδα Τηλεπισκόπησης του Χαροκόπειου Πανεπιστήμιου και ιδιαίτερα την Ευαγγελία Γκάρτσου, Σωτηρία Ζαφειρίου, Χρίστο Μπουρτζουκλή και Κώστα Δερδελάκο για την άριστη συνεργασία, τις ανταλλαγές απόψεων και την βοήθεια που μου προσέφεραν σε όλα τα στάδια της έρευνας.
- ✚ Την διοίκηση της ΕΥΔΑΠ Α.Ε και ιδιαίτερα την Προϊσταμένη Φραγμάτων Μόρνου – Ευήνου, Κα. Μεσημέρη Ράνια και τον κ. Ηλία Γερολημάτο για την παροχή χρήσιμων δεδομένων που βοήθησαν στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.
- ✚ Τους συμφοιτητές μου Μαρία – Λουίζα Δρακάτου, Νίκο Μαράτο, Αλέξη Κασελούρη, Κώστα Λένο, Σωτήρη Καρπούζα και Κλεονίκη Ρέρρα για την ποικιλότροπη βοήθεια τους.
- ✚ Την φίλη μου Ιωάννα για την συμπαράσταση και την θετική της ενέργεια που υπήρξε καθοριστική για την περάτωση της παρούσας εργασίας

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα την οικογένεια μου, για την συνεχή ενθάρρυνση και υποστήριξη τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου όσο και σε κάθε βήμα της Ζωής μου.

Νεοκοσμίδης Σπύρος

Αθήνα, 10/2/2014

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η παρακολούθηση της εδαφικής παραμόρφωσης στην περιοχή του φράγματος Μόρνου, με την χρήση δορυφορικών εικόνων Ραντάρ και την εφαρμογή της Διαχρονικής Συμβολομετρίας (Time-series SAR Interferometry). Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε ανάλυση της εδαφικής παραμόρφωσης στην ευρύτερη περιοχή του Φράγματος Μόρνου αλλά και στο φράγμα, παρακολούθηση των κινδύνων κατολισθητικών φαινομένων στο Βόρειο και Νότιο Αντέρεισμα καθώς επίσης και παρακολούθηση της συμπεριφοράς του φράγματος σε σχέση με πιθανές πηγές παραμόρφωσης όπως ισχυρά σεισμικά γεγονότα που εκδηλώθηκαν στην ευρύτερη περιοχή, μεταβολές τις στάθμης της τεχνητής λίμνης του Μόρνου κ.τ.λ. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ανοδικής και καθοδικής τροχιάς του δέκτη SAR του δορυφόρου ERS-1 & ERS-2 για την χρονική περίοδο 1993-2000 καθώς και ανοδικής και καθοδικής τροχιάς του δέκτη ASAR του δορυφόρου ENVISAT για την χρονική περίοδο 2003-2010. Για την παραγωγή των χαρτών διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης εφαρμόστηκε η τεχνική της σύρεσης Διαφορικών Συμβολογραμάτων καθώς επίσης για την ανάλυση των διαγραμμάτων ιστορικής παραμόρφωσης σε συγκεκριμένα σημεία – στόχους εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος SVD (Singular Value Decomposition) (pixel based time series analysis). Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GAMMA, με την χρήση του οποίου παράχθηκαν οι χάρτες εδαφικής παραμόρφωσης και επίσης το λογισμικό ArcGIS με σκοπό την διαχείριση και τελειοποίηση των χαρτών συμβολομετρίας.

Abstract

The aim of this study is the observation of soil deformation in Mornos Dam region, using satellite radar images and the method of Time-series SAR Interferometry. Specifically, an analysis of soil deformation in the region area and the Mornos Dam, and monitoring of landslides phenomena at North and South abutment were performed, as well as monitoring of dam behavior in relation to possible sources of deformation such as seismic events that occur in the region and water level changes of Mornos artificial lake. The data used in this study were ascending and descending acquisitions of SAR/ERS 1-2 covering the period of 1993-2000 as well as ascending and descending acquisitions of ASAR/ENVISAT covering the period of 2003-2010. For the production of deformation maps, the technique of Differential Interferometry (DInSAR) Stacking was applied and for the pixel based time series analysis, the SVD algorithm (Singular Value Decomposition) was applied respectively. For this procedure, the GAMMA software was used, by which the soil deformation maps were produced, as well as the ArcGis software in order to manage and process the extracted interferometric maps.

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Στην σύγχρονη εποχή τα φράγματα αποτελούν έργα πολλαπλής σκοπιμότητας παράγοντας σημαντικά κοινωνικά και οικονομικά ωφέλει, όπως τον έλεγχο των πλημμυρών, την άρδευση, την ύδρευση και την ηλεκτρική ενέργεια. Η παρακολούθηση ενός φράγματος διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στην διαχείριση και την λειτουργία του, ιδίως για τον εντοπισμό μη ασφαλών συνθηκών ή και προβλημάτων τα οποία απαιτούν τα κατάλληλα διορθωτικά μέτρα στα πρώιμα στάδια. Πιθανή αστοχία τους επιφέρει μεγάλες καταστροφές με τεράστιο κοινωνικό, οικονομικό, οικολογικό κόστος. Η κινηματική τους συμπεριφορά είναι άμεσα συνδεδεμένη με την πιθανότητα αστοχίας τους, γι' αυτό το λόγο η παρακολούθηση της αποκτά ιδιαίτερη σημασία.

Κατά την διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, οι τεχνικές τηλεπισκόπησης (π.χ Laser scanner, διαφορική συμβολομετρία κτλ.) ήρθαν για να συμπληρώσουν τις μεθόδους για την μέτρηση των μετατοπίσεων των υποδομών όπως GPS κτλ. Ανάμεσα σε αυτές τις τεχνικές, η Διαφορική Συμβολομετρία SAR (DInSAR) χρησιμοποιείτε προκειμένου να υπολογιστούν μικρο-μετακινήσεις των δομών με ακρίβεια χιλιοστού.

Στην συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιείτε έρευνα της εδαφικής παραμόρφωσης στην ευρύτερη περιοχή του φράγματος Μόρνου αλλά και στο φράγμα χρησιμοποιώντας την τεχνική της Διαφορικής Συμβολομετρίας Ραντάρ και του αλγορίθμου SVD (Singular Value Decomposition) . Από άποψη δομής, η μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από 7 κεφάλαια και συγκεκριμένα:

- Το κεφάλαιο 1 ``Εισαγωγή`` όπου δίνονται κάποια εισαγωγικά στοιχεία για την εργασία.
- Το κεφάλαιο 2 ``Περιοχή Μελέτης`` όπου γίνεται αναφορά για τα γενικά στοιχεία της περιοχής μελέτης, για το γεωλογικό υπόβαθρο, την τεκτονική και την σεισμικότητα της περιοχής.
- Το κεφάλαιο 3 ``Φράγματα`` όπου περιγράφεται ο σκοπός κατασκευής, οι τύποι φραγμάτων καθώς επίσης αναφέρονται περιπτώσεις αστοχιών και τέλος γίνεται εκτενής αναφορά στο Φράγμα του Μόρνου.
- Το κεφάλαιο 4 ``Δορυφορικά Συστήματα Παρακολούθησης`` όπου γίνεται εισαγωγή στα Δορυφορικά Συστήματα και αναλύεται η τεχνική της Συμβολομετρίας Ραντάρ.

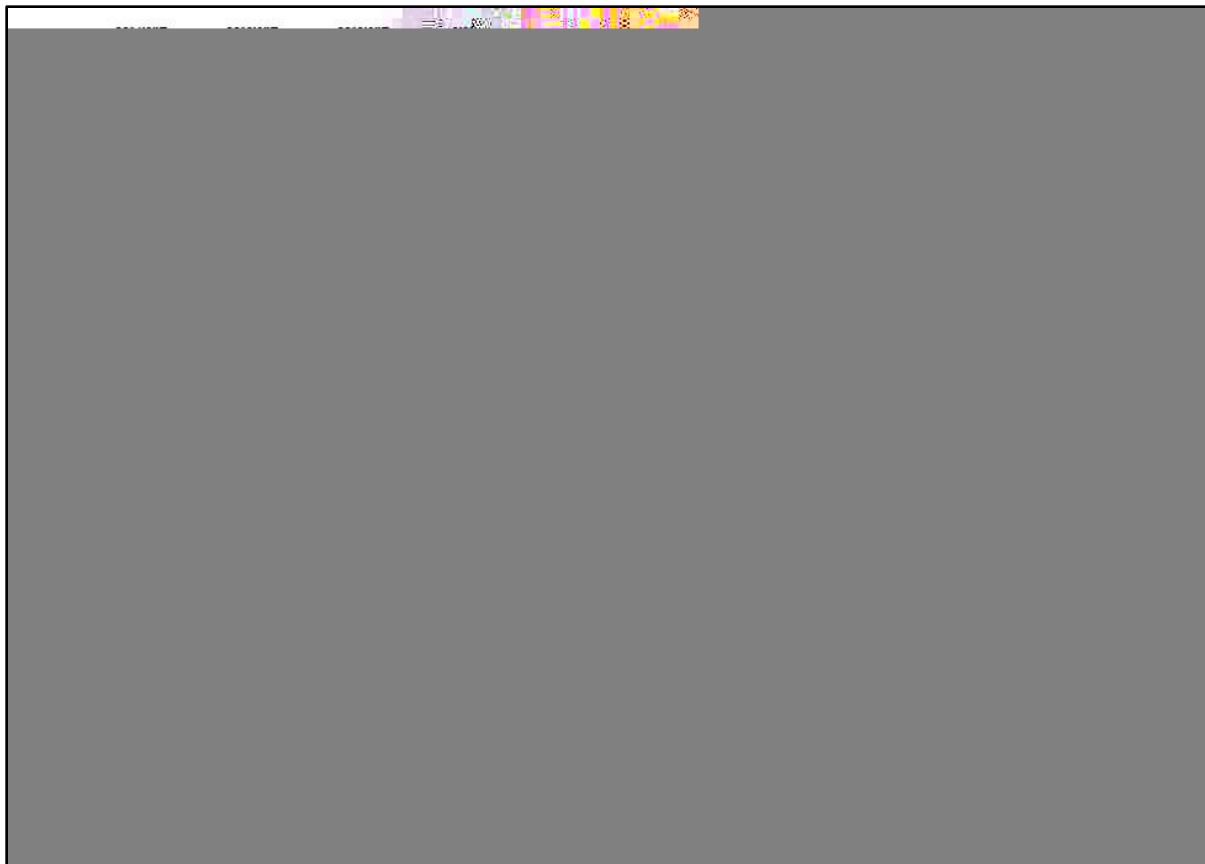
- Το κεφάλαιο 5 ``Δεδομένα και Μεθοδολογία`` όπου παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και περιγράφονται τα στάδια της επεξεργασίας αυτών.
- Το κεφάλαιο 6 ``Αποτελέσματα`` όπου παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της Διαφορικής Συμβολομετρίας.
- Το κεφάλαιο 7 ``Συμπεράσματα`` όπου παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και αναφέρονται θέματα για μελλοντική διερεύνηση.

Κεφάλαιο 2 Περιοχή μελέτης

2.1 Γενικά στοιχεία

Ο Μόρνος, με συνολικό μήκος 77 Km, είναι ποταμός της κεντρικής Στερεάς Ελλάδας. Οι πηγές του βρίσκονται στις νότιες πλαγίες της Οίτης και κατεβαίνοντας προς τα νότια αποχετεύει τη λεκάνη που βρίσκεται μεταξύ Γκιώνας, Βαρδουσίων, Λιδωρικίου και Οίτης. Ο ποταμός καθορίζει τα όρια των επαρχιών Ναυπακτίας και Δωρίδας και εκβάλλει στα όρια Κορινθιακού και Πατραϊκού κόλπου, δυτικά της Ναυπάκτου.

Στη κοίτη του ποταμού Μόρνου, 7 Km δυτικά του Λιδωρικίου στο Νομό Φωκίδος, δημιουργήθηκε, με την κατασκευή χωμάτινου φράγματος, ο Ταμιευτήρας του Μόρνου (Εικόνα 1). Η λίμνη του Μόρνου είναι τεχνητή λίμνη που κατασκευάστηκε με σκοπό την κάλυψη των όλο και συνεχών αυξανόμενων αναγκών για την ύδρευση της Αθήνας. Η συνολική επιφάνεια της λίμνης, που αντιστοιχεί στη μέση στάθμη της, είναι περίπου 15,5 Km² με αποτέλεσμα να είναι η ένατη μεγαλύτερη τεχνητή λίμνη της Ελλάδας. Συγκεντρώνει νερό όχι μόνο από τον ποταμό Μόρνο αλλά και από παραποτάμους του, που εκβάλλουν πλέον κατευθείαν στη λίμνη. Ο σημαντικότερος από αυτούς είναι ο Κοκκινοπόταμος, που πηγάζει από τα Βαρδούσια. Επίσης η λίμνη δέχεται νερό και από τη λίμνη του Εύηνου μέσω μίας σήραγγας που κατασκευάστηκε για τον σκοπό αυτό.



Εικόνα 1: Γεωμορφολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης. (πηγή: ίδια επεξεργασία)

2.2 Γεωλογικό υπόβαθρο

2.2.1 Γεωτεκτονική δομή

Οι Ελληνίδες διακρίνονται ως τμήμα του συστήματος της Τηθύος, μεταξύ της εγκάρσιας δομής του Scutari-Peč, η οποία τις οριοθετεί στα βορειοδυτικά από τις Δειναρίδες και της «κύρτωσης της Αττάλειας» (Antalya convex zone) η οποία τις διαχωρίζει από τις Ταυρίδες στα Ανατολικά (Kober 1928, 1931). Η διάκριση των ισοπικών – γεωτεκτονικών ζωνών είχε γίνει κυρίως με βάση στρωματογραφικά δεδομένα από αμεταμόρφωτες ακολουθίες ((Philippson 1898, 1959, Renz 1940, 1955, Aubouin 1959, 1965). Μετά την ανακάλυψη απολιθωμάτων σε μεταμορφωμένες ακολουθίες και με νέα ραδιοχρονολογικά στοιχεία από μεταμορφικά και μαγματικά γεγονότα, έγινε διαχωρισμός και των τεκτονικών ζωνών των μεταμορφωμένων

Ελληνίδων, από τους υπόλοιπους μεταμορφωμένους σχηματισμούς που ανήκουν σε προ-αλπικές ενότητες υποβάθρου (Papanikolaou 1980b, 1986a, 1989). Η συνολική δομή των Ελληνίδων (μεταμορφωμένων και μη) αναλύθηκε σε τρεις τεκτονο-μεταμορφικές ζώνες, οι οποίες σχηματίζουν τρεις ζώνες τεκτονικών παραθύρων που διαχωρίζονται από τα καλύμματα των αμεταμόρφωτων Ελληνίδων (Papanikolaou 1984).

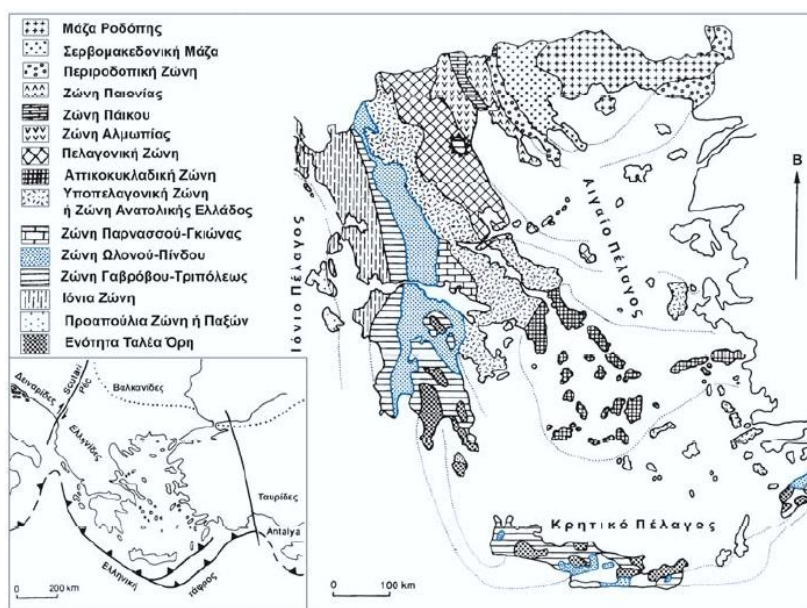
Η παλαιογεωγραφική οργάνωση των Ελληνίδων και η πιθανή σχέση μεταξύ του προαλπικού υποβάθρου και των αλπικών καλυμμάτων επέτρεψε την ανάλυση των Ελληνίδων σε τεκτονο-στρωματογραφικά πεδία (Papanikolaou 1989a, 1997), τα οποία είναι τα ακόλουθα: H1: Πλατφόρμα Εξωτερικών Ελληνίδων, συμπεριλαμβανομένων προ-αλπικών πετρωμάτων υποβάθρου και αλπικών καλυμμάτων, H2: Ωκεανός Πίνδου - Κυκλάδων, H3: Πλατφόρμα Εσωτερικών Ελληνίδων, συμπεριλαμβανομένων προ-αλπικών πετρωμάτων υποβάθρου και αλπικών καλυμμάτων H4: Ωκεανός Vardar-Αξιού, H5: Πάικο και Αυτόχθονο Λέσβου, H6: Περιοδοπική ζώνη και αλλόχθονο Λέσβου, H7: Μάζα Ροδόπης (Ενότητα Παγγαίου – Αυτόχθονο Ροδόπης), H8: Οφιόλιθοι Βόλβης –Ανατολικής Ροδόπης και H9: Ενότητες Σιδηρόνερου, Κερδυλίων και Βερτίσκου (Αλλόχθονο Ροδόπης). Η γεωγραφική εξάπλωση των τεκτονο-στρωματογραφικών πεδίων δίνεται στην Εικ. 2.2. Τα πεδία H1, H3, H5, H7 και H9 αντιπροσωπεύουν ηπειρωτικά λιθοσφαιρικά θραύσματα Γκοντβανικής προέλευσης, εκτός πιθανόν από το H9, η προέλευση του οποίου παραμένει αβέβαιη. Τα πεδία H2, H4, H6 και H8 αντιστοιχούν σε τμήματα του ωκεανού της Τηθύος (ίσως και της παλαιο-Τηθύος?). Το σημερινό νοτιότατο υπόλειμμα της Τηθύος στη λεκάνη της Ανατολικής Μεσογείου, το οποίο βρίσκεται σε καθεστώς υποβύθισης στο Ελληνικό Τόξο, θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως το μελλοντικό ωκεάνιο πεδίο H0.

Με βάση την παραμόρφωση, τη μεταμόρφωση, τα πετρολογικά και πετρογραφικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων, αλλά και την κινηματική και γεωμετρία των δομών τους, το Αλπικό Ορογενές διαχωρίστηκε σε δύο κύριες δομικές περιοχές, τις Εσωτερικές και Εξωτερικές Ζώνες. Οι Εσωτερικές ζώνες συνίστανται από μεταμορφωμένα κυρίως πετρώματα τα οποία έχουν υποστεί μεταμόρφωση σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων, Κρητιδική-Παλαιοκαινικής ηλικίας. Συνήθως μέσα σε αυτά έχει διαπιστωθεί η ύπαρξη ‘εξωτικών’ τεμαχών που αποτέλεσαν τμήματα του ωκεάνιου φλοιού της Τηθύος. Οι Εξωτερικές Ελληνίδες αποτελούνται από ακολουθίες νηριτικών και πελαγικών ιζηματογενών πετρωμάτων, που αποτέθηκαν στο ανατολικό ηπειρωτικό περιθώριο της Απούλιας πλάκας καθ’ όλη τη διάρκεια του Μεσοζωικού έως το Τριτογενές.

Στην περιοχή μελέτης συναντώνται οι εξής Γεωτεκτονικές ζώνες και σειρές από δυτικά προς ανατολικά: Ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας, Σειρά Βαρδουσίων, Ζώνη Ωλονού – Πίνδου.

2.2.1.1 Ζώνη Ωλονού- Πίνδου

Η γεωτεκτονική ενότητα της Πίνδου ανήκει στο τεκτονο-στρωματογραφικό πεδίο H2: Ωκεανός Πίνδου – Κυκλάδων (Εικόνα 2). Πρόκειται για τα αλλόχθονο κάλυμμα, πάνω από τη σχετικά αυτόχθονη εξωτερική ανθρακική πλατφόρμα, το οποίο δομεί την οροσειρά της Πίνδου στην ηπειρωτική Ελλάδα και εκτείνεται ως την Κρήτη και τα Δωδεκάνησα. Στα εσωτερικότερα τμήματα αυτού του ωκεάνιου τ.πεδίου έχουν επωθηθεί οι σχηματισμοί των τ.πεδίων H3 και H4. Πολυάριθμες εμφανίσεις μεταμορφωμένων τμημάτων σε υψηλές πιέσεις / χαμηλές θερμοκρασίες (HP/LT) του H4 εμφανίζονται με τη μορφή τεκτονικών παραθύρων κατά μήκος των ακτών του Αιγαίου και στις Κυκλάδες. Σε πολλές περιπτώσεις τα μεταμορφωμένα αυτά πετρώματα (HP/LT) σχηματίζουν ενδιάμεσες τεκτονικές σφήνες μεταξύ των υποκειμένων ανθρακικών της εξωτερικής πλατφόρμας και των υπερκειμένων πετρωμάτων υποβάθρου ή/και του μεσοζωικού καλύμματος της εσωτερικής πλατφόρμας (H3). Τέτοιου είδους δομές παρατηρούνται στα τεκτονικά παράθυρα του Ολύμπου (Godfriaux 1968), στον Αλμυροπόταμο (Katsikatsos et al. 1976) και τον Κερκετέα (Papanikolaou 1979b).



Εικόνα 2: Γεωγραφική εξάπλωση της Γεωτεκτονικής Ζώνης Πίνδου (πηγή: Μουντράκης, 1985)

Η στρωματογραφική στήλη της ενότητας της Πίνδου (Εικόνα 3) είναι η ακόλουθη:

Μέσω-Άνω Τριαδικό: περιλαμβάνει το κλαστικό Τριαδικό, μία ακολουθία ιζημάτων της προορογενετικής ακολουθίας που συνίσταται κυρίως από λεπτούς έως μεσοκοκκώδεις ψαμμίτες με εναλλαγές πηλινών και αργίλων. Συχνά παρατηρούνται παρεμβολές ασβεστολίθων και κροκαλοπαγών. Εσωτερικά παρουσιάζονται ακολουθίες τύπου Bouma και γενικά ιζηματογενείς δομές, ενδεικτικές τουρβιδιτικών αποθέσεων (Degman & Robertson, 1998). Η ηλικία του σχηματισμού αυτού προσδιορίστηκε με βάση τα απολιθώματα *Halobia*, *Daonella* gr. *Elongate* και *Κωνόδοντα* (Flament 1973) και το περιβάλλον απόθεσής τους είναι βαθιάς θάλασσας. Το μέγιστο όρατο πάχος του σχηματισμού είναι περίπου 100m.

Άνω Τριαδικό έως Κάτω-Μέσω Ιουρασικό: περιλαμβάνει τον σχηματισμό Δρυμού, αποτελείται από ένα κατώτερο τμήμα ασβεστόλιθων βαθιάς θάλασσας με ενστρώσεις κερατολίθων και πράσινων πηλινών, το οποίο αναπτύσσεται στρωματογραφικά πάνω από το Κλαστικό Τριαδικό. Ένα ενδιάμεσο ορίζοντα πυριτόλιθων με ενστρώσεις ασβεστόλιθων και ένα ανώτερο τμήμα από ασβεστόλιθους με κονδύλους και διαστρώσεις πυριτόλιθων και πηλινών. Η ηλικία του σχηματισμού αυτού προσδιορίστηκε με βάση τα απολιθώματα *Halobia* sp. Και *Κωνόδοντα* (Flament 1973, Fleury 1980). Το μέγιστο πάχος του υπολογίζεται ότι είναι 300m.

Μέσω-Άνω Ιουρασικό: περιλαμβάνει τον σχηματισμό των Ραδιολαριτών ο οποίος είναι χαρακτηριστικός για την Ζώνη της Πίνδου και περιλαμβάνει τρεις επιμέρους ενότητες, σύμφωνα με την υποδιαίρεση που έχει προταθεί από τους Dercourt (1964) και Fleury (1980): α) **Πηλίτες Καστελίου** η κατώτερη στρωματογραφική ενότητα που αποτελείται από ποικιλόχρωμους πηλιτικούς ορίζοντες στους οποίους παρεμβάλλονται κατά θέσεις ψευδοωολιθικοί ασβεστόλιθοι και κερατόλιθοι. β) **Ραδιολαρίτες**, πρόκειται για ένα χαρακτηριστικό ορίζοντα ο οποίος αποτελείται από διάφορες κερατολιθικές φάσεις όπως, γκρίζων υαλωδών κερατόλιθων, ερυθρών κερατόλιθων, αργιλικών και μαγγανιούχων κερατόλιθων που συνοδεύονται από ασβεστολιθικές και πυριτιούχες πηλινικές φάσεις. γ) **Ασβεστόλιθοι με Calpionelles**, η ανώτερη ενότητα του σχηματισμού των ραδιολαριτών, στον οποίο επικρατούν ασβεστόλιθοι. Η ηλικία του σχηματισμού αυτού προσδιορίστηκε με βάση φύκη, τρηματοφόρα (Flament 1973) και ακτινόζωα (De Wever 1989). Το μέγιστο πάχος του σχηματισμού είναι περίπου 400m και αποτέθηκε κατά την διάρκεια της κύριας φάσης της απολέπτυνσης και της διάνοιξης του ωκεανού της Πίνδου (Robertson et al. 1991).

Κάτω Κρητιδικό: περιλαμβάνει τον σχηματισμό του πρώτου φλύσχη ο οποίος αποτελείται κυρίως από εναλλαγές ψαμμινών τουρβιδιτικής προέλευσης και αργίλων με παρεμβολές

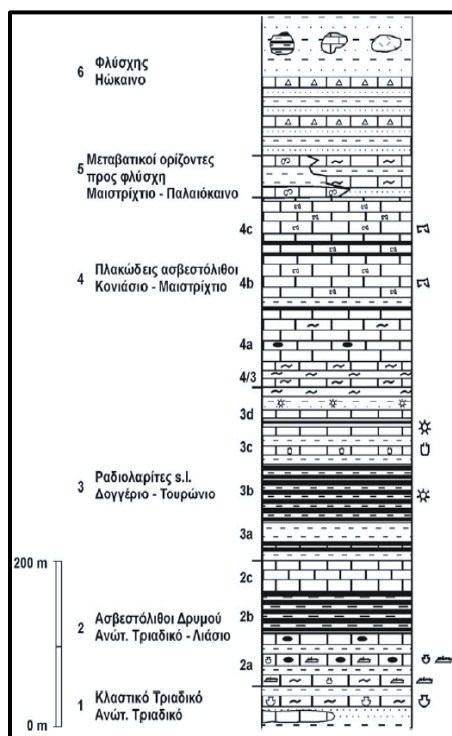
μαργαϊκών, ωολιθικών ασβεστόλιθων και κερατόλιθων (Richter & Muller 1993). Η ηλικία του σχηματισμού προσδιορίστηκε βάση ναννο – απολιθωμάτων, ενώ τα κλαστικά υλικά που δομούν το σχηματισμό αυτό αποτελούν τα προϊόντα διάβρωσης πετρωμάτων των Εσωτερικών Ελληνίδων και σηματοδοτούν την παλαιό-αλπική ορογενετική φάση. Το μέγιστο ορατό πάχος είναι περίπου 100m.

Άνω Κρητιδικό: περιλαμβάνει τον σχηματισμό των λεπτοπλακωδών ασβεστόλιθων ο οποίος αποτελείται από πελαγικής φάσης βιομικρικούς ασβεστόλιθους με κονδύλους και ενδιαστρώσεις πυριτόλιθων. Η ηλικία του σχηματισμού προσδιορίστηκε βάση της πλούσιας μικροπανίδας που βρέθηκε μέσα σε αυτούς και το μέγιστο πάχους αυτού είναι περίπου 300m. Η απόθεση του σχηματισμού αυτού έγινε μέσα σε ένα τμήμα του ωκεανού της Πίνδου που παρέμεινε ανοιχτό μετά το τέλος της παλαιο- αλπικής ορογενετικής φάσης (Robertson et al. 1991).

Άνω Κρητιδικό έως Παλαιόκαινο: περιλαμβάνει τον σχηματισμό των μεταβατικών προς το φλύσχη στρωμάτων και αποτελείται από εναλλασσόμενα στρώματα λεπτοπλακωδών ασβεστόλιθων, μαργών, μαργαϊκών ασβεστόλιθων, αργίλων και ψαμμιτών. Το πάχος του σχηματισμού ξεπερνά τα 100m και η απόθεσή του χαρακτηρίζει το πέρασμα από την προ-ορογενετική στην συνορογενετική φάση.

Ηώκαινο –Ολιγόκαινο: περιλαμβάνει τον σχηματισμό του Πινδικού φλύσχη, μία τυπική κλαστική ακολουθία τουρβιδιτών δομημένη από εναλλαγές ψαμμιτών, αργίλων και πηλίων. Μέσα στην ακολουθία αυτή μπορούν να διαχωριστούν τρεις ενότητες: α) η κατώτερη ενότητα που εμφανίζεται κυρίως στα δυτικά τμήματα της λεκάνης και αποτελείται από παχυστρωματώδεις ψαμμίτες και γραουβάκες που εναλλάσσονται με λεπτοστρωματώδεις αργίλους και πηλίτες. Τα ιζήματα αυτά του φλύσχη εμφανίζονται στη βάση μεγάλων επωθήσεων ενώ σε αυτά επικρατεί η ψαμμιτική φάση. β) η μεσαία ενότητα η οποία είναι και η επικρατούσα μέσα στην στρωματογραφική στήλη και αναπτύσσεται κυρίως στα κεντρικά τμήματα της λεκάνης του φλύσχη. Αποτελείται από λεπτοστρωματώδεις μαύρους αργίλους και πηλίτες με ενδιαστρώσεις ψαμμιτικών οριζόντων ή τοπικά λεπτομερών κροκαλοπαγών. Το πάχος των οριζόντων αυτών κυμαίνεται από 10 έως 50m στα κατώτερα τμήματα της ενότητας, ενώ προς τα ανώτερα μειώνεται σταδιακά έως ότου εξαφανιστούν. γ) Η ανώτερη ενότητα εμφανίζεται στα ανατολικά και αποτελείται από μία μονότονη εναλλαγή λεπτοστρωματωδών αργίλων, πηλίων και ψαμμιτών. Σποραδικά μέσα σε αυτήν εμφανίζονται ψαμμιτικοί ορίζοντες ή ορίζοντες κροκαλοπαγών που το πάχος τους δεν ξεπερνά τα 10m. Τόσο η ηλικία όσο και το πάχος του

σχηματισμού μεταβάλλεται κατά μήκος της Ζήνης της Πίνδου. Η απόθεση του αρχίζει στο όριο Κρητιδικό – Παλαιόκαινο και σταματά κατά το Ολιγόκαινο, ενώ το πάχος του κυμαίνεται από λίγες δεκάδες μέτρα έως 6 χιλιόμετρα (Koch & Nicolaus 1969, Fleury 1980, Richter & Muller 1993, Degnan & Robertson 1998).



Εικόνα 3: Στρωματογραφική κολώνα της ενότητας Πίνδου. (πηγή: Ζαμπετάκη, 2011)

2.2.1.2 Σειρά Βαρδουσίων

Η σειρά αυτή δομεί τον ορεινό όγκο των Βαρδουσίων, από όπου και το όνομά της, αποτελούσε μία μεταβατική λεκάνη μέτριου βάθους (Celet 1962), μεταξύ του υβώματος της Ζώνης Παρνασσού στα ανατολικά και του υβώματος της λεκάνης της Πίνδου στα δυτικά. Προς βορά εκτείνεται έως το ρήγμα του Σπερχειού και προς το νότο έως τον Κορινθιακό Κόλπο. Κατά πολλούς ερευνητές αποτελούσε τμήμα μιας υποθαλάσσιας αύλακας η οποία βρισκόταν στα ανατολικά του παλαιογραφικού χώρου της λεκάνης της Πίνδου, της Μαλιακής – Βαρδουσίων – Επιδαύρου αύλακας (Fleury et al 1980).

Η στρωματογραφική στήλη της σειράς των Βαρδουσίων είναι η ακόλουθη:

Τριαδικό: περιλαμβάνει μία ακολουθία ηφαιστειοϊζηματογενών πετρωμάτων (Σκύθιο), κονδυλώδεις Αμμωνιτοφόρους ασβεστόλιθους (Ανίσιο), ασβεστόλιθους με διαστρώσεις πυριτόλιθων (Λαδίνιο) και ασβεστόλιθους με παρεμβολές δολομιτικών ασβεστολίθων (Κάρνιο-Νόριο) με συνολικό πάχος 75 μέτρα.

Κάτω Ιουρασικό: περιλαμβάνει μία ακολουθία από λατυποπαγείς ασβεστόλιθους συνολικού πάχους 170 μέτρων.

Μέσω-Άνω Ιουρασικό: αποτελείται από ιάσπιδες και μικριτικούς ασβεστόλιθους με συνολικό πάχος 90 μέτρων.

Κάτω Κρητιδικό: περιλαμβάνει μία ακολουθία από δολομιτικούς ασβεστόλιθους και πελαγικούς ασβεστόλιθους συνολικού πάχους 150 μέτρων.

Άνω Κρητιδικό: αποτελείται από πελαγικούς ασβεστόλιθους με διαστρώσεις πυριτόλιθων.

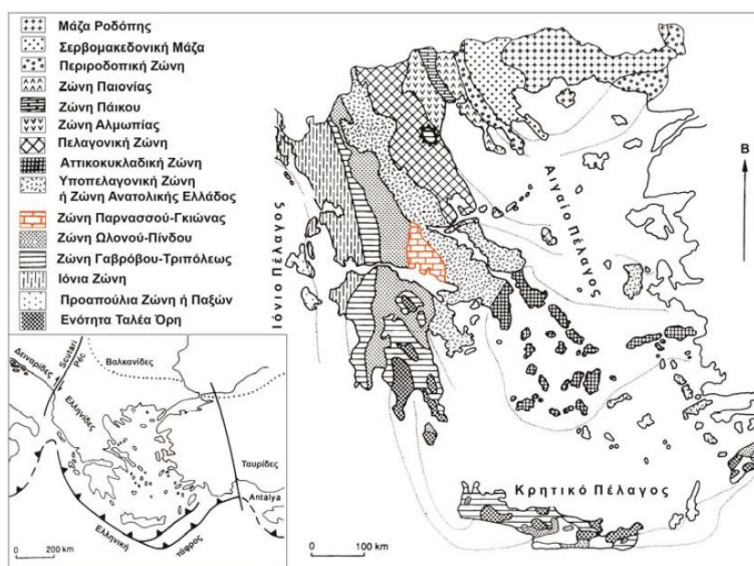
Παλαιόκαινο: αποτελείται από κόκκινους πηλίτες και μάργες με πάχος περίπου 30 μέτρων.

Ηώκαινο: περιλαμβάνει τον σχηματισμό φλύσχη που αποτελείται από εναλλαγές πηλινών, μαργών και χονδρόκοκκων ψαμμιτών με συνολικό πάχος περίπου 500 μέτρα.

2.2.1.3 Ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας

Η γεωτεκτονική ενότητα του Παρνασσού – Γκιώνας (Εικόνα 4) ανήκει στο τεκτονο-στρωματογραφικό πεδίο H3: Πλατφόρμα Εσωτερικών Ελληνίδων. Αποτελείται τόσο από μεταμορφωμένες ενότητες (Αλμωπία, (?) Αττική, (?) Λαύριο) όσο και από αμεταμόρφωτες ενότητες (Παρνασσός, Βοιωτική, Υποπελαγονική), καθώς και από πιθανά προαλπικά κρυσταλλικά πετρώματα (Αστερούσια, Φλάμπουρο, Καστοριά). Το κύριο χαρακτηριστικό του πεδίου είναι η παρουσία ρηχής ανθρακικής πλατφόρμας, από το Κάτω-Μέσο Τριαδικό έως το Ανώτερο Ιουρασικό (Célet 1962, Célet and Ferrière, 1978, Papanikolaou 1988c). Στην πλατφόρμα αυτή επωθήθηκαν οι οφιόλιθοι του Αξιού (τ.πεδίο H4) κατά το Ανώτερο Ιουρασικό – Κατώτερο Κρητιδικό, κατά την αποκαλούμενη και παλαιο-αλπική (ή ηω-αλπική) ορογενετική φάση (Mercier, 1968, Mercier and Végely 1972, Jacobshagen 1979, 1986). Πάνω από την τράπεζα αυτή δεν βρίσκουμε την τυπική φλύσχική ιζηματογένεση, αλλά την ιδιόμορφη «σχιστο-ψαμμιτο-κερατολιθική διάπλαση», ηλικίας Μέσου Ιουρασικού – Κατώτερου Κρητιδικού (Renz 1955, Tataris 1975, Papanikolaou 1990). Το σύμπλεγμα αυτό αποτελείται από οφιολιθικά

θραύσματα και ολισθόλιθους (τύπου «άγριου φλύσχη») ή ιζηματογενή mélanges, τα οποία συχνά γίνονται πολύχρωμα οφιολιθικά mélanges (Mercier and Végely 1972).



Εικόνα 4: : Γεωγραφική εξάπλωση της Γεωτεκτονικής Ζώνης Παρνασσού
(πηγή: Μουντράκης, 1985)

Η στρωματογραφική στήλη της ενότητας του Παρνασσού (Εικόνα 5) είναι η ακόλουθη:

Τριαδικό –Κάτω Λιάσιο: περιλαμβάνει μία σειρά ταινιωτών λευκών δολομιτών και δολομιτικών ασβεστόλιθων χωρίς απολιθώματα, οι οποίοι μεταβαίνουν σε γκρίζους παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθους με φύκη και τρηματοφόρα Involutinidae. Το πάχος της σειράς αυτής είναι περίπου 300m.

Μέσο –Άνω Λιάσιο: περιλαμβάνει μία ανθρακική σειρά η οποία αποτελείται από εναλλαγές γκι και μαύρων ασβεστόλιθων και δολομιτών. Η ηλικία προσδιορίστηκε βάση των απολιθωμάτων *Paleodasycladus mediterraneus*, *Orbitopsella praecursor* και ογκοειδών γαστερόποδων. Το πάχος του σχηματισμού είναι περίπου 150m.

Δογγέριο: περιλαμβάνει μία ακολουθία ωολιθικών ασβεστόλιθων όπου η ηλικία του προσδιορίστηκε στην οροφή του με βάση την παρουσία φυκών και τρηματοφόρων.

Άνω Ιουρασικό (Οξφόρδιο): περιλαμβάνει τον πρώτο βωξιτικό ορίζοντα b1.

Άνω Ιουρασικό (Μάλμιο): περιλαμβάνει μία ασβεστολιθική σειρά η οποία επικάθεται επικλυσιγενώς στον πρώτο βωξιτικό ορίζοντα και υπόκειται του δεύτερου βωξιτικού ορίζοντα.

Στην παλαιότερη βιβλιογραφία αναφέρονται ως «ασβεστόλιθοι με Cladocoropsis» μιας και χαρακτηρίζεται από άφθονα μακρο και μικροαπολιθώματα όπως Cladocoropsis mirabilis, Clypeina Jurassica, Sphaeractinia, Ellipsactinia, Pseudocyclamina Lituus κ.α.

Κάτω Κρητιδικό (Άπτιο): περιλαμβάνει τον δεύτερο βωξιτικό ορίζοντα b2 ο οποίος αντιπροσωπεύει στρωματογραφικό κενό που αντιστοιχεί σε μέρος του ανώτερου Πορτλανδίου. Μεταξύ των βωξιτοφόρων καρστικών κοιλοτήτων, υπάρχουν στείρες σειρές. Ο δεύτερος βωξιτικός ορίζοντας παρεμβάλλεται μεξύ στρωμάτων ασβεστόλιθων, όπου ασβεστόλιθοι με Ellipsactinia αποτελούν ασβεστολίθους του δαπέδου του βωξίτη, ενώ οι ασβεστόλιθοι της οροφής περιέχουν Protopenoplis ultragranulata.

Κάτω Κρητιδικό: περιλαμβάνει τους ασβεστόλιθους της Άμφισσας οι οποίοι αντιπροσωπεύουν ένα πλήρη ιζηματογενή κύκλο. Περιέχονται μεταξύ του δεύτερου βωξιτικού ορίζοντα και του τρίτου βωξιτικού ορίζοντα b3. Σε ορισμένες περιοχές, στο μεσαίο τμήμα του σχηματισμού, παρατηρείται ένας στρωσιγενής βωξιτικός ορίζοντας (b2-3). Το πάχος του σχηματισμού κυμαίνεται από 200-400m στις κεντρικές περιοχές και πάνω από 700m στα περιθώρια της πλατφόρμας.

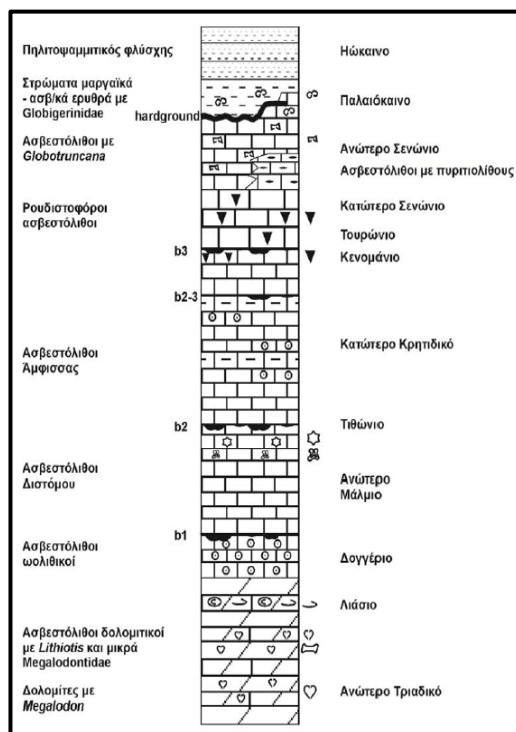
Άνω Τουρώνιο-Κάτω Σενώνιο: περιλαμβάνει μία ακολουθία από σκουρόχρωμους παχυπλακώδεις ρουδιστοφόρους ασβεστόλιθους οι οποίοι επίκεινται επικλυσιγενώς του τρίτου βωξιτικού ορίζοντα. Το πάχος του σχηματισμού είναι περίπου 200m και περιέχει άφθονα τρηματοφόρα (Dicyclina schlumbergeri, Cuneolina pavonia, Pseudocyclamina sphaeroidea) και φύκη.

Άνω Σενώνιο: περιλαμβάνει μία ακολουθία πελαγικών ασβεστόλιθων με πυριτιόλιθους οι οποίοι υπέρκεινται των ρουδιστοφόρων ασβεστόλιθων. Το πάχος του σχηματισμού είναι περίπου 7-15m και η μετάβαση από τους ρουδιστοφόρους νηριτικούς στους πελαγικούς ασβεστόλιθους με Globotruncanidae γίνεται βαθμιαία μέσω μεταβατικών στρωμάτων που περιέχουν θραύσματα ρουδιστών.

Άνω Κρητιδικό (Καμπάνιο-Μαιστρίχτιο): Μετά τους πελαγικούς ασβεστόλιθους του ανώτερου Σενώνιου, η ιζηματογένεση παρουσιάζει έντονα πλευρικές μεταβάσεις. Απόθεση hardground ή στρωματολίθων πιστοποιείται πάνω στους πελαγικούς ασβεστόλιθους με Globotruncanidae ή ακόμη και των ρουδιστοφόρων ασβεστόλιθων ή των πελαγικών ασβεστόλιθων στο όριο Κρητιδικού-Παλαιοκαίνου. Σε άλλες περιοχές η πελαγική ιζηματογένεση μεταβαίνει ομαλά χωρίς να παρεμάλονται hardground στη κλαστική ιζηματογένεση του φλύσχη.

Μαιστρίχτιο: περιλαμβάνει τα μεταβατικά στρώματα προς τον φλύσχη, τα οποία περιέχουν πρασινοκίτρινες ή ερυθρές μάργες οι οποίες υπέρκεινται των πελαγικών ασβεστόλιθων του ανώτερου Σενωνίου ή του Παλαιοκαίνου ή του hardground ή των ασβεστόλιθων.

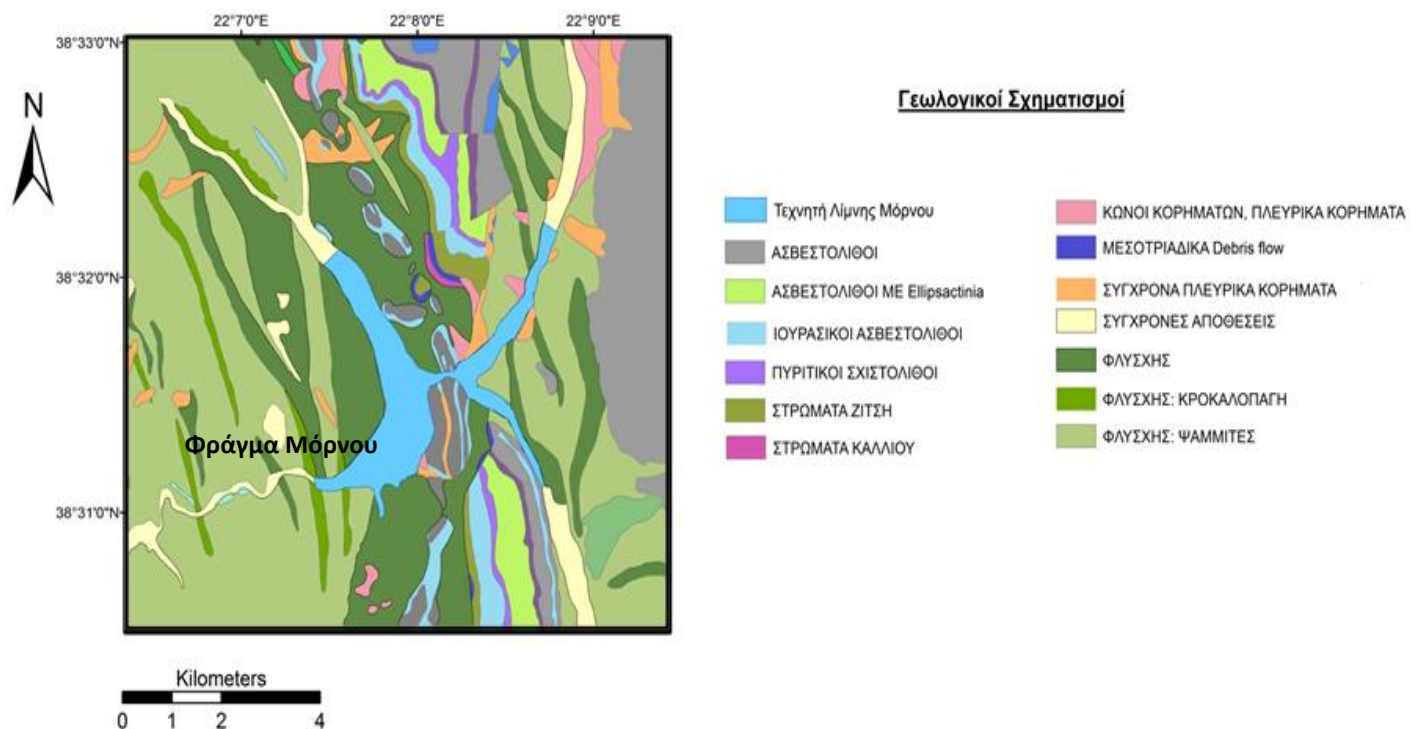
Μαιστρίχτιο-Δάνιο: περιλαμβάνει τον φλύσχη του Παρνασσού που συνήθως υπέρκειται των ερυθρών μαργών ή σπάνια των πελαγικών ασβεστόλιθων με Globigerinidae. Το πάχος του φλύσχη είναι περίπου 80-150m.



Εικόνα 5: Στρωματογραφική κολώνα της ενότητας Παρνασσού. (πηγή: Ζαμπετάκη, 2011)

Η περιοχή στην οποία εδράζεται το φράγμα του Μόρνου δομείται αποκλειστικά από τον σχηματισμό του φλύσχη της ενότητας Πίνδου, ο οποίος στο σύνολο του αποτελείται από λεπτόκκοκους-μεσόκκοκους, λεπτό – έως μεσοστρωματώδεις και σπάνια σε μόρφη πάγκων ψαμμίτες, που εναλλάσσονται με πηλίτες και ιλυόλιθους. Στα κατώτερα μέλη επικρατούν περισσότερο οι ιλυίλιθοι και οι πηλίτες σε εναλλαγές με μάργες, ενώ στα ανώτερα κατά θέσεις επικρατούν πολύμικτα κροκαλοπαγή. Το δεξιό (βόρειο) αντέρεισμα χαρακτηρίζεται από χαμηλής ποιότητας σχηματισμούς λόγω του έντονου τεκτονισμού. Επικρατούν κυρίως πηλίτες – ιλυόλιθοι (ενδιάμεση και αργιλομαργαϊκή φάση του φλύσχη), οι οποίοι διατέμνονται από τρία κύρια συστήματα ασυνεχειών: τη στρώση με διεύθυνση κλίσης BAA μέχρι Νότια με μικρές κλίσεις 5° - 30° και δύο συστήματα διακλάσεων με διεύθυνση κλίσης 200° – 280° (ΝΔ-ΒΔ) και

ΒΔ –ΝΑ, με απότομες κλίσεις $75^{\circ} - 85^{\circ}$. Στο αριστερό (νότιο) αντέρεισμα, επικρατούν οι ψαμμίτες (ψαμμιτική φάση του φλύσχη) που είναι κυρίως μεσο –στρωματώδεις με λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων και παρουσιάζονται γενικά πτυχωμένοι με πτυχές ευρείας κλίμακας. Οι σχηματισμοί διατέμνονται από τρία κύρια συστήματα ασυνεχειών: τη στρώση με διεύθυνση κλίσης ΒΑΑ μέχρι Νότια και κλίσεις $20^{\circ} - 40^{\circ}$ και δύο συστήματα διακλάσεων με διεύθυνση κλίσης $200^{\circ} - 230^{\circ}$ (ΝΔ) και $260^{\circ} - 300^{\circ}$ (Δ-ΒΔ), με απότομες κλίσεις $75^{\circ} - 85^{\circ}$. Επιφανειακά και τα δύο αντερείσματα, κυρίως όμως το αριστερό, καλύπτονται από μανδύα αποσάθρωσης ή μικρού πάχους φλυσχικά κορήματα, ενώ στην κεντρική περιοχή αναπτύσσονται ποτάμιες αποθέσεις.



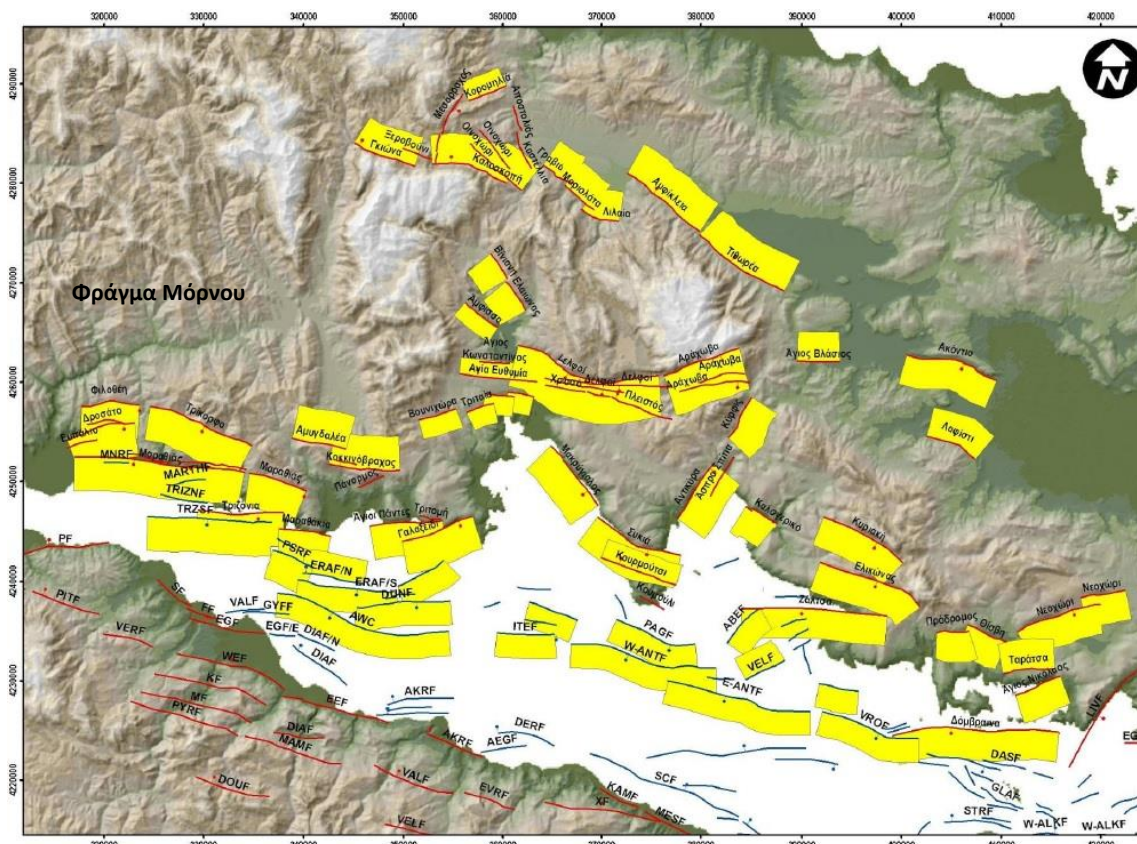
Εικόνα 6: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης (πηγή: ΙΓΜΕ, ίδιας επεξεργασίας)

2.3 Νεοτεκτονική δομή

Η περιοχή της Στερεάς Ελλάδος και ο Κορινθιακός Κόλπος αποτελούν μέρος του σύγχρονου ελληνικού Τόξου. Τοποθετούνται στο εσωτερικό τμήμα του τόξου, στο οποίο επικρατεί ο εφελκυσμός και αποτελούν μια από τις πιο ενεργές τεκτονικά περιοχές, με έναν από τους υψηλότερους ρυθμούς παραμόρφωσης παγκοσμίως (Papazachos & Komninakis 1971, McKenzie 1972, 1978, Papazachos & Papadopoulos et al. 1977, Makris 1976, 1978, Doutsos et al. 1988, Jackson & Kenzie 1988). Ο εφελκυσμός θεωρείται ότι ξεκίνησε κατά το Μειόκαινο για τον χώρο του Αιγαίου, ακολουθώντας την μετανάστευση του ορογενούς προς δυτικά – νότιοδυτικά (Le-Pichon & Angelier 1979, Mercier 1981). Η ευρύτερη περιοχή του Κορινθιακού και της Κεντρικής Στερεάς Ελλάδας χαρακτηρίζεται από την παρουσία ρηγμάτων προσανατολισμού Δ-Α έως ΔΒΔ-ΑΝΑ, τα οποία υφίστανται έναν εφελκυσμό γενικής διεύθυνσης Β-Ν. Οι κυριότερες δομές της περιοχής αυτής είναι το βύθισμα του Σπερχειού στα βόρεια και το βύθισμα του Κορινθιακού στα νότια, ενώ παράλληλα σε αυτά τοποθετούνται τα συστήματα ρηγμάτων της Λοκρίδας, του Νότιου Ευβοϊκού Κόλπου και της Τριχωνίδας. Επίσης αξιοσημείωτες ρηξιγενείς ζώνες και ρήγματα που απατώνται στην ευρύτερη περιοχή από δυτικά προς ανατολικά είναι της Φιλοθέης/Δροσάτου/Ευπαλίου, Μαραθιά – Καλλιθέας, Τριζόνας – Μαραθάκια, Αμυγδαλιά – Κοκκινόβραχος και Άγιοι Πάντες – Γαλαξίδι (Εικόνα 7).

Στην περιοχή του φράγματος Μόρνου, εντοπίζονται η χαρακτηριστική επώθηση του τεκτονικού καλύμματος του Παρνασσού πάνω στο τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου, στην περιοχή του Όρους Γκιώνα, με γενική διεύθυνση Β-Ν και η επώθηση του τεκτονικού καλύμματος των Βαρδουσιών πάνω από το τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου με την ίδια διεύθυνση. Επίσης χαρακτηριστικές είναι και οι επιπτεύσεις των πελαγικών ασβεστόλιθων της ενότητας Πίνδου πάνω στο φλύσχη της ίδιας ενότητας.

Εστιάζοντας στην περιοχή γύρω από το φράγμα και ειδικότερα στο βόρειο και νότιο αντέρεισμα, παρατηρούνται αρκετά κανονικά ρήγματα με γενική διεύθυνση ΑΒΑ-ΔΝΔ με νότια κλίση για το βόρειο αντέρεισμα ενώ στο νότιο παρατηρούνται κυρίως ρήγματα με διεύθυνση περίπου Β – Ν και ανατολικής ή δυτικής κλίσης. Ο έντονος τεκτονισμός που έχει υποστεί η περιοχή διαπιστώνεται επίσης από τις πτυχώσεις και διακλάσεις που έχουν παραμορφώσει τα στρώματα του φλύσχη σε πολλές θέσεις.



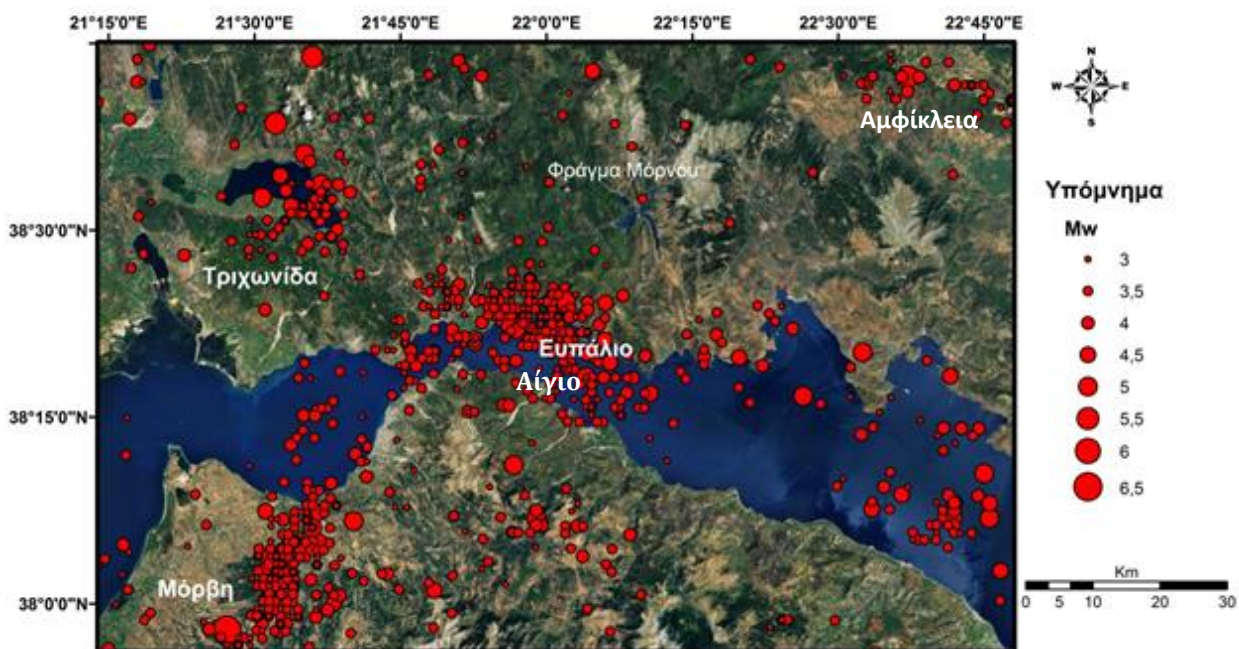
Εικόνα 7: Τεκτονικός χάρτης του Κορινθιακού κόλπου (πηγή: Valkaniotis, 2009)

2.4 Σεισμικότητα

Η περιοχή του Κορινθιακού κόλπου αποτελεί μία από τις περιοχές του Ελληνικού χώρου που εμφανίζει έντονη σεισμική δραστηριότητα και υψηλή σεισμικότητα. Η ιστορική και η σύγχρονη ενόργανα καταγεγραμμένη, σεισμικότητα επιβεβαιώνουν απόλυτα ότι η τάφρος του Κορινθιακού Κόλπου αποτελεί μία από τις περισσότερο ενεργές σεισμικά περιοχές στο κόσμο. (Ambraseys & Jackson 1990, 1997; Papazachos & Papazachou 1989, 1997; Papadopoulos 2000). Σύμφωνα με τον McKenzie (1972), η μελέτη των μηχανισμών γένεσης των σεισμών, έδειξε ότι κατά μήκος του Κόλπου επικρατούν εφελκυστικές τάσεις διεύθυνσης Β-Ν. Αυτό επιβεβαιώνεται και με τις γεωδαιτικές μετρήσεις (Billiris et al., 1991, Tselentis & Makropoulos 1986), οι οποίες καταδεικνύουν την απομάκρυνση κατά 1 cm/year μεταξύ της βόρειας και νότιας ακτής του Κόλπου και την κατά 1 mm/year βύθιση της βόρειας ακτής ως προς την νότια.

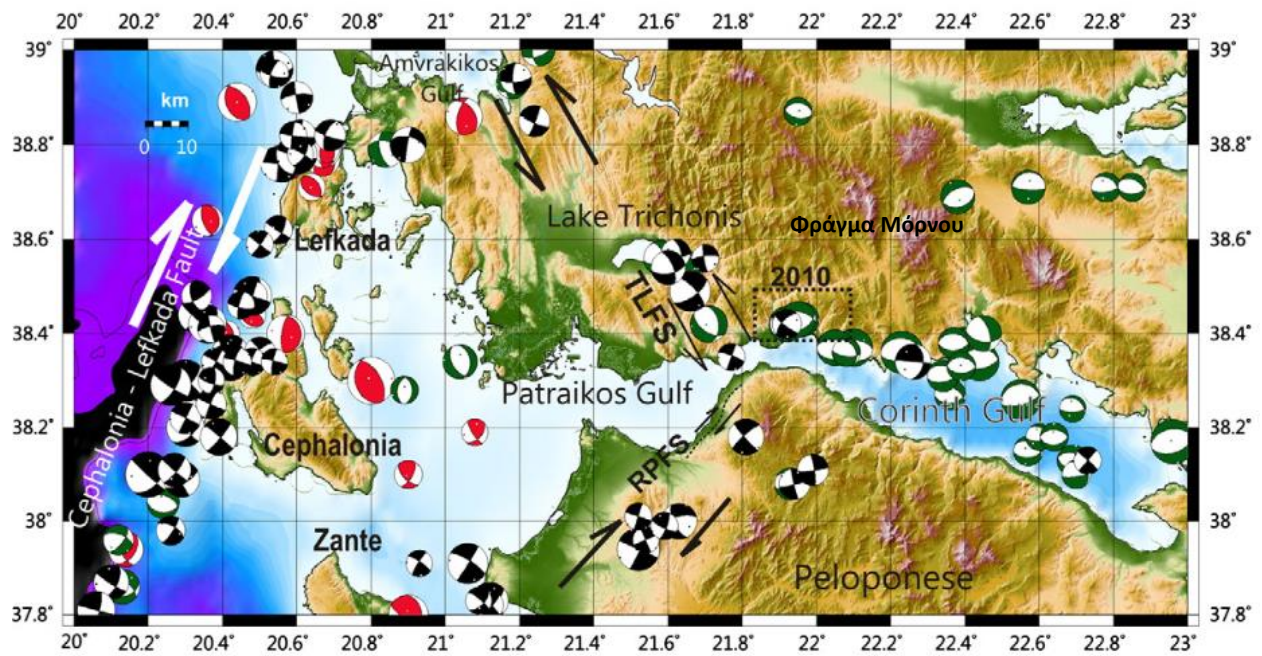
Επίσης, σύμφωνα με τους Valkaniotis et al (2008), ο Κορινθιακός Κόλπος είναι ένα ενεργό τεκτονικά τέμαχος με υψηλό ρυθμό ολίσθησης της τάξεως των 6-20 mm/year.

Το τελευταίο χρονικά διάστημα αξίζει να σημειωθεί ότι στην ευρύτερη περιοχή του φράγματος έχουν καταγεγραφεί αρκετά σεισμικά γεγονότα πάνω από $M_w = 5$ Ριχτερ. Πιο συγκεκριμένα τον Ιούνιο του 1995 (15/6/1995) στην περιοχή του Αιγίου σημειώθηκε μία ισχυρή σεισμική δόνηση της τάξεως των $M_w = 6.2$ Ριχτερ, τον Απρίλιο του 2007 (10/4/2007) στην περιοχή της λίμνης Τριχωνίδας σημειώθηκε μια σειρά ισχυρών σεισμών με μεγαλύτερο μέγεθος $M_w = 5.2$ Ριχτερ. Τον Δεκέμβριο του 2008 (13/12/2008) στην περιοχή της Αμφίκλειας σημειώθηκε σεισμική δόνηση μεγέθους $M_w = 5,2$ Ριχτερ. Τέλος στην περιοχή του Ευπαλίου, τον Ιανουάριο του 2010 (18&22/01/2010) σημειώθηκαν στο ίδιο χώρο δύο σεισμικά γεγονότα μεγέθους $M_w = 5.2$ Ριχτερ και $M_w = 5,1$ Ριχτερ αντίστοιχα. Και στα τέσσερα σεισμικά γεγονότα που αναφέρθηκαν παραπάνω ακολούθησε έντονη μετασεισμική δραστηριότητα. Στους παρακάτω χάρτες απεικονίζονται η σεισμικότητα της περιοχής (Εικόνα 8) καθώς επίσης και οι μηχανισμοί γένεσης των κυριότερων σεισμικών γεγονότων. (Εικόνα 9).



Εικόνα 8: Σεισμικότητα της ευρύτερης περιοχής του Κορινθιακού κόλπου την χρονική περίοδο 1993-2010

(Πηγή: EMSC, ίδιας επεξεργασίας).



Εικόνα 9: Μηχανισμοί γένεσης των κυριότερων σεισμικών γεγονότων του Κορινθιακού κόλπου

(Πηγή: Sokos et al. 2012, ίδιας επεξεργασίας)

Κεφάλαιο 3 Φράγματα

3.1 Σκοπός Κατασκευής

Το φράγμα είναι τεχνικό έργο που κατασκευάζεται κάθετα στην κοίτη ενός φυσικού υδατορέματος για να ανακάμψει τη συνέχεια της ροής με σκοπό την αποθήκευση του νερού για μελλοντική χρησιμοποίησή του.

Σκοπός της κατασκευής ενός φράγματος μπορεί να είναι:

- Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Η άρδευση καλλιεργούμενων εδαφών
- Η ύδρευση πόλεων, οικισμών ή βιομηχανικών μονάδων
- Η διαμόρφωση πλωτών διωρύγων
- Η ρύθμιση της παροχής φυσικών ρευμάτων

Στον ελληνικό χώρο, τα γνωστότερα φράγματα είναι αυτά που σχετίζονται:

- ✚ **Με υδροηλεκτρική χρήση**, όπως του Λούρου (1954), του Λάδωνα (1955), του Ταυρωπού (1959), των Κρεμαστών (1965), του Καστρακίου (1969), του Πολυφύτου (1974), του Πουρναρίου (1981), της Σφηκιάς και των Ασωμάτων (1985), του Στρατού (1988) κ.ά..
- ✚ **Με υδρευτική χρήση**, όπως του Μαραθώνα που ξεκίνησε το έτος 1926 και ολοκληρώθηκε το 1931, του Μόρνου που ολοκληρώθηκε το έτος 1979 κ.ά..
- ✚ **Με αρδευτική χρήση**, όπως της Λευκόγειας Δράμας (1972), της Απολακκιάς Ρόδου (1978), του Λειβαδιού Αστυπάλαιας (1978), της Φανερωμένης και της Πλακιώτισσας στην περιοχή Μεσαράς Ηρακλείου (1980), του Δόξα στην περιοχή του Φενεού Κορινθίας (1982), της Φωλιάς Καβάλας (1983), του Κατάφυτου Δράμας (1984) κ.ά..

Στη σύγχρονη εποχή η πλειονότητα των φραγμάτων χρησιμοποιείται για πολλαπλούς σκοπούς. Συγκεκριμένα παγκοσμίως τα φράγματα χρησιμοποιούνται για αρδευτικούς σκοπούς (37%), για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (16%), για παροχή πόσιμου νερού (12%), για αντιπλημμυρικό έλεγχο (6%), για σκοπούς αναψυχής (3%) και για λοιπούς σκοπούς (4%).

Τα οφέλη από τη λειτουργία αυτών των φραγμάτων υπήρξαν πολλαπλά, όμως έχουν σε πολλές περιπτώσεις σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

3.2 Τύποι Φραγμάτων

Τα φράγματα είναι έργα δαπανηρά, παρουσιάζουν όμως μακροπρόθεσμα μεγάλα οικονομικά οφέλη και για τον λόγο αυτό επιδιώκεται η κατασκευή τους. Ανάλογα με το σκοπό που πρόκειται να εξυπηρετήσει η κατασκευή ενός φράγματος, μελετάται και βρίσκεται τόσο ο καλύτερος τύπος όσο και οι απαιτούμενες διαστάσεις του. Είναι έργα ιδιόμορφα που δεν είναι δυνατόν να τυποποιηθούν εφ' όσον το καθένα έχει τη δική του λειτουργία, τους δικούς του φυσικούς παράγοντες και το δικό του φυσικό περιβάλλον, παράμετροι που παίζουν σπουδαίο ρόλο για τη θεμελίωση του. Μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

Ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετούν:

- ❖ Φράγματα συγκέντρωσης νερού.
- ❖ Φράγματα εκτροπής. Εκτρέπουν προσωρινά ή μόνιμα τη ροή του νερού για εργασίες εν ξηρώ ή για διευθέτηση.
- ❖ Φράγματα ανάσχεσης της ορμής είτε για περιορισμό της διάβρωσης είτε για τεχνητό εμπλουτισμό.
- ❖ Φράγματα ρύθμισης για τον έλεγχο και την πρόληψη πλημμυρών.

Ανάλογα με το σκοπό εκμετάλλευσης :

- ❖ Υδροηλεκτρικά
- ❖ Αρδευτικά
- ❖ Υδρευτικά
- ❖ Αντιπλημμυρικά
- ❖ Εμπλουτισμού υδροφόρων

Ανάλογα με το ύψος:

- ❖ Μικρά φράγματα ύψους $<15\text{m}$
- ❖ Μεγάλα φράγματα ύψους $>15\text{m}$ ή $5 < \text{Υψος} < 15$ και χωρητικότητα νερού $> 3000000 \text{ m}^3$
- ❖ Πολύ μεγάλα φράγματα ύψους $>150\text{m}$

Βασικές κατηγορίες ανάλογα με την κατασκευή και τη γεωμετρία τους:

I. Άκαμπτα

- ❖ Φράγματα βαρύτητας
- ❖ Αντηριδωτά φράγματα
- ❖ Θολωτά φράγματα

II. Εύκαμπτα

- ❖ Χωμάτινα φράγματα
- ❖ Λιθόρριπτα φράγματα

3.3 Αστοχία Φραγμάτων – αίτια και αποτελέσματα

Η γνώση που απαιτείται για την κατασκευή φραγμάτων σε αρκετές περιπτώσεις ήταν απόρροια μεγάλων καταστροφών. Οι μηχανισμοί που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των φραγμάτων έγιναν περισσότερο κατανοητοί μέσω της αστοχίας μερικών από αυτά. Κάποιες αστοχίες είχαν τεράστιες συνέπειες κυρίως επειδή προκάλεσαν το θάνατο χιλιάδων ανθρώπων. Αστοχίες φραγμάτων έχουν καταγραφεί ήδη από το 1219 και συνεχίζουν να καταγράφονται μέχρι και σήμερα. Μεταξύ των σύγχρονων, πολύνεκρων αστοχιών φραγμάτων συμπεριλαμβάνονται εκείνες των South Fork (1889, Η.Π.Α.), Malpasset (1959, Γαλλία), Vaiont (1963, Ιταλία) και Banqiao Dam (1975, Κίνα).

Το φράγμα South Fork στην Πενσυλβανία (Η.Π.Α.) ήταν ένα χωμάτινο φράγμα ύψους 21.9m και μήκους στέγης 284m. Τον Μάιο 1889 μετά από εκτεταμένες πλημμύρες και αδυναμία του υπερχειλιστή να αποφορτίσει τον ταμιευτήρα, ένα κύμα ύψους 0.5m πέρασε πάνω από τη στέγη του φράγματος προκαλώντας την αστοχία του. Το νερό που απελευθερώθηκε έφτανε σε όγκο τους 20 εκατομμύρια τόνους και κατέληξε στην πόλη Johnstown 23km κατάντη του φράγματος καταστρέφοντας την σχεδόν ολοκληρωτικά. Το αποτέλεσμα ήταν ο θάνατος 2209 ανθρώπων

και ανυπολόγιστες υλικές ζημιές. Η αστοχία του φράγματος South Fork έκανε φανερή την ανάγκη για παρακολούθηση, συντήρηση και διασφάλιση της σωστής λειτουργίας στο μέλλον όχι μόνο του ίδιου του φράγματος αλλά και των δευτερευόντων κατασκευών του όπως π.χ. οι υπερχειλιστές.

Η πρώτη μεγάλη καταστροφή εξαιτίας αστοχίας φράγματος στον 20^ο αιώνα ήταν εκείνη του φράγματος Malpasset στη Γαλλία το 1959. Πρόκειται για ένα τοξωτό φράγμα από σκυρόδεμα ύψους 60m και μήκους στέψης 223m. Δυστυχώς ρωγμές που είχαν εμφανιστεί κοντά στο πόδι της κατάντη πλευράς δεν έτυχαν της απαιτούμενης προσοχής και εβδομάδες αργότερα μετά την εμφάνισή τους το φράγμα αστόχησε. Έρευνες έδειξαν ότι η αστοχία οφειλόταν στην παρουσία ενός ρήγματος που δεν είχε εντοπιστεί κατά τη διάρκεια μελέτης του φράγματος. Το νερό συγκεντρώνονταν κάτω από το φράγμα χωρίς να έχει δυνατότητα διαφυγής μέσα από το βράχο με αποτέλεσμα την παρουσία ασυνήθιστα μεγάλων πιέσεων κάτω από την κατασκευή. Τελικά ολόκληρος ο τοίχος του φράγματος κατέρρευσε, απελευθερώνοντας ένα κύμα νερού ύψους 40m που κατέστρεψε τα χωριά Malpasset και Bozon, προκάλεσε το θάνατο 421 ανθρώπων και υλικές καταστροφές κόστους 68 εκατομμυρίων δολαρίων. Η περίπτωση του φράγματος Malpasset αποτέλεσε μια από τις αιτίες που οδήγησαν τελικά στην καθιέρωση της συνεχούς και συστηματικής παρακολούθησης των ήδη υπαρχόντων φραγμάτων και στη λεπτομερή μελέτη της γεωλογίας της περιοχής όπου πρόκειται να κατασκευαστεί ένα φράγμα.

Παρόλα αυτά η καταστροφή δεν έρχεται μόνο με την αστοχία του ίδιου του φράγματος. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του φράγματος Vaiont (Ιταλία), ενός τοξωτού φράγματος από σκυρόδεμα, ύψους 262m και μήκους στέψης 190m. Την αστοχία του τον Οκτώβριο 1963 προκάλεσε μια κατολίσθηση συνολικού όγκου $260 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ανάντη του φράγματος. Η κατολίσθηση ενεργοποιήθηκε κατά την διάρκεια της πρώτης πλήρωσης του ταμιευτήρα, μετά από δύο εβδομάδες συνεχούς βροχόπτωσης και παρά τα μέτρα ελέγχου που είχαν ληφθεί. Το νερό που εκτοπίστηκε πέρασε πάνω από τη στέψη του φράγματος στην κοιλάδα κατάντη με ένα κύμα ύψους 250m προκαλώντας το θάνατο 1909 ανθρώπων και ανυπολόγιστες υλικές ζημιές καταστρέφοντας ολοκληρωτικά τα χωριά Longarone, Pirago, Rivalta, Villanova και Fae. Παρά την καταστροφή το φράγμα δεν υπέστη σημαντικές φθορές. Ακόμη και σήμερα διατηρείται στη θέση του ακέραιο.

Η μεγαλύτερη καταστροφή από αστοχία φράγματος που έχει καταγραφεί μέχρι και σήμερα κυρίως ως προς τον αριθμό των απωλειών ανθρωπίνων ζωών είναι εκείνη που προκλήθηκε από την αστοχία του φράγματος Banqiao, ενός χωμάτινου φράγματος ύψους 118m, στην Κίνα το

1975. Ο απολογισμός ήταν 231000 άνθρωποι νεκροί εκ των οποίων οι 145000 πέθαναν εξαιτίας των επιδημιών που ακολούθησαν τις πλημμύρες. Η αστοχία του φράγματος αποδόθηκε στη ραγδαία αύξηση της στάθμης στον ταμιευτήρα του, λόγω ισχυρών και μεγάλης διάρκειας βροχοπτώσεων. Το ύψος της βροχής έφτασε το ένα μέτρο μέσα σε τρεις ημέρες. Η βροχή κατέστρεψε το σύστημα τηλεπικοινωνιών με αποτέλεσμα οι υπεύθυνοι του φράγματος να μην ενημερώνονται για τις καιρικές συνθήκες και τη στάθμη του νερού στα ανάντη. Αυτό σε συνδυασμό με τη μειωμένη δυνατότητα των υπερχειλιστών να διοχετεύσουν τα πλημμυρικά νερά εξαιτίας κακής συντήρησης οδήγησε στην αστοχία του φράγματος.

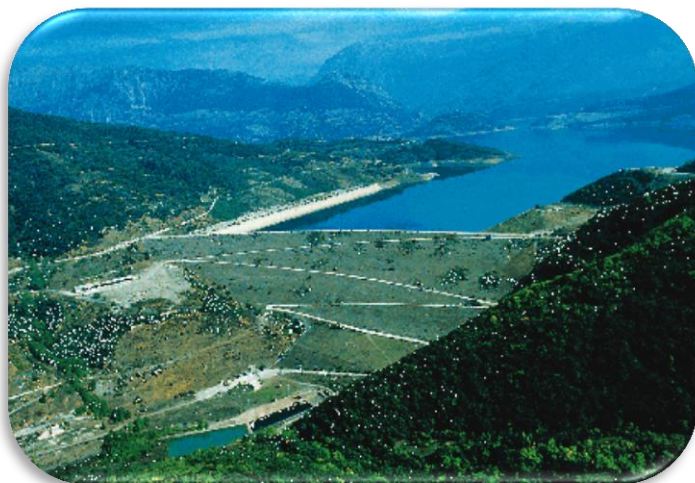
Οι πλέον πρόσφατες σημαντικές αστοχίες φραγμάτων είναι εκείνες του φράγματος Zeyzoun στη Συρία (2002) και των φραγμάτων Campos Novos στη Βραζιλία (2006) και Gusau στη Νιγηρία (2006). Η αστοχία του πρώτου είχε ως αποτέλεσμα το θάνατο 10 ανθρώπων και τεράστιες υλικές ζημιές. Η αστοχία του δεύτερου μπορεί να μην είχε απώλειες ανθρώπινων ζωών αλλά προκάλεσε σημαντικές υλικές ζημιές καθώς 3000 άνθρωποι αναγκάστηκαν να εγκαταλείψουν τα σπίτια τους. Η αστοχία του φράγματος στη Νιγηρία προκάλεσε το θάνατο 40 ατόμων και 1000 ακόμη οικογένειες έχασαν τις περιουσίες τους.

3.4 Το φράγμα του Μόρνου

Το φράγμα Μόρνου κατασκευάστηκε μεταξύ των ετών 1972-1979 (Εικόνα 10) και ο ταμιευτήρας μπήκε πρώτη φορά σε λειτουργία, για την ύδρευση της Αθήνας, το 1981. Κατασκευάστηκε με σκοπό την ενίσχυση του συστήματος υδροδότησης της Αθήνας. Αποτελεί τη μεγαλύτερη και σημαντικότερη πηγή υδροληψίας της Ε.ΥΔ.Α.Π. καθώς λαμβάνει και αποθηκεύει τα πλεονάζοντα νερά του ταμιευτήρα του Ευήνου και ενισχύει τον ταμιευτήρα του Μαραθώνα. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Μόρνου περικλείεται από τις οροσειρές Γκιώνας, Οίτης και Βαρδουσίων. Γειτονεύει ανατολικά με τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, βόρεια με τη λεκάνη του Σπερχειού, δυτικά με τις λεκάνες Ευήνου και Αχελώου. Η έκταση της λεκάνης ανάντη του φράγματος φτάνει τα 557 km² και της συνολικής λεκάνης τα 935.8 km². Ο ποταμός Μόρνος έχει τις πηγές του στις νότιες πλαγιές της Οίτης και εκβάλλει στον Κορινθιακό κόλπο. Η γεωλογική εικόνα της λεκάνης είναι αρκετά πολύπλοκη, αλλά δύο κύριοι σχηματισμοί συνθέτουν τη δομή της : οι ασβεστόλιθοι και ο φλύσχης. Οι σχηματισμοί αυτοί καλύπτονται σε πολλές περιοχές από νεότερες τεταρτογενείς αποθέσεις.



Εικόνα 10: Δορυφορική εικόνα του Φράγματος Μόρνου και της λεκάνης απορροής.



Εικόνα 11: Η κατόντη (Αριστερά) και ανάντη (Δεξιά) πλευρά του φράγματος Μόρνου.

3.4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Το φράγμα του Μόρνου (Εικόνα 12) είναι χωμάτινο, με κεντρικό κατακόρυφο αργιλικό πυρήνα και εκατέρωθεν σώματα αντιστηρίξεως από συμπυκνωμένα αμμοχάλικα. Το μέγιστο ύψος από τη θεμελίωση είναι 139m, το μήκος στη στέψη είναι 816m, το πλάτος στη στέψη είναι 10 m και στον πυθμένα 600m, ενώ ο όγκος του φράγματος $17 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Το φράγμα έχει μια ελαφρά καμπυλότητα προς τα ανάντη. Το ανάντη πρανές του φράγματος έχει κλίση 1:2.4 και το κατόντη πρανές κλίση 1:2. Στο ανάντη πρανές έχει ενσωματωθεί και το πρόφραγμα που χρησιμοποιήθηκε για την προσωρινή εκτροπή του ποταμού. Το θεωρητικό υψόμετρο της στέψης είναι +446.50. Η μέγιστη υπερύψωση (CAMBER) που δόθηκε στο φράγμα για να αντισταθμιστούν οι μελλοντικές καθιζήσεις ήταν 1.24m.

Ο ταμιευτήρας Μόρνου έχει μέγιστη χωρητικότητα $780 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ και ωφέλιμη $650 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Η μέγιστη στάθμη του αποθηκευόμενου ύδατος είναι +435.00, η μέγιστη στάθμη πλημμύρας +443.65 και η κατώτατη στάθμη εκκένωσης +347.50.

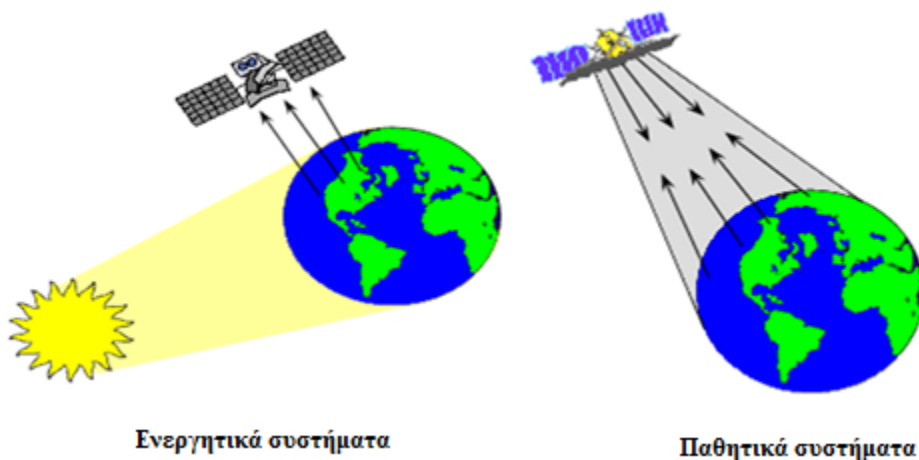
Στην έδραση του σώματος του φράγματος και τα εκατέρωθεν αυτού αντερείσματα έχουν κατασκευασθεί στοές και σήραγγες συνολικού μήκους 5550m και έχουν γίνει 90.00m γεώτρησεων με τσιμεντενέσεις σε βάθος που φθάνει τα 120m (Εικόνα 13). Η κατασκευή των στοών του φράγματος τελείωσε το Μάιο 1973, ενώ η κατασκευή σώματος του φράγματος ολοκληρώθηκε τον Οκτώβριο 1976. Στην περιοχή Πύρνου (επί της αριστερής όχθης του ταμιευτήρα) έχει κατασκευασθεί ασφατικός τάπητας στεγάνωσης και σήραγγα τσιμεντενέσεων μήκους 3200m εφοδιασμένη με στοές αποστράγγισης. Το έργο υδροληψίας βρίσκεται κοντά στο Λιδωρίκι απ' όπου ξεκινά η πρώτη σήραγγα του υδραγωγείου (σήραγγα Γκιώνας).

Κεφάλαιο 4 Δορυφορικά Συστήματα Παρακολούθησης

Τα δορυφορικά συστήματα παρακολουθήσεως και απεικόνισης της Γης διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με την πηγή ακτινοβολίας που καταγράφουν (Εικόνα 14): στα παθητικά συστήματα και στα ενεργητικά συστήματα.

❖ Τα παθητικά συστήματα ανιχνεύουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η εκπομπή της οποίας μπορεί να οφείλεται στην ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας ή στην εκπομπή λόγω θερμοκρασίας των σωμάτων παρατήρησης, στο θερμικό υπέρυθρο (thermal infrared). Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν το τμήμα του φάσματος το οποίο εκτείνεται από πολύ μικρά μήκη κύματος (μικρότερα από $0.4\mu\text{m}$) της υπεριώδους ακτινοβολίας έως την περιοχή του μήκους κύματος $1000\mu\text{m}$. Ανάλογα με την εφαρμογή επιλέγετε και η αντίστοιχη φασματική περιοχή.

❖ Τα ενεργητικά συστήματα βασίζονται στην ανάκλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που εκπέμπονται από άλλη εξωτερική πηγή π.χ από τον ίδιο τον ανιχνευτή/radar. Συνήθως το σύστημα καταγραφής είναι αυτό που εκπέμπει και την ενέργεια προς την επιφάνεια και στην συνέχεια ανακλάται επιστρέφει και καταγράφει την ηχώ του σήματος. Τα ενεργητικά συστήματα όπως τα Ραντάρ εκπέμπουν στην περιοχή των μικροκυμάτων. Ένα από τα πλεονεκτήματα των ενεργητικών συστημάτων είναι ότι έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιούνται μέρα και νύχτα, σε όλες τις καιρικές συνθήκες.



Εικόνα 14: Κατηγορίες δορυφορικών συστημάτων παρακολούθησης

4.1 Συστήματα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος

4.1.1 Γενικά στοιχεία

Τα συστήματα Ραντάρ (Radio Detection and Ranging) αποτελούν ενεργητικά συστήματα τα οποία εκπέμπουν ακτινοβολία μικροκυμάτων σε συγκεκριμένη συχνότητα (220 MHz – 40GHz) και ανιχνεύουν την οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία δηλαδή την ακτινοβολία που επιστρέφει στον αισθητήρα λόγω ανάκλασής του στις διάφορες επιφάνειες. Η ένταση του σήματος οπισθοσκέδασης μετράται με τον συντέλεστη ανάκλασης σθ, το οποίο εξαρτάται από την γεωμετρία του ανάγλυφου και τη διηλεκτρική σταθερά της επιφάνειας. Τα συστήματα ραντάρ λειτουργούν εντελώς ανεξάρτητα από τον ηλιακό φωτισμό μιας και παρέχουν τη δική τους ακτινοβολία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καταγράφουν την ακτινοβολία ανεξαρτήτου καιρικών συνθηκών και νεφοκαλύψεων πράγμα το οποίο τα καθιστούν παντός καιρού. Η ικανότητα διείσδυσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας σε νέφη και βροχοπτώσεις αυξάνεται με το μήκος κύματος.

Τα συστήματα ραντάρ αποτελούνται από ένα πομποδέκτη. Ο πομπός εκπέμπει παλμούς μικροκυματικής ακτινοβολίας την οποία τα αντικείμενα στο έδαφος την ανακλούν σύμφωνα με τα γεωμετρικά και διηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους και ο δέκτης του ραντάρ καταγράφει το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα (ηχώ). Ο χρόνος επιστροφής του παλμού μετά την ανάκλαση του στους διάφορους στόχους καθορίζει τη απόστασή τους από το ραντάρ και κατ'επέκταση τη θέση τους στο χώρο. Έτσι καθ'αυτό τον τρόπο, μια δισδιάστατη απεικόνιση της επιφάνειας του εδάφους επιτυγχάνεται με τη συνεχή καταγραφή και επεξεργασία του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος κατά την κίνηση του δορυφόρου. (Καρτάλης,2006)

Στη δορυφορική τηλεπισκόπηση χρησιμοποιούνται δύο είδη ραντάρ, τα ραντάρ πραγματικού ανοίγματος κεραίας (Real Aperture Radar, RAR) και τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος κεραίας (Synthetic Aperture Radar, SAR). Τα ραντάρ RAR χρησιμοποιούν κεραίες μεγάλου μήκους για την εκπομπή γωνιακής δέσμης ακτινοβολίας έτσι ώστε λόγω του μικρού εύρους φωτισμού και της μεγάλης χωρικής διακριτικής ικανότητας, να καλύπτουν μεγάλες περιοχές σάρωσης. Για την λεπτομερή όμως απεικόνιση της επιφάνειας του εδάφους, απαιτούνται κεραίες με μικρό μήκος ώστε να μπορούν να εγκαθίστανται στους δορυφόρους και να γίνεται πιο εύκολη η μεταφορά τους. Έτσι το 1951 προτάθηκε από τον Carl Wiley τα συστήματα εικονοληπτικών ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar, SAR) προκειμένου να ξεπεραστεί το μειονέκτημα του μήκους της κεραίας των συστημάτων RAR (Wiley, 1954). Τα συστήματα SAR

συνθέτουν εικονικές κεραίες πολύ μεγάλου μήκους, αξιοποιώντας την κίνηση του δορυφόρου και την αρχή του φαινομένου Doppler με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας. (Καρτάλης, 2006 ;Φουμέλης, 2009). Οι αισθητήρες SAR εκπέμπουν και δέχονται κύματα στο μικροκυματικό τμήμα το οποίο αποτελείται από τις ζώνες P, L, S, C, X, K, Q, V και W.

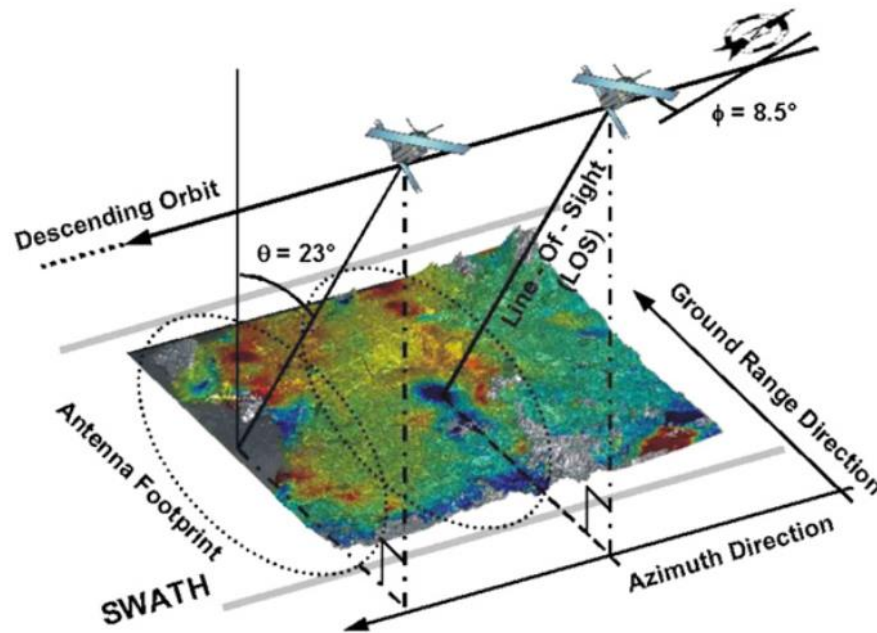
Η NASA το 1978 εγκατέστησε το πρώτο διαστημικό σύστημα SAR στον γεωστατικό δορυφόρο SEASAT το οποίο λειτούργησε για περίπου έξι εβδομάδες πριν διακοπή ξαφνικά η λειτουργία του (Lame & Born, 1982). Έπειτα ακολούθησε, στα πλαίσια διάφορων διαστημικών προγραμμάτων, η κατασκευή και εκτόξευση εξελιγμένων δορυφορικών εικονοληπτικών συστημάτων SAR όπως ο ERS-1 (ESA,1991), ERS-2 (ESA,1995), JERS-1 (Nemoto et al., 1991; Nishidai et al., 1994), RADARSAR-1(Raney et al., 1991), RADARSAR-2 (Καναδάς), SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (Werner, 2001), ENVISAT ASAR (Ευρώπη), ALOS PALSAR (Ιαπωνία), TerraSAR-X (Γερμανία) και Cosmo-SkyMed (Ιταλία).

4.1.2 Γεωμετρία εικονοληψίας συστημάτων SAR

Η γεωμετρία της εικονοληψίας ενός συστήματος SAR (Εικόνα 15) διαφέρει σημαντικά σε σχέση με τους οπτικούς σαρωτές οι οποίοι συλλέγουν την ανακλώμενη ακτινοβολία κυρίως από το ναδίρ της τροχιάς. Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, τα συστήματα εικονοληπτικών SAR αποτελούν ενεργά συστήματα εκπομπής και λήψης μικροκυματικής ακτινοβολίας συγκεκριμένου μήκους κύματος (λ), το οποίο καθορίζει τα χαρακτηριστικά της σκέδασης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας καθώς και το βάθος διείσδυσης στην μάζα του στόχου (Μέρτικας, 1999).

Η μικροκυματική δέσμη μεταδίδεται υπό γωνία και προς τα δεξιά τη δορυφορικής πλατφόρμας (Right-side looking) είτε αυτή εκτελεί ανερχόμενη τροχιά (Από Νότο προς Βορρά)(Ascending orbit) είτε κατερχόμενη τροχιά (από Βορρά προς Νότο) (Descending orbit). Η διεύθυνση κατά την οποία ένα εικονοληπτικό σύστημα SAR εκπέμπει και λαμβάνει την ακτινοβολία καλείται διεύθυνση παρατήρησης (look direction ή Line of Sight, LOS) ενώ η γωνία από το ναδίρ ως τον εκάστοτε στόχο στην επιφάνεια καλείται γωνία παρατήρησης (look angle, θ). Η γωνία αυτή είναι πολύ σημαντική καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ένταση της οπισθοσκέδασης (backscattering) των στόχων της επιφάνειας. Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της δέσμης και του εδάφους καλείται γωνία πρόσπτωσης (incidence angle). Το εύρος της

περιοχής σάρωσης καλείται πλάτος κάλυψης (Swath, S_w). Η διεύθυνση κίνησης του δορυφόρου καλείται διεύθυνση αζιμούθιου της απεικόνισης (along track ή azimuth direction) ενώ η κάθετη προς την διεύθυνση του αζιμούθιου της απεικόνισης καλείται διεύθυνση της πλάγιας απόστασης της απεικόνισης (across track ή range direction).



Εικόνα 15: Γεωμετρία εικονοληπτικού συστήματος SAR (Colesanti and Wasowski, 2006)

Τα συστήματα SAR εκπέμπουν παλμούς με σταθερή ταχύτητα, τη σταθερή συχνότητα επανάληψης (PRF), σε εύρος συχνοτήτων MHz-GHz, με στόχο να φτάσουν τα αντικείμενα παρατήρησης στην επιφάνεια της γης. Η συχνότητα και το μήκος κύματος εξαρτώνται από την πλατφόρμα που χρησιμοποιεί το Ρανταρ καθώς επίσης και τις εφαρμογές για τις οποίες είναι κατασκευασμένος ο εκάστοτε δορυφόρος. Στον Πίνακα 1 παραθέτονται τα χαρακτηριστικά των διάφορων φασματικών καναλιών λειτουργίας των συστημάτων Ρανταρ.

Κανάλι	Περιοχή συχνοτήτων GHz	Μήκος κύματος (cm)
Ka	26,5 - 40	0,75 – 1,18
K	18 – 26,5	1,18 – 1,67
Ku	12,5 – 18	1,67 – 2,40
X	8 – 12,5	2,4 – 3,75
C	4 - 8	3,75 – 7,5
S	2 – 4	7,5 – 15
L	1 – 2	15 – 30
P	0,3 – 1	30 – 100

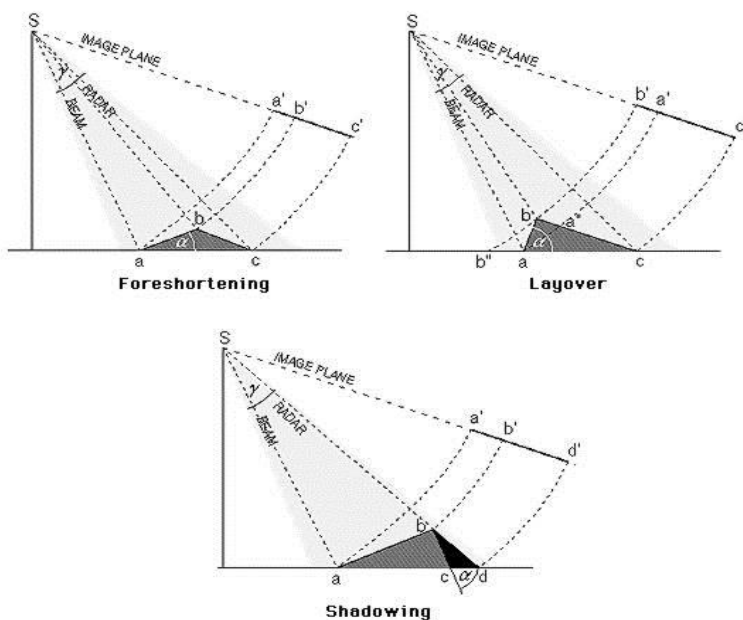
Πίνακας 1: : Εύρη συχνοτήτων και μηκών κύματος φασματικών καναλιών λειτουργίας των Ραντάρ

Η πόλωση του εκπεμπόμενου παλμού επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της οπισθοσκέδασης ενός στόχου. Η λήψη εικόνων παράλληλης πόλωσης, HH (οριζόντια εκπομπή, οριζόντια λήψη) ή VV (κατακόρυφη εκπομπή, κατακόρυφη λήψη) προτιμάται καθώς παρέχουν πιο ισχυρά σήματα επιστροφής. (Κουρκούλη, 2010)

Η χωρική διακριτική ικανότητα ενός συστήματος Ραντάρ είναι η ελάχιστη απόσταση δύο αντικειμένων- στόχων που μπορούν να διακριθούν σε μία εικόνα και είναι συνάρτηση συγκεκριμένων ιδιοτήτων της μικροκυματικής ακτινβολίας και της γεωμετρίας της εικονοληψίας. Εξαρτάται από το μήκος κύματος του παλμού (P) στην διεύθυνση της κεκλιμένης απόστασης, που είναι κάθετη στη διεύθυνση του δορυφόρου και από το πλάτος σάρωσης της επιφάνειας στην διεύθυνση του αζιμούθιου, που είναι παράλληλη της τροχιάς του δορυφόρου. Ως εκ τούτου, ορίζονται δύο χωρικές διακριτικές ικανότητες, της απόστασης (range or across – track resolution) η οποία καθορίζεται από το μήκος του παλμού και του αζιμούθιου (azimuth or along –track resolution) η οποία καθορίζεται από το εύρος σάρωσης της επιφάνειας από τη δέσμη μικροκυμάτων που δημιουργείται από το γωνιακό πλάτος του σήματος και την κεκλιμένη επιφάνεια (slant range distance).

4.1.3 Χαρακτηριστικά SAR απεικονίσεων

Μια SAR απεικόνιση αποτελεί τη μονοδιάστατη προβολή στην διεύθυνση των κεκλιμένων αποστάσεων, της τρισδιάστατης ανακλαστικότητας μιας περιοχής στην επιφάνεια. Το αξιμούθιο και οι κεκλιμένες αποστάσεις αποτελούν τις φυσικές συντεταγμένες της απεικόνισης, παράμετροι που ορίζουν την γεωμετρία της συνθετικής απεικόνισης (slant range geometry ή range – Doppler geometry) (Φουμέλης, 2009). Επομένως λόγω της γεωμετρίας της παρατήρησης και το ανάγλυφο της επιφάνειας, προκύπτουν μια σειρά από διαδοχικές παραμορφώσεις, όπως το **φαινόμενο της σμίκρυνσης (foreshortening)** το οποίο προκαλεί τη συμπίεση της εικόνας σε διεύθυνση εγκάρσια στο ίχνος της τροχιάς του δορυφόρου με αποτέλεσμα οι ίσες επιφάνειες να απεικονίζονται οπτικά ως άνισες, **το φαινόμενο της αναστροφής (layover)** το οποίο λόγω μεγάλων και απότομων κλίσεων το σήμα φθάνει πρώτα στα σημεία της επιφάνειας με μεγαλύτερο υψόμετρο, οπισθοσκεδάζεται και φθάνει νωρίτερα πίσω στον δέκτη ενώ το σήμα από τα χαμηλότερα υψομετρικά σημεία φθάνει αργότερα στο δορυφόρο, **το φαινόμενο της σκίασης (shadow)** το οποίο παρατηρείται κυρίως στις πλαγιές των ορεινών όγκων με μεγάλες κλίσεις, οι οποίες δεν είναι ορατές από τον δορυφόρο και έχουν αντίθετο προσανατολισμό από την διεύθυνση λήψης του δορυφόρου και επομένως φαίνονται σαν σκιά (Εικόνα 16). Οι παραμορφώσεις αυτές μπορούν εύκολα να αφαιρεθούν χρησιμοποιώντας ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DEM) των εκάστοτε περιοχών μελέτης.



Εικόνα 16: Τύποι παραμορφώσεων λόγω της γεωμετρίας της παρατήρησης και του ανάγλυφου.

(Πηγή: <http://www.geog.ucsb.edu>)

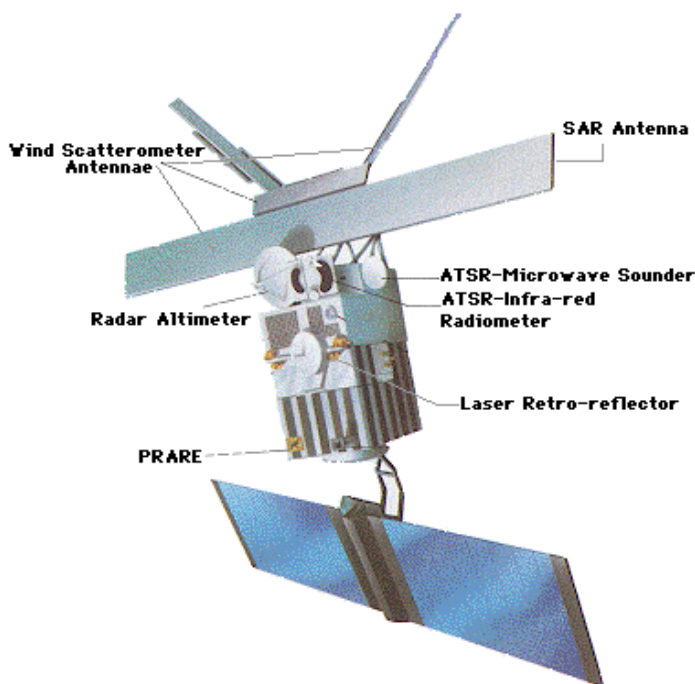
4.1.4 Δορυφορικά συστήματα ERS και ENVISAT

❖ Δορυφόροι ERS-1 & ERS-2

Στη δεκαετία του 1990 ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (European Space Agency, ESA) σχεδίασε το πρόγραμμα δορυφόρων ERS (European Resources Satellites) προκειμένου να τεθούν σε τροχιά ευρωπαϊκά δορυφορικά συστήματα τηλεπισκόπησης. Έτσι το 1991 εκτοξεύτηκε ο πρώτος δορυφόρος της σειράς, ο ERS-1 ενώ το 1995 εκτοξεύτηκε και ο δεύτερος, ο ERS-2. Η τροχιά των δορυφόρων είναι ηλιοσύγχρονη με κλίση $98,5^0$ ως προς τον Ισημερινό, με ύψος τροχιάς στα 785km και κινούνται με ταχύτητα 7 km/sec ολοκληρώνοντας μία πλήρη περιστροφή της Γης σε περίπου 100min επομένως εκτελούν περίπου 14 τροχιές την ημέρα. Η περίοδος επαναληπτικότητας των δορυφόρων από την ίδια περιοχή ορίστηκε στις 35 ημέρες ενώ για το χρονικό διάστημα στο οποίο οι δύο δορυφόροι είχαν κοινή λειτουργία (Μάιος 1995- Μάρτιος 2000) η κάλυψη των περιοχών πραγματοποιείτο με χρονική διαφορά ακριβώς 24 ωρών (tandem mode). Ο ERS-1 σταμάτησε τη λειτουργία του τον Μάρτιο του 2000, αφού ξεπέρασε τον προβλεπόμενο χρόνο λειτουργίας ενώ ο ERS-2 λειτουργεί μέχρι και σήμερα λαμβάνοντας δεδομένα.

Οι δορυφόροι ERS φέρουν μια σειρά από όργανα (Εικόνα 17) με σκοπό την μελέτη του περιβάλλοντος εστιάζοντας στην φυσική ωκεανογραφία, στην παγοκάλυψη και χιονοκάλυψη, στην εδαφοκάλυψη, στη μετεωρολογία, στη γεωδαισία και στην ατμοσφαιρική χημεία. Το βασικό όργανο των ERS είναι το AMI (Active Microwave Instrument) που περιλαμβάνει ένα Ραντάρ SAR (Synthetic Aperture Radar) και το Scatterometer. Το AMI καταγράφει με τρεις τρόπους (modes): το SAR image, το SAR wave και το Wave scatterometer. Επιπλέον οι ERS φέρουν ακόμη ένα ενεργητικό όργανο, το Radar Altimeter, το οποίο στοχεύει σε κατακόρυφη διεύθυνση, πάνω από θάλασσες και πάγους και με βάση την επιστρεφόμενη ηχώ υπολογίζει το ύψος των κυμάτων, την ταχύτητα των επιφανειακών ανέμων, το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας, την τοπογραφία και το ανάγλυφο των πάγων και την οριοθέτησή της από τη θάλασσα. Της, σημαντικό όργανο είναι και ο σαρωτής ATSR (Along track Scanning Radiometer) το οποίο αποτελείται από δύο όργανα: το Infrared Radiometer (IRR) και το Microwave Sounder και το οποίο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας της θάλασσας και της κορυφής των νεφών. Τέλος στον ERS-2 προστέθηκαν άλλα τρία φασματικά

κανάλια (δύο στο ορατό και ένα στο υπέρυθρο) καθώς της και ένα ακόμη όργανο, το GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) το οποίο μελετά θέματα χημείας της ατμόσφαιρας.



Εικόνα 17: Τα όργανα καταγραφής με τα οποία είναι εξοπλισμένος ο δορυφόρος ERS -2.

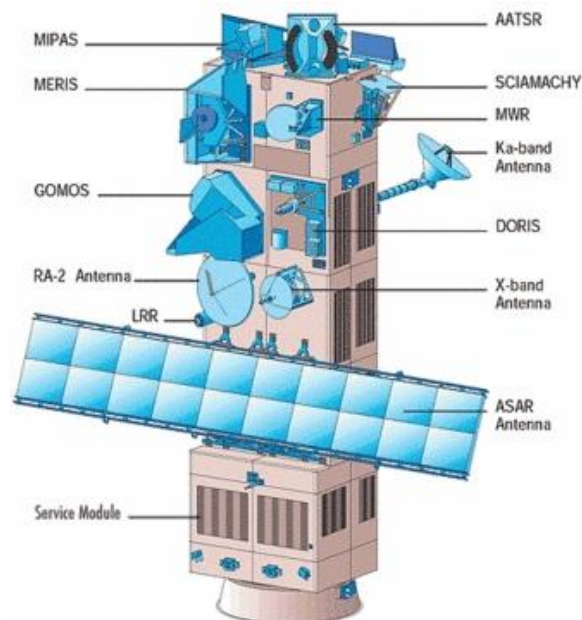
(Πηγή: <http://www.altimetry.info>)

❖ Δορυφόρος ENVISAT

Τον Μάρτιο του 2002 τέθηκε σε πολική τροχιά γύρω από την γη από τον Ευρωπαϊκό Διαστημικό Οργανισμό (ESA), το δορυφορικό σύστημα ENVISAT ASAR αποτελώντας ουσιαστικά την συνέχεια των παλαιότερων αποστολών. Με μήκος 25m και βάρος 8tn είναι ο μεγαλύτερος δορυφόρος παρατήρησης του γήινου περιβάλλοντος που έχει κατασκευαστεί. Ο ENVISAT βρίσκεται σε ηλιοσύγχρονη, σχεδόν πολική, τροχιά (98^0 ως προς τον Ισημερινό) σε ύψος 800Km, με περίοδο επαναληπτικότητας 35 ημερών. Φέρει στην πλατφόρμα του ένα εξελιγμένο Ρανταρ συνθετικού ανοίγματος (ASAR – Advanced SAR) που λειτουργεί στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων (C- band με πόλωση VV) με αυτό των δεκτών SAR των ERS-1 και ERS-2 (AMI). Το βασικότερο πλεονέκτημα του δορυφόρου είναι η δυνατότητα μεταβολής του εύρους της λωρίδας κάλυψης, της χωρικής ανάλυσης καθώς και τις γωνίες παρατήρησης αναλόγως του επιλεγμένου τρόπου λήψης (acquisition mode). Το σύστημα ASAR εκτός της συμβατικής

πόλωσης (VV και HH) (single polarization mode), επιτρέπει και επί πλέον συνδυασμούς (VV/HH, VV/VH και HH/HV)(dual-polarization mode).

Ο ENVISAT φέρει δέκα συμπληρωματικά όργανα για την παρατήρηση παραμέτρων που ποικίλουν από το θαλάσσιο γεωειδές ως και εκπομπές αερίων υψηλής ανάλυσης (Εικόνα 18). Συγκεκριμένα διαθέτει ένα ραντάρ SAR το ASAR (ραντάρ συνθετικού διαφράγματος) που επιτρέπει την παραγωγή εικόνων υψηλής ανάλυσης, το RA-2 ένα αλτίμετρο που χρησιμοποιείται για την χαρτογράφηση της τοπογραφίας των ωκεανών (βαθυμετρία), εντοπισμό των πάγων και προσδιορισμό των ταχυτήτων των ανέμων με σκοπό τη συνεισφορά στην πρόγνωση του καιρού, το DORIS-NG με το οποίο γίνεται η διόρθωση του ύψους της τροχιάς του δορυφόρου, το φασματόμετρο MERIS που μετρά τις ιδιότητες του φωτός στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Επιπλέον, το MWR ένα μικροκυματικό ραδιόμετρο το οποίο εκτελεί μετρήσεις στηλών υδρατμών, νεφών, υγρασίας εδάφους, το AATSR, ένα ραδιόμετρο σάρωσης κατά μήκος της τροχιάς, χρησιμοποιείται για την εξασφάλιση της συνέχειας των δεδομένων που αφορούν τη θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας, με το φωτόμετρο GOMOS να μετρά την περιεκτικότητα των συστατικών της ατμόσφαιρας. Τέλος, το συμβολόμετρο MIPAS και το φασματόμετρο SCIAMACHY μετρούν και αναλύουν τις εκπομπές αερίων στην ατμόσφαιρα και τροπόσφαιρα-στρατόσφαιρα αντίστοιχα.



Εικόνα 18: Τα όργανα καταγραφής με τα οποία είναι εξοπλισμένος ο δορυφόρος ENVISAT

(Πηγή: <https://earth.esa.int>)

4.2 Συμβολομετρία Ραντάρ

Οι εφαρμογές διαστημικής τεχνικής για την παρακολούθηση των εδαφικών και επιφανειακών παραμορφώσεων, τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν χρήσιμα αποτελέσματα. Με την εκτόξευση των δορυφόρων ERS-1 & ERS-2 από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) και την εξέλιξη στην επεξεργασία του σήματος ραντάρ, αναπτύχθηκε μία νέα τεχνική, η τεχνική της Συμβολομετρίας SAR (Interferometry Synthetic Aperture Radar, InSAR). Η τεχνική αυτή επιτρέπει την απομακρυσμένη ανίχνευση της παραμόρφωσης στην επιφάνεια της Γης, και έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τη μέτρηση μετατοπίσεων που σχετίζονται με τους σεισμούς, την ηφαιστειακή δραστηριότητα και πολλά άλλα φαινόμενα παραμόρφωσης του φλοιού της Γης. Οι πρώτες μελέτες που αφορούσαν στη συμβολομετρία εστίαζαν στην εξαγωγή της τοπογραφίας, παράγοντας υψηλής ανάλυσης ψηφιακά μοντέλα αναγλύφου (DEM) (Ferretti et al., 1997).

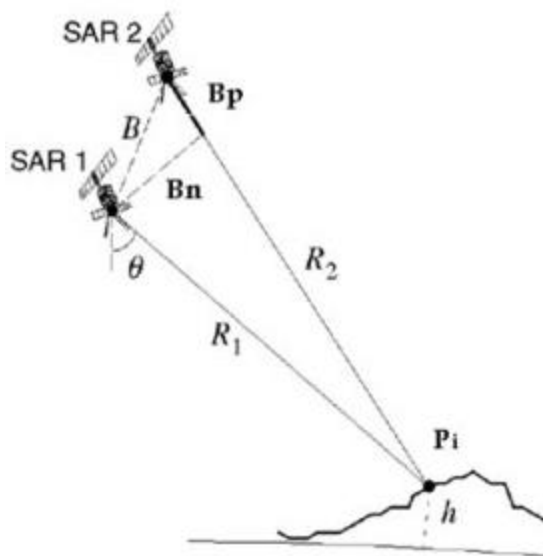
Η τεχνική της Συμβολομετρίας SAR αξιοποιεί τις ιδιότητες των εικόνων ραντάρ που χαρακτηρίζονται από συνάφεια, για να παράγει χάρτες τοπογραφίας, παραμόρφωσης, μεταβολών της επιφάνειας του εδάφους και της ατμόσφαιρας, με υψηλή χωρική ανάλυση και καλή ακρίβεια. Βασική αρχή της τεχνικής αποτελεί η αφαίρεση της μεταβολής της φάσης μεταξύ δύο απεικονίσεων SAR, της ίδιας περιοχής αλλά από ελαφρώς διαφορετικές θέσεις ή σε διαφορετικούς χρόνους, για να υπολογίσει τις διαφορές στο μήκος διαδρομής του παλμού, με ακρίβεια χιλιοστού. Οι διαφορές στο εν λόγω μήκος, συνδέονται άμεσα με σημαντικές παραμέτρους, όπως το υψόμετρο του εδάφους, την παραμόρφωση στην επιφάνεια της Γης και την ατμοσφαιρική καθυστέρηση (Graham 1974, Goldstein & Xebker 1987, Goldstein et al. 1988, Gabriel & Goldstein 1988, Zebker et al. 1994a, MESSONET & FEIGL 1995a, Massonnet & Feigl 1998, Hanssen 1998, Burgman et al. 2000, Rosen et al. 2000).

Ανάλογα με την διάταξη των κεραιών και την μέθοδο λήψης των απεικονίσεων, διακρίνονται διάφορα είδη της Συμβολομετρίας:

- ❖ Η κατά πλάτος συμβολομετρία (across-track Interferometry)
- ❖ Η κατά μήκος συμβολομετρία (along-track Interferometry)
- ❖ Η επαναληπτική συμβολομετρία (repeat-pass Interferometry)
- ❖ Η διαφορική συμβολομετρία (Differential Interferometry)

4.2.1 Βασικές αρχές της Συμβολομετρίας

Μια βασική παράμετρος της συμβολομετρικής γεωμετρίας αποτελεί το άνωσμα βάσης **B** (baseline vector) το οποίο ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ των δύο αισθητήρων (κεραιών) που παρατηρούν κοινούς στόχους στην επιφάνεια της Γης. Το άνωσμα βάσης αναλύεται είτε σε παράλληλη (Parallel Baseline, $B_{||}$) και εγκάρσια συνιστώσα (Perpendicular Baseline, $B_{\perp}$) στη διεύθυνση των αποστάσεων της απεικόνισης είτε σε οριζόντια (B_p) και κατακόρυφη (B_n) συνιστώσα. (Εικόνα 19). Καθοριστικό παράγοντα για την καταλληλότητα ενός ζεύγους SAR απεικονίσεων αποτελεί η εγκάρσια συνιστώσα του ανύσματος βάσης (Perpendicular baseline).



Εικόνα 19: Γεωμετρία ενός συμβολογραφικού συστήματος SAR (Πηγή: Luzi, 2010)

Κάθε σύστημα SAR αποτυπώνει ένα συγκεκριμένο τμήμα της επιφάνειας της Γης μέσα από εικονοστοιχεία τα οποία εμπεριέχουν τόσο το εύρος όσο και την φάση του ανακλώμενου σήματος. Ο μιγαδικός ενός εικονοστοιχείου μιας SAR απεικόνισης εκφράζεται από τη σχέση:

$$y = |y| \cdot e^{-j\varphi}$$

Ο μιγαδικός πολλαπλασιασμός δύο SAR απεικονίσεων παράγει το διάγραμμα κροσσών συμβολής ή συμβολόγραμμα (interferogram). Το συμβολόγραμμα είναι ουσιαστικά μία σύνθετη εικόνα η οποία έχει προέλθει από την εγγραφή δύο ή περισσότερων SAR απεικονίσεων.

Το σήμα που σκεδάζεται από ένα στόχο P_i στην επιφάνεια της Γης και λαμβάνεται από ένα σύστημα Ραντάρ σε μία απόσταση R έχει πλάτος A (amplitude). Είναι ημιτονοειδής μορφής και σχετίζεται με την ένταση της σκέδασης του στόχου αλλά και της φάσης (φ) μεταξύ της μετάδοσης και λήψης του σήματος. Επομένως η φάση του σήματος ενός Ραντάρ εκφράζεται με την μαθηματική σχέση:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2R = \frac{4\pi}{\lambda} R + \varphi_{scatter} + \varphi_{delay}$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος, R η απόσταση μεταξύ δορυφόρου και επιφάνειας του στόχου, $\varphi_{scatter}$ η καθυστέρηση της φάσης λόγω οπισθοσκέδασης και φ_{delay} η καθυστέρηση της φάσης λόγω της ατμοσφαιρικής επίδρασης.

Σε ένα συμβολομετρικό ζεύγος η απόσταση μεταξύ του δορυφορικού συστήματος και του στόχου στην επιφάνεια της Γης μετριέται με την διαφορά φάσης των δύο συστημάτων SAR. Η διαφορά φάσης αυτή ονομάζεται συμβολομετρική φάση και είναι εκφρασμένη στο διάστημα $[-\pi, \pi)$. Η μαθηματική σχέση που εκφράζει την συμβολομετρική φάση είναι:

$$\varphi = \Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} (r_1 - r_2) = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta r + \Delta\varphi_{scatter} + \Delta\varphi_{delay}$$

όπου λ το μήκος κύματος, r_1 και r_2 η απόσταση των συστημάτων SAR από την επιφάνεια του στόχου και το αρνητικό πρόσημο εκφράζει την καθυστέρηση της φάσης του σήματος επιστροφής.

Η διαφορά των αποστάσεων δορυφόρου –στόχου (Δr) μεταξύ των δύο λήψεων εκφράζεται από τη γεωμετρική σχέση:

$$\Delta r = B \sin(\theta - \alpha)$$

Επομένως η συμβολομετρική φάση εκφράζεται ως προς την γεωμετρία του ανύσματος βάσης:

$$\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta - \alpha)$$

Το ύψος του εκάστοτε στόχου από την επιφάνεια συνδέεται με την συμβολομετρική φάσης με τη σχέση:

$$\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{r \sin \theta} h \quad \text{για } B \ll r$$

Η μεταβολή του υψομέτρου μπορεί να προκαλέσει μετατόπιση της συμβολομετρικής φάσης ενός πλήρους κύκλου (2π). Αυτό καλείται ασάφεια υψομέτρου (altitude of ambiguity, h_a) και εκφράζεται από την σχέση:

$$h_a = \frac{\lambda R \sin \theta}{2 B_{\perp}}$$

Μια άλλη βασική παράμετρος είναι η συμβολομετρική συνάφεια (interferometric coherence, γ) η οποία καθορίζει την ποιότητα της συμβολομετρικής φάσης και εκφράζεται με την μαθηματική σχέση (Born et al, 1980):

$$\gamma = \frac{E\{y_1 y_2\}}{\sqrt{E\{|y_1|^2\} \cdot E\{|y_2|^2\}}}$$

όπου y_1, y_2 είναι τα συζυγή εικονοστοιχεία των δύο SAR απεικονίσεων και $E\{\}$ είναι ο χωρικός μέσος όρος.

Ουσιαστικά η συμβολομετρική συνάφεια είναι η μονάδα μέτρησης του θορύβου της φάσης (ως θόρυβος χαρακτηρίζεται κάθε είδους ανεπιθύμητη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή η οποία μειώνει την ικανότητα του συστήματος να ανιχνεύει ασθενικά σήματα) και η ικανότητα διάκρισης των κροσσών συμβολής στο συμβολόγραμμα (Touzi et al., 1999). Οι τιμές της συμβολομετρικής συνάφειας κυμαίνονται από 0 έως 1, με την ελάχιστη τιμή να υποδηλώνει μηδενική συσχέτιση (ή πλήρη αποσυσχέτιση) του σήματος, ενώ αντίστοιχα η μέγιστη τιμή υποδηλώνει την απόλυτη ταύτιση του φάσματος μεταξύ των απεικονίσεων.

Σύμφωνα με τους (Zebker & Villasenor, 1992; Askne et al., 1997) η συμβολομετρική συνάφεια μπορεί να διαχωριστεί σε επί μέρους τμήματα ανάλογα με μια συγκεκριμένη πηγή αποσυσχέτισης του σήματος:

$$|\gamma| = |\gamma|_{\text{processing}} |\gamma|_{\text{noise}} |\gamma|_{\text{DC}} |\gamma|_{\text{spatial}} |\gamma|_{\text{temporal}}$$

Όπου ο όρος $|\gamma|_{\text{processing}}$ εκφράζει την αποσυσχέτιση που προκαλείται από τον επεξεργαστή SAR (SAR processor) για την παραγωγή των απεικονίσεων αλλά και της επεξεργασίας του σήματος για την εκτίμηση της συνάφειας. Ο όρος $|\gamma|_{\text{noise}}$ εκφράζει την αποσυσχέτιση λόγω θερμικού θορύβου εντός του αισθητήρα, ο όρος $|\gamma|_{\text{DC}}$ εκφράζει την αποσυσχέτιση λόγω μερικής επικάλυψης του φάσματος μεταξύ δύο SAR απεικονίσεων στην διεύθυνση του αζιμούθιου.

Τέλος ο όρος $|\gamma|_{\text{spatial}}$ αφορά στην χωρική αποσυσχέτιση του σήματος και ο όρος $|\gamma|_{\text{temporal}}$ αφορά στην χρονική αποσυσχέτιση του σήματος.

Οι δύο τελευταίοι παράγοντες αποτελούν τις σημαντικότερες πηγές αποσυσχέτισης της συμβολομετρικής φάσης. Η χρονική αποσυσχέτιση (temporal decorrelation) προκαλείται από τις αλλαγές που έχουν επέλθει στην περιοχή ενδιαφέροντος κατά την χρονική περίοδο που μεσολαβεί μεταξύ των δύο λήψεων. Τέτοιου είδους αλλαγές μπορεί να είναι μεταβολές της κάλυψης γης καθώς επίσης και αλλαγές στον αστικό ιστό. Η χωρική αποσυσχέτιση διαχωρίζεται σε δύο συνιστώσες: την γεωμετρική αποσυσχέτιση (geometric decorrelation) ή αποσυσχέτιση ανύσματος βάσης (baseline decorrelation) η οποία αποτελεί τον λόγο απώλειας συνάφειας εξαιτίας διαφορών στην γεωμετρία στην λήψη των εικόνων. Το μήκος της εγκάρσιας συνιστώσας του ανύσματος βάσης που προκαλεί μετατόπιση του φάσματος ίση προς το εύρος του συστήματος, οδηγεί σε πλήρη αποσυσχέτιση του σήματος ραντάρ (Φουμέλης, 1999). Πέραν αυτού το κρίσιμο σημείο που καλείται κρίσιμο άνυσμα βάσης (critical baseline) δεν είναι εφικτή η εφαρμογή της τεχνικής της συμβολομετρίας. Και την αποσυσχέτιση όγκου (volume decorrelation) η οποία εκφράζει την αποσυσχέτιση λόγω χωρικής σκέδασης (volume scattering) του σήματος ραντάρ. Η χωρική σκέδαση παρατηρείται κατά την διάδοση του σήματος στην μάζα των υλικών και συνδέεται με χωρικές ανομοιογένειες του, σε κλίμακες συγκρίσιμες με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (Μέρτικας, 1999).

4.2.2 Διαφορική Συμβολομετρία Ραντάρ

Η Διαφορική Συμβολομετρία Ραντάρ (Differential Interferometry, DInSAR) αποτελεί τεχνική της Επαναληπτικής συμβολομετρίας (repeat-pass Interferometry) που αποσκοπεί στον υπολογισμό μικρομετακινήσεων της επιφάνειας του εδάφους. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε πρώτη φορά σε απεικονίσεις Seasat (Gabriel et al. 1989) για τον υπολογισμό μικρών μεταβολών του υψομέτρου σε μεγάλα πλάτη λωρίδων κάλυψης. Εν συνεχεία, με την πάροδο του χρόνου η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση παραμορφώσεων που οφείλονται σε γεωλογικά αίτια όπως τεκτονικά φαινόμενα (Elias et al., 2009; Elias et al., 2008; Peltzer et al., 1996; Peltzer & Rosen 1995; Zekber et al., 1994b; Massonnet et al., 1993), ηφαιστειακά φαινόμενα (Briole et al., 2008; Elias et al., 2008; Sykioti et al., 2006; Amelung et al., 1999; Massonnet et al., 1995) και άλλα γεωδυναμικά φαινόμενα (Massonnet & Feigl, 1998; Zekber et al., 1994) καθώς επίσης λόγω ανθρωπογενών διεργασιών όπως καθιζήσεις λόγω εξάντλησης

πετρελαίων (Amelung et al., 1999) και φυσικού αερίου (Fruneau et al., 1999). Επίσης με την τεχνική αυτή γίνεται παρακολούθηση των παραμορφώσεων και σε μεγάλης κλίμακας κατασκευές όπως φράγματα, σήραγγες, γέφυρες και οδικά δίκτυα (Van de Kooij, 1999).

Η βασική ιδέα της διαφορικής συμβολομετρίας είναι η απομάκρυνση του όρου της τοπογραφίας από την παρατηρούμενη συμβολομετρική φάση, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την απομόνωση της φάσης που σχετίζεται με διαφορικές επιφανειακές κινήσεις που έλαβαν χώρα στο χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο λήψεων (Gabriel et al. 1989). Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η συμβολομετρική φάση αποτελείται από το άθροισμα επί μέρους συνιστωσών το οποίο περιγράφεται από την σχέση:

$$\Delta\phi = \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{flat}} + \phi_{\text{disp}} + \phi_{\text{orbit}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}}$$

όπου ϕ_{topo} είναι η τοπογραφική φάση, ϕ_{flat} είναι η φάση της επίπεδης Γης που προκαλείται από την γεωμετρία της απεικόνισης, ϕ_{disp} είναι η φάση λόγω επιφανειακής μετακίνησης, ϕ_{orbit} είναι το σφάλμα φάσης που προκαλείται από ανακρίβεια των τροχιακών δεδομένων, ϕ_{atm} είναι η φάση λόγω ατμοσφαιρικής καθυστέρησης και ϕ_{noise} η φάση λόγω θορύβου.

Επομένως στην Διαφορική Συμβολομετρία (DInSAR) γίνεται απομάκρυνση της τοπογραφικής φάσης (ϕ_{topo}). Η φάση λόγω τοπογραφίας υπολογίζεται είτε χρησιμοποιώντας ένα ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (DEM) (Massonnet et al., 1993), η μέθοδος αυτή καλείται 2-pass διαφορική συμβολομετρία και είναι μία από τις πιο εφικτές προσεγγίσεις δεδομένου ότι υπάρχουν για πολλές περιοχές διαθέσιμα ψηφιακά μοντέλα αναγλύφου –DEM, επαρκούς χωρικής ανάλυσης, είτε χρησιμοποιώντας ένα ανεξάρτητο συμβολόγραμμα, χωρίς να περιέχει τον παράγοντα της φάσης που οφείλεται σε διαφορική παραμόρφωση, η μέθοδος αυτή καλείται 3- & 4- pass διαφορική συμβολομετρία. Με την απομάκρυνση των όρων τοπογραφίας και επίπεδης Γης από την παρατηρούμενη συμβολομετρική φάση και θεωρώντας στην ιδανική περίπτωση αμελητέα την συνεισφορά της ατμόσφαιρας και του θορύβου, η τιμή της διαφορικής πλέον φάσης

αντανακλά τις μεταβολές της επιφάνειας στη διεύθυνση της παρατήρησης (LOS) για το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα.

Τα τελευταία χρόνια μια σειρά από τεχνικές έχουν αναπτυχθεί προκειμένου να αναδείξουν τις δυνατότητες της Διαφορικής Συμβολομετρίας (DInSAR). Οι τεχνικές αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- ❖ Διαφορική Συμβολομετρία (DInSAR) με μόνο ένα συμβολομετρικό ζεύγος
- ❖ Διαφορική Συμβολομετρία (DInSAR) με σώρευση εικόνων (Stacking)
- ❖ Διαφορική Συμβολομετρία (DInSAR) που βασίζεται στους σταθερούς σκεδαστές (Permanent Scatters)
- ❖ Διαφορική Συμβολομετρία (DInSAR) που βασίζεται σε υποσύνολα μικρών χωρικών γραμμών βάσης (Small Baseline Subsets –SBAS)

Παρόλα αυτά η τεχνική της Διαφορικής Συμβολομετρίας (DInSAR) παρουσιάζει κάποιους σημαντικούς περιορισμούς (Parcharidis et al., 2009) όπως:

- ✚ Ατμοσφαιρικές επιδράσεις λόγω των υδρατμών που υπάρχουν στην τροπόσφαιρα και της πυκνότητας των ηλεκτρονίων που υπάρχουν στην ιονόσφαιρα.
- ✚ Μεγάλα ανύσματα βάσης τα οποία οδηγούν σε χαμηλή συσχέτιση λόγω της φασματικής μετατόπισης των στόχων.
- ✚ Χαμηλή συνάφεια λόγω του μεγάλου διαστήματος μεταξύ των λήψεων των απεικονίσεων.
- ✚ Προβλήματα στο ξετύλιγμα (unwrap) των συμβολογραμάτων με μεγάλα ανύσματα βάσης.

4.2.2.1 Μεθοδολογία Σώρευση Διαφορικών Συμβολογραμάτων (Stacking)

Η επιτυχία εφαρμογής της διαφορικής συμβολομετρίας καθορίζεται, εκτός των άλλων, και από συγκεκριμένα φυσικά όρια του εκάστοτε συστήματος SAR. Ιδιαίτερα στις περιπτώσεις χαμηλού ρυθμού παραμορφωτικών κινήσεων, η ανάγκη διεύρυνσης του χρονικού παράθυρου παρατήρησης, ώστε να είναι εφικτή η αναγνώριση του σήματος, οδηγεί, συνήθως, σε ανεπιτυχή αποτελέσματα, λόγω της έκτασης του φαινομένου της χρονικής αποσυσχέτισης (Φουμέλης, 2009). Επίσης, οι ατμοσφαιρικές επιρροές στο σήμα παραμένουν, ωστόσο, ο σημαντικότερος

περιοριστικός παράγοντας, είναι λόγω της πρακτικής δυσκολίας αναγνώρισης και απομάκρυνσής τους, από τις παρατηρήσεις. Η αντιμετώπιση τους προκύπτει μόνο από την απόρριψη του συγκεκριμένου συμβολογράμματος από την τεχνική (Zabker & rosen, 1997; Tosi et al., 2002; Parcharidis et al. 2006). Προκειμένου να ξεπεραστούν τέτοιου είδους ανεπιθύμητες επιδράσεις έχει προταθεί η τεχνική της Σώρευσης (Stacking) Διαφορικών Συμβολογραμάτων, που στηρίζεται στον υπολογισμό του μέσου όρου της φάσης ενός συνόλου ανεξάρτητων συμβολογραμάτων στην χρονική διάσταση, για τον περιορισμό ασυσχέτιστων χρονικών διακυμάνσεων της φάσης.

Οι θεμελιώδεις αρχές της Σώρευσης Διαφορικών συμβολογραμάτων αποτυπώνουν τον μέσο γραμμικό ρυθμό μεταβολής της διαφορικής φάσης (phase rate). Ο μαθηματικός τύπος που αποτυπώνει τον ρυθμό μεταβολής της διαφορικής φάσης είναι:

$$\tilde{\Phi}_{\text{ρυθμ. μεταβολής φάσης}} = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\sum W_i \varphi_{\text{συμβολογραφήματος}}}{\sum W_i}, \text{ (rad/year)}$$

Όπου W_i είναι ο συντελεστής βαρύτητας στην διαδικασία της τεχνικής στάθμισης και προκύπτει και προκύπτει από τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα των συμβολογραμάτων και το $\tilde{\varphi}$ αποτελεί τον ρυθμό μεταβολής της φάσης ενώ το φ είναι η τιμή της εκτυλιγμένης φάσης στο διαφορικό συμβολόγραμμα. (Hanssen, 2001)

4.2.2.2 Μέθοδος Small Baseline Subset (SBAS)

Η μέθοδος Small Baseline Subset (SBAS) (Bernardino et al., 2002) είναι μία τεχνική η οποία βασίζεται στον διαφορετικό συνδυασμό των διαθέσιμων συμβολογραμάτων που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα, η τεχνική αυτή βασίζεται στον κατάλληλο συνδυασμό των διαφορικών συμβολογραμάτων τα οποία χαρακτηρίζονται από μικρή γραμμή βάσης (small baseline), με αποτέλεσμα την μείωση των χωρικών φαινομένων αποσυσχέτισης. Η τεχνική αυτή παρουσιάζει δύο πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες τεχνικές: πρώτον αυξάνει τον αριθμό δειγματοληψίας χρησιμοποιώντας όλες τις απεικονίσεις-εικόνες που συμπεριλαμβάνονται σε μικρά υποσύνολα βάσης (small baseline subsets) και δεύτερον δίνει την δυνατότητα να παραχθούν χωρικά πυκνή χάρτες παραμόρφωσης, το οποίο είναι και το βασικό ζητούμενο της συμβατικής (conventional) συμβολομετρίας. Αυτή η τεχνική είναι ιδανική για τη μέτρηση μικρής κλίμακας παραμορφώσεων του εδάφους, λόγω μετακινήσεων σε ενεργά ρήγματα ή λόγω

καθιζήσεων που οφείλονται από ανθρωπογενείς κατασκευές ή λόγω των γεωτρήσεων (Colesanti et al., 2003 ; Crosetto et al., 2003)

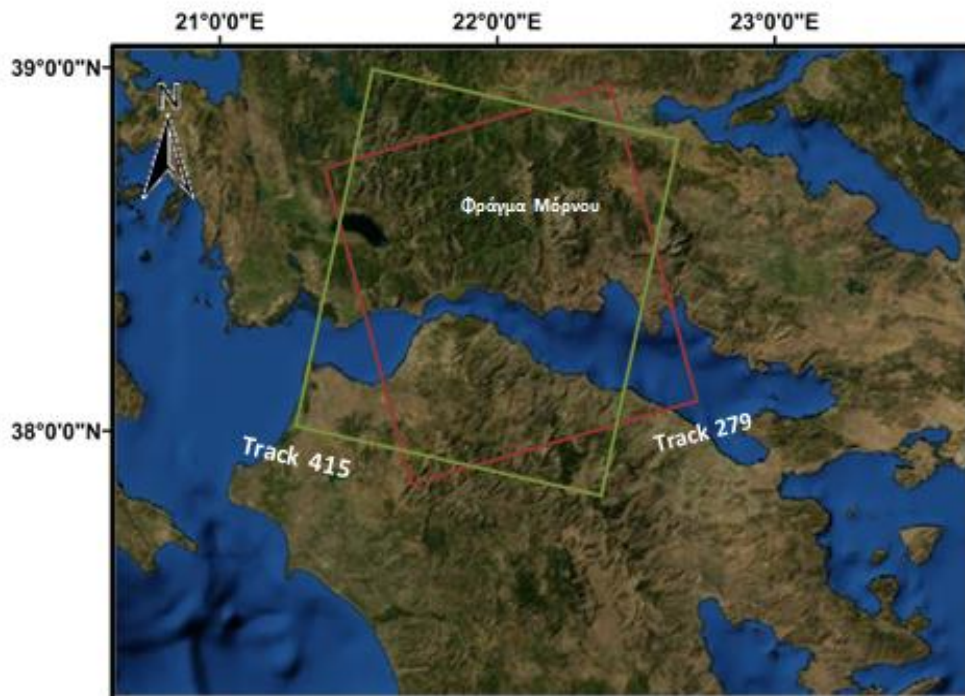
Στην παρούσα μελέτη λόγω του έντονου αναγλύφου της περιοχής μελέτης και κατ' επέκταση των χαμηλών επιπέδων συνάφειας, επιλέχθηκε η τεχνική της Σώρευσης (Stacking) διαφορετικών συμβολογραμάτων και ο αλγόριθμος SVD (Singular Value Decomposition). Ο Αλγόριθμος SVD χρησιμοποιείται προκειμένου να γίνει η σύνδεση ανεξάρτητων SAR δεδομένων τα οποία χωρίζονται από μεγάλες γραμμές βάσης (Baseline) και μεγάλη χρονική απόκλιση, αυξάνοντας έτσι τον αριθμό των δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση (Berardino, 2002; Usai 2003). Ουσιαστικά με τον αλγόριθμο SVD γίνεται η σύνδεση διαφορετικών subsets που έχουν διαφορετικές συμβολομετρικές γραμμές (Baselines) προκειμένου με την διαδικασία της σώρευσης (Stacking) να παράγετε η διαχρονική παραμόρφωση για κάθε pixel δηλαδή ουσιαστικά έχουμε ένα ιστορικό παραμόρφωσης για κάθε pixel. Έτσι με την μέθοδο της σώρευσης των διαφορετικών συμβολογραμάτων (Stacking) και την εφαρμογή της τεχνικής SBAS και του αλγορίθμου SVD παρήχθησαν χάρτες διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης των υπό μελέτη περιοχών καθώς επίσης και χρονο-σειρές παραμόρφωσης (Time series analysis) για επιλεγμένα σημεία – στόχου που είχαν ενδιαφέρον μελέτης.

Κεφάλαιο 5 Δεδομένα και μεθοδολογία

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα SAR και ASAR των δορυφορικών συστημάτων ERS-1&2 και ENVISAT αντίστοιχα και με βάση την τεχνική της Συμβολομετρίας (Time-series SAR Interferometry), πραγματοποιήθηκε έρευνα της εδαφικής παραμόρφωσης στην ευρύτερη περιοχή του φράγματος, παρακολούθηση του κινδύνου κατολισθητικών φαινομένων του Βόρειου και Νότιου Αντερείσματος καθώς επίσης και την παρακολούθηση της συμπεριφοράς του Φράγματος Μόρνου σε σχέση με πιθανές πηγές παραμόρφωσης όπως ισχυρά σεισμικά γεγονότα που εκδηλώθηκαν στην ευρύτερη περιοχή, μεταβολές της στάθμης της λίμνης κτλ. Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν αποτελούν εικόνες αρχείου οι οποίες προέρχονται από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό διαστήματος (ESA). Η επιλογή τους πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού EOLi (<http://earth.esa.int/EOLi.html>) και καλύπτουν την ευρύτερη περιοχή του φράγματος Μόρνου αλλά και το φράγμα. Για την διασφάλιση της συμβατότητας των δεδομένων, οι λήψεις των απεικονίσεων προέρχονται από το ίδιο κέντρο επεξεργασίας, το Ιταλικό κέντρο επεξεργασίας I-PAF (Italian Processing and Archiving Facility).

5.1 Δεδομένα SAR απεικονίσεων

Για την επεξεργασία και την ανάλυση της διαφορικής συμβολομετρίας χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 128 SAR απεικονίσεις εκ των οποίων 60 προέρχονται από τους δορυφόρους ERS-1&2 καλύπτοντας το χρονικό διάστημα 1992-2000 και 68 από τον δορυφόρο ENVISAT καλύπτοντας το χρονικό διάστημα 2002-2010. Τα δεδομένα ήταν SLC (Single Look Complex) απεικονίσεις (πλάτος και φάση σήματος οπισθοσκέδασης), ανοδικής (ascending) και καθοδικής (descending) τροχιάς, πρωινής λήψης (περίπου 09:00 π.μ), κάθετης VVπόλωσης και πλάτος κάλυψης 100 km.



Εικόνα 20: Το πλαίσιο των εικόνων Ραντάρ ανοδικής (415) και καθοδικής (279) τροχιάς της περιοχής μελέτης.

Στους παρακάτω πίνακες απεικονίζονται αναλυτικά τα δεδομένα των δορυφορικών συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 2: Δεδομένα του δορυφόρου ERS-1&2

Α/Α	ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΡΟΧΙΑ	ΠΛΑΙΣΙΟ	ΠΟΛΩΣΗ	ΦΟΡΑ ΛΗΨΗΣ
1	ERS-1	15/05/1993	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
2	ERS-1	19/06/1993	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
3	ERS-1	24/07/1993	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
4	ERS-2	13/06/1995	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
5	ERS-2	18/07/1995	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
6	ERS-2	09/01/1996	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
7	ERS-2	28/05/1996	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
8	ERS-2	08/04/1997	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
9	ERS-2	17/06/1997	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
10	ERS-2	26/08/1997	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
11	ERS-2	28/04/1998	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ

12	ERS-2	07/07/1998	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
13	ERS-2	15/09/1998	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
14	ERS-2	13/04/1999	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
15	ERS-2	22/06/1999	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
16	ERS-2	27/07/1999	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
17	ERS-2	05/10/1999	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
18	ERS-2	09/11/1999	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
19	ERS-2	14/12/1999	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
20	ERS-2	06/06/2000	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ

A/A	ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΡΟΧΙΑ	ΠΛΑΙΣΙΟ	ΠΟΛΩΣΗ	ΦΟΡΑ ΛΗΨΗΣ
1	ERS-1	12/11/1992	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
2	ERS-1	10/06/1993	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
3	ERS-1	19/08/1993	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
4	ERS-1	28/10/1993	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
5	ERS-1	25/03/1995	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
6	ERS-1	29/04/1995	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
7	ERS-1	03/06/1995	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
8	ERS-1	08/07/1995	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
9	ERS-2	13/08/1995	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
10	ERS-2	17/09/1995	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
11	ERS-1	21/10/1995	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
12	ERS-2	31/12/1955	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
13	ERS-2	19/05/1996	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
14	ERS-2	23/06/1996	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
15	ERS-2	01/09/1996	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
16	ERS-2	06/10/1996	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
17	ERS-2	10/11/1996	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
18	ERS-2	15/12/1996	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
19	ERS-2	19/01/1997	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
20	ERS-2	23/02/1997	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
21	ERS-2	04/05/1997	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
22	ERS-2	13/07/1997	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
23	ERS-2	17/08/1997	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
24	ERS-2	21/09/1997	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
25	ERS-2	30/11/1997	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
26	ERS-2	04/01/1998	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
27	ERS-2	19/04/1998	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
28	ERS-2	28/06/1998	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
29	ERS-2	02/08/1998	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
30	ERS-2	06/09/1998	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ

31	ERS-2	28/02/1999	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
32	ERS-2	13/06/1999	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
33	ERS-2	18/07/1999	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
34	ERS-2	22/08/1999	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
35	ERS-2	26/09/1999	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
36	ERS-2	31/10/1999	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
37	ERS-2	05/12/1999	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
38	ERS-2	09/01/2000	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
39	ERS-2	23/04/2000	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
40	ERS-2	28/05/2000	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ

Πίνακας 3: Δεδομένα του δορυφόρου ENVISAT

A/A	ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΡΟΧΙΑ	ΠΛΑΙΣΙΟ	ΠΟΛΩΣΗ	ΦΟΡΑ ΛΗΨΗΣ
1	ENVISAT	11/02/2003	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
2	ENVISAT	05/08/2003	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
3	ENVISAT	14/10/2003	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
4	ENVISAT	23/12/2003	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
5	ENVISAT	06/04/2004	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
6	ENVISAT	11/05/2004	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
7	ENVISAT	20/07/2004	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
8	ENVISAT	24/08/2004	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
9	ENVISAT	28/09/2004	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
10	ENVISAT	02/11/2004	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
11	ENVISAT	11/01/2005	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
12	ENVISAT	26/04/2005	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
13	ENVISAT	31/05/2005	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
14	ENVISAT	20/06/2006	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
15	ENVISAT	25/07/2006	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
16	ENVISAT	03/10/2006	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
17	ENVISAT	16/01/2007	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
18	ENVISAT	20/02/2007	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
19	ENVISAT	11/03/2008	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
20	ENVISAT	15/04/2008	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
21	ENVISAT	29/07/2008	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
22	ENVISAT	02/09/2008	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
23	ENVISAT	07/10/2008	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
24	ENVISAT	11/11/2008	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
25	ENVISAT	20/01/2009	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
26	ENVISAT	24/02/2009	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
27	ENVISAT	05/05/2009	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ

28	ENVISAT	09/06/2009	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ
29	ENVISAT	09/02/2010	415	764	VV	ΑΝΟΔΙΚΗ

Α/Α	ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΡΟΧΙΑ	ΠΛΑΙΣΙΟ	ΠΟΛΩΣΗ	ΦΟΡΑ ΛΗΨΗΣ
1	ENVISAT	20/12/2002	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
2	ENVISAT	09/03/2003	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
3	ENVISAT	22/06/2003	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
4	ENVISAT	09/11/2003	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
5	ENVISAT	28/03/2004	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
6	ENVISAT	11/07/2004	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
7	ENVISAT	19/09/2004	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
8	ENVISAT	06/02/2005	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
9	ENVISAT	13/03/2005	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
10	ENVISAT	17/04/2005	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
11	ENVISAT	22/05/2005	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
12	ENVISAT	04/09/2005	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
13	ENVISAT	13/11/2005	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
14	ENVISAT	26/02/2006	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
15	ENVISAT	11/06/2006	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
16	ENVISAT	16/07/2006	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
17	ENVISAT	29/10/2006	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
18	ENVISAT	11/02/2007	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
19	ENVISAT	05/08/2007	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
20	ENVISAT	27/01/2008	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
21	ENVISAT	06/04/2008	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
22	ENVISAT	11/05/2008	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
23	ENVISAT	15/06/2008	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
24	ENVISAT	20/07/2008	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
25	ENVISAT	24/08/2008	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
26	ENVISAT	28/09/2008	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
27	ENVISAT	02/11/2008	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
28	ENVISAT	07/12/2008	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
29	ENVISAT	15/02/2009	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
30	ENVISAT	22/03/2009	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
31	ENVISAT	26/04/2009	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
32	ENVISAT	31/05/2009	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
33	ENVISAT	13/09/2009	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
34	ENVISAT	22/11/2009	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
35	ENVISAT	27/12/2009	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ

36	ENVISAT	07/03/2010	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
37	ENVISAT	11/04/2010	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
38	ENVISAT	20/06/2010	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
39	ENVISAT	03/10/2010	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ

Για την συμβολομετρική επεξεργασία χρησιμοποιήθηκαν τροχιακά δεδομένα ακρίβειας της τροχιάς για τους δορυφόρους. Συγκεκριμένα για τους δορυφόρους ERS-1&2 ελήφθησαν τροχιακά δεδομένα από το DEOS (<http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs>) με επέκταση .ODR. Τα αρχεία αυτά διαθέτουν μεγάλη ακρίβεια θέσης και ταχύτητας του δορυφόρου, της τάξης των 5-6 εκατοστών (Scharoo & Visser, 1998). Αντίστοιχα για τον δορυφόρο ENVISAT ελήφθησαν τροχιακά δεδομένα DORIS (<ftp://diss-nas-fp.eo.esa.int>). Το όργανο DORIS είναι εγκατεστημένο πάνω στον δορυφόρο και το οποίο επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια στα δεδομένα των τροχιών.

Επιπρόσθετα, για την τοπογραφία και τα υψομετρικά δεδομένα του αναγλύφου της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (DEM), χωρικής ανάλυσης (~90m) από δεδομένα της αποστολής SRTM τα οποία είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο από το International Centre of Tropical Agriculture (CIAT) (<http://srtm.csi.cgiar.org>). Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε είναι η SRTM v3, στην οποία έχουν καλυφθεί τα κενά των προτογενών υψομετρικών δεδομένων, ενώ ταυτόχρονα έχει βελτιωθεί η γεωαναφορά τους καθώς και η ανάλυση της ακτογραμμής (Jarvis et al. 2006). Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν σεισμολογικά δεδομένα για το χρονικό διάστημα 1992-2010 για την περιοχή του φράγματος αλλά και τον ευρύτερο χώρο, τα οποία είναι διαθέσιμα από τον ιστότοπο του EMSC (European Mediterranean Seismological Centre) και το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Αθηνών καθώς επίσης και βροχομετρικά δεδομένα τα οποία δόθηκαν από την διεύθυνση υδροληψίας της ΕΥΔΑΠ.

5.2 Επεξεργασία SAR απεικονίσεων

Για την επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων SAR και την παραγωγή των χαρτών παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GAMMA (Wegmuller et al., 1998) σε λειτουργικό περιβάλλον Linux καθώς επίσης και Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, GIS. Στην συνέχεια ακολουθούν τα επί μέρους στάδια της Διαφορικής Συμβολομετρίας προκειμένου να παραχθούν τα διαφορικά συμβολογράμματα.

5.2.1 Μετατροπή των SLC εικόνων σε MLI και βελτίωση των τροχιακών δεδομένων.

Το πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας είναι η μετατροπή των εικόνων SLC (Single Look Complex) σε μορφή διαχειρίσιμη από το λογισμικό GAMMA. Για κάθε εικόνα SLC παρήχθησαν 2 αρχεία, το ένα με την γεωμετρία και την χωρική πληροφορία της εικόνας και το δεύτερο με τα παραμετρικά στοιχεία της εικόνας (τροχιακή πληροφορία, προβολικό σύστημα κτλ). Στην συνέχεια γίνεται ο επαναπροσδιορισμός της τροχιακής πληροφορίας καθώς οι αβεβαιότητες στα τροχιακά δεδομένα και η ανάγκη για ακριβούς υπολογισμούς της συμβολομετρικής γεωμετρίας οδηγούν σε επανεκτίμηση του ανύσματος βάσης με σκοπό την βελτίωση της αρχικής εκτίμησης. Επομένως για τον σκοπό αυτό έγινε η εισαγωγή των τροχιακών δεδομένων DELF (ERS-1,2) και DORIS (ENVISAT) στις SLC εικόνες και συγκεκριμένα στα παραμετρικά τους αρχεία. Ακολούθως, γίνεται η Multi-look επεξεργασία προκειμένου να μειωθεί η φάση του θορύβου και των στιγμάτων στις εικόνες. Επομένως για κάθε μία SLC εικόνα παράγεται η αντίστοιχη MLI (Multi Look Intensity) εικόνα.

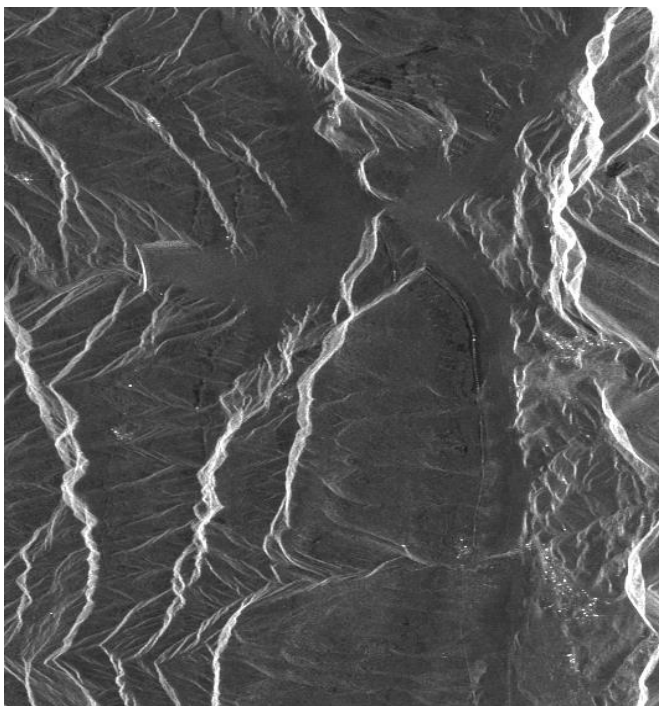
5.2.2 Συμπροσαρμογή (co-registration)

Το στάδιο το οποίο επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια των InSAR προϊόντων είναι το στάδιο της συμπροσαρμογής (Zou et al., 2009). Κατά την συμπροσαρμογή πραγματοποιείται εγγραφή μίας SAR εικόνας (δευτερεύουσα απεικόνιση, slave image) πάνω σε μία άλλη που λαμβάνεται ως αναφορά (κύρια εικόνα, master image). Η διαδικασία που ακολουθείται περιλαμβάνει την μεταβολή της θέσης κάθε εικονοστοιχείου της δευτερεύουσας εικόνας βάσει της πρωτεύουσας εικόνας και ο επαναυπολογισμός του πλάτους και της φάσης του σήματος για το σύνολο των εικονοστοιχείων στις νέες θέσεις με παρεμβολή. Η ακρίβεια της συμπροσαρμογής σχετίζεται με τα αναμενόμενα σφάλματα στις τιμές των φάσεων, λόγω της λανθασμένης εγγραφής μεταξύ των master και slave εικόνων. Από την βιβλιογραφία καταδεικνύεται ότι ακρίβειες μεγαλύτερες του 1/8 του εικονοστοιχείου είναι πολύ ικανοποιητικές για την παραγωγή αποτελεσμάτων.

Στην παρούσα εργασία η επιλογή της πρωτεύουσας εικόνας (master) έγινε μετά από δοκιμές διαφόρων εικόνων προκειμένου να πάρουμε το βέλτιστο αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα για τις εικόνες ERS ascending επιλέχθηκε ως master εικόνα η ημερομηνία λήψης **28/4/1998**, για τις ERS descending η εικόνα με ημερομηνία λήψης **13/08/1995**, για τις ENVISAT ascending η εικόνα με ημερομηνία λήψης **20/06/2006** και τέλος για τις ENVISAT descending η εικόνα με

ημερομηνία λήψης **27/01/2008**. Η ακρίβεια της συμπροσαρμογής και στις τέσσερεις επεξεργασίες απέδωσε τιμές της τυπικής απόκλισης (standard deviation) μικρότερες από 0,1 στο range και 0,8 στο azimuth.

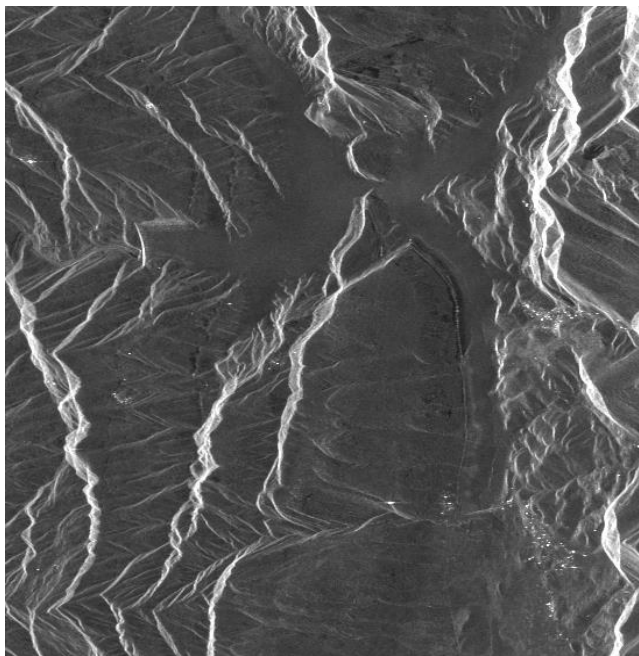
Το αποτέλεσμα της συμπροσαρμογής ήταν η δημιουργία των RSLC εικόνων . Στην συνέχεια ακολούθησε εκ νέου η Multi Look επεξεργασία των RSLC και τέλος εστιάζοντας στην περιοχή μελέτης, επικεντρωθήκαμε στην περιοχή ενδιαφέροντος (Area of Interest – AOI) όπου με την διαδικασία του cropping, κόψαμε τις εικόνες στο εύρος της AOI. Ακολουθούν οι μέσες εικόνες (Average) Multi look (1x5) της περιοχής μελέτης των δορυφόρων ERS-1,2 και ENVISAT:



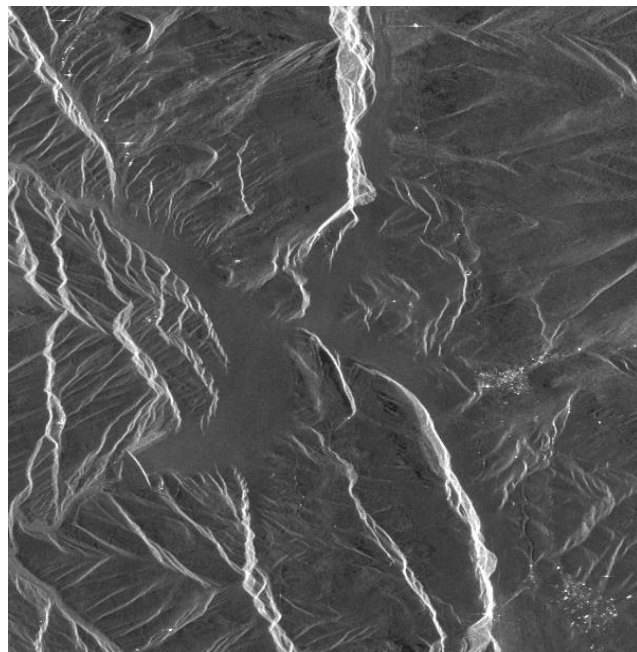
Εικόνα 21: Average Multi-look ERS ascending



Εικόνα 22: Average Multi-look ERS descending



Εικόνα 23: Average Multi-look ENVISAT ascending

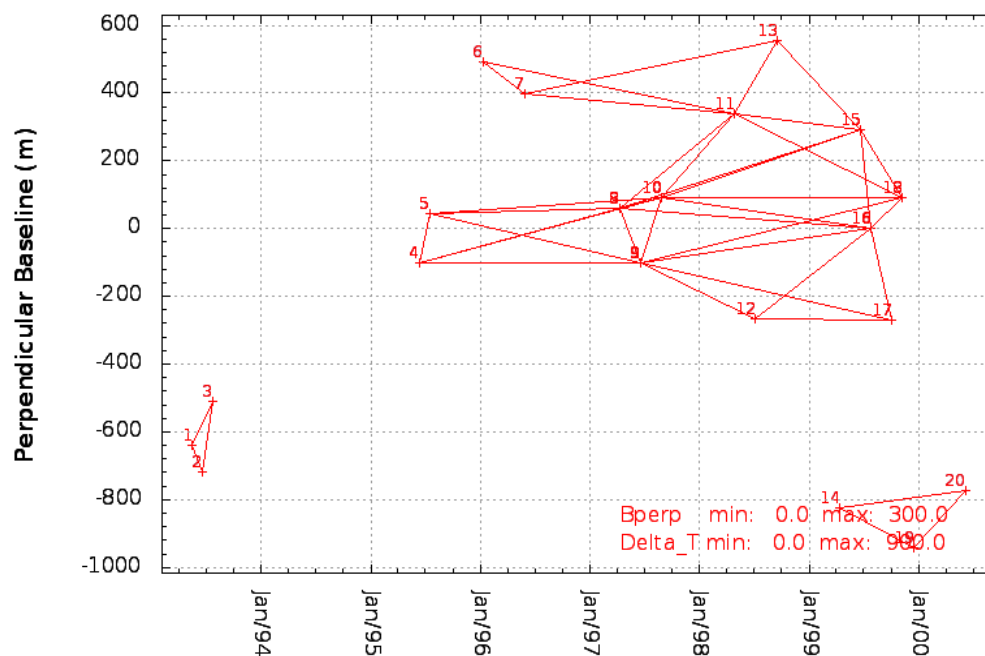


Εικόνα 24: Average Multi-look ENVISAT descending

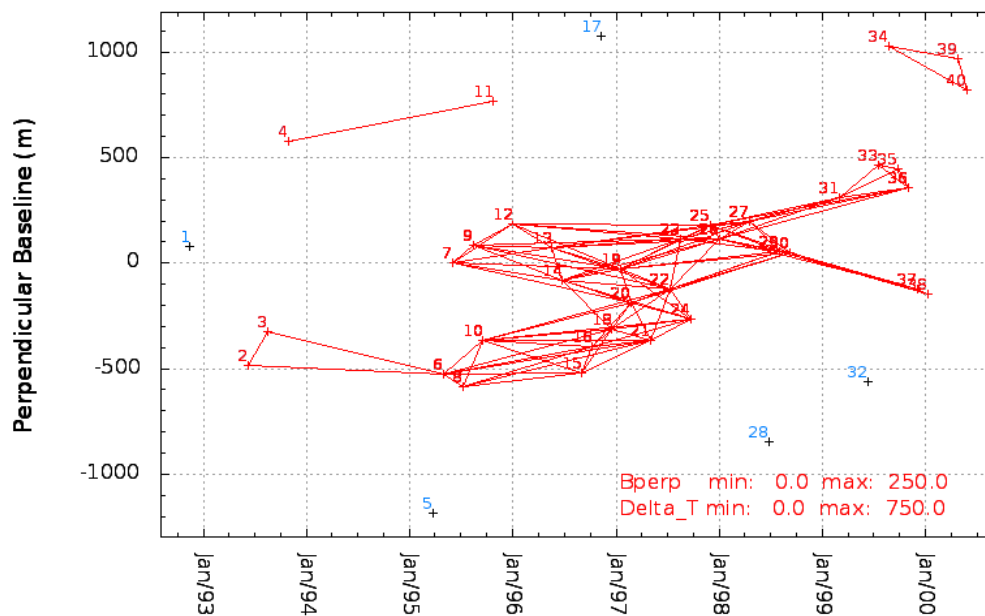
5.2.3 Υπολογισμός της βασικής συμβολομετρικής γραμμής

Το πιο βασικό στάδιο για την δημιουργία των Διαφορικών συμβολογραμάτων (DInSAR) είναι ο υπολογισμός της βασικής συμβολομετρικής γραμμής και εν συνεχεία ο υπολογισμός όλων των πιθανών ζευγαριών που μπορούν να δώσουν ένα συμβολόγραμμα βάση αυτής. Συνήθως προτιμάται να επιλέγεται μικρό εύρος στη τιμή της βασικής συμβολομετρικής γραμμής προκειμένου να αποφεύγονται γεωμετρικές και χρονικές αποσυσχετίσεις. Στη παρούσα μελέτη λόγω των έντονων αναγλύφων στην ευρύτερη περιοχή του φράγματος Μόρνου επιλέχθηκαν ως ανώτερα όρια τα 300m για την εγκάρσια συνιστώσα (Perpendicular baseline). Πιο συγκεκριμένα για τις εικόνες ERS ascending επιλέχθηκε ανώτερο όριο B_{perp} 300m και χρονικό εύρος 900μέρες (Εικόνα 7), για τις ERS descending επιλέχθηκε B_{perp} 250m και χρονικό εύρος 750μέρες (Εικόνα 8), για τις ENVISAT ascending επιλέχθηκε B_{perp} 300m και χρονικό εύρος 900μέρες (Εικόνα 9) και για τις ENVISAT descending επιλέχθηκε B_{perp} 300m και χρονικό εύρος 800μέρες (Εικόνα 10). Βάση των παραπάνω παραμέτρων δημιουργήθηκαν δίκτυα (networks) τα οποία απεικονίζουν τις ημερομηνίες λήψης των εκάστοτε εικόνων σε σχέση με τις γραμμές βάσης (Baseline) καθώς επίσης και τα ζευγάρια εικόνων με τα οποία παρήχθησαν απλά

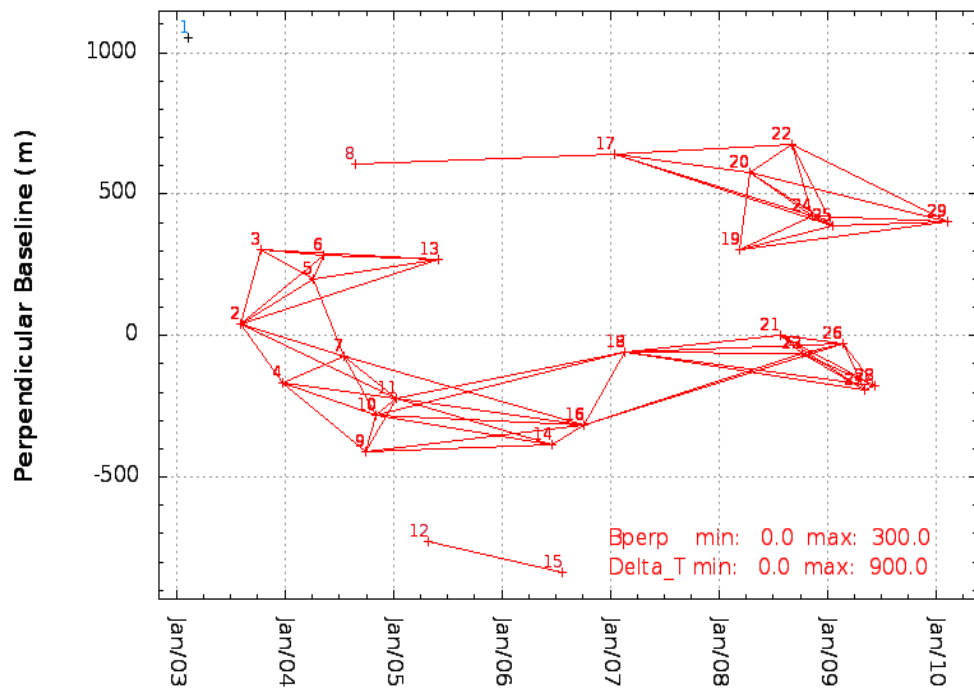
συμβολογράματα. Για το χρονικό διάστημα 1992-2000 παρήχθησαν 41 για τα ascending και 134 για τα descending ενώ για το χρονικό διάστημα 2002-2010 παρήχθησαν 71 για τα ascending και 171 για τα descending. Ακολουθούν τα δίκτυα (networks) που δημιουργήθηκαν στο στάδιο αυτό:



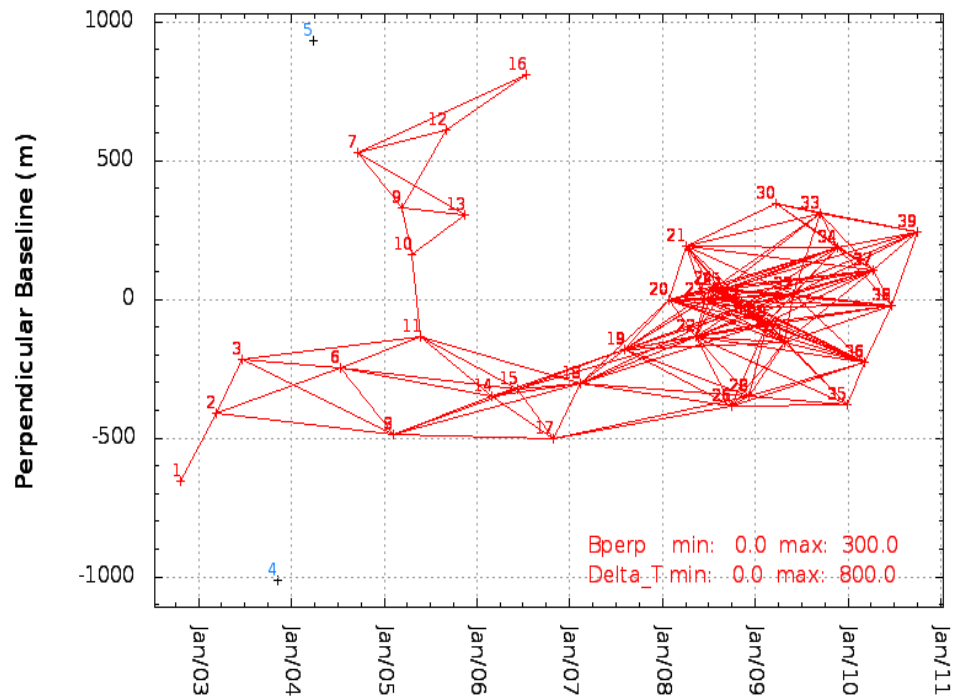
Εικόνα 25: Δίκτυο των ERS ascending



Εικόνα 26: Δίκτυο των ERS descending



Εικόνα 27: Δίκτυο των ENVISAT ascending



Εικόνα 28: Δίκτυο των ENVISAT descending

5.2.5 Παραγωγή Απλού Συμβολογράματος

Στο στάδιο αυτό με βάση τα ζευγάρια εικόνων που προέκυψαν παραπάνω δημιουργήθηκαν συμβολογράματα που περιέχουν την βασική πληροφορία της συμβολογραφικής φάσης. Το συμβολόγραμμα προκύπτει από τον μιγαδικό πολλαπλασιασμό κάθε εικονοστοιχείου της πρωτεύουσας εικόνας με το συζυγές εικονοστοιχείο της εγγεγραμμένης δευτερεύουσας εικόνας. Στο συγκεκριμένο στάδιο αφαιρείται και ο όρος επίπεδης Γης (Geudtner, 1996) με αποτέλεσμα την εξομαλυμένη συμβολομετρική φάση (flattened interferometric phase). Τέλος από την διαδικασία αυτή παράγεται και το επίπεδο συνάφειας (Coherence) για κάθε συμβολόγραμμα.

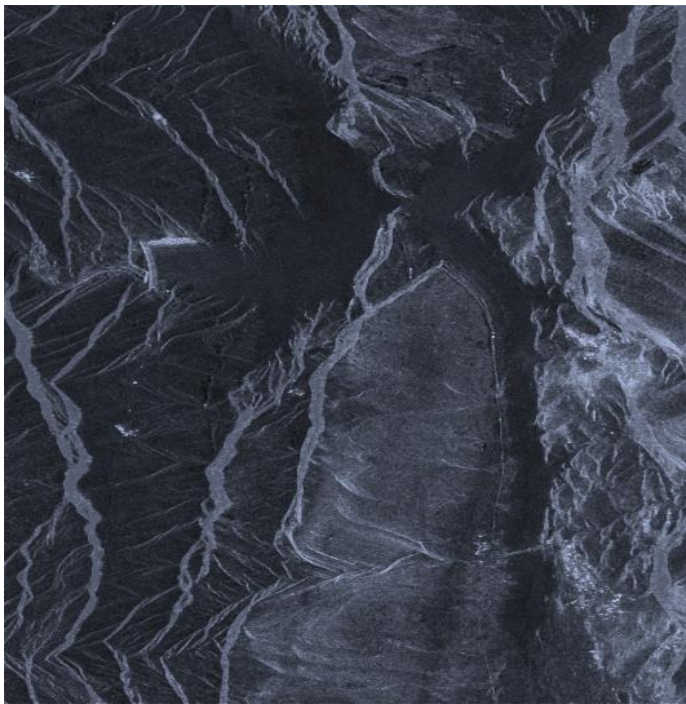
5.2.6 Παραγωγή Διαφορικού Συμβολογράματος

Στο στάδιο αυτό γίνεται η απομάκρυνση της τοπογραφικής φάσης που περιλαμβάνετε στο συμβολόγραμμα, από το εξομαλυμένο συμβολόγραμμα προκειμένου να προκύψει το διαφορικό συμβολόγραμμα. Η διαφορική φάση που προκύπτει εκφράζει τις μεταβολές της απόστασης δορυφόρου – στόχου μεταξύ των λήψεων, συμπεριλαμβανομένων των όποιων επιδράσεων από παράγοντες αποσυσχέτισης, όπως της ατμόσφαιρας και της αβεβαιότητας των τροχιακών δεδομένων.

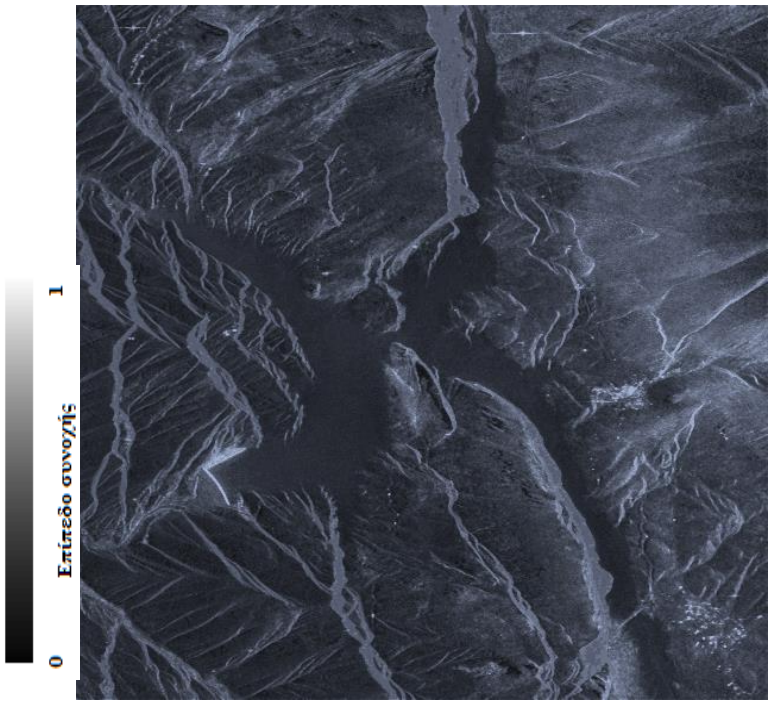
5.2.7 Εφαρμογή φίλτρου Διαφορικού συμβολογράματος

Στο στάδιο αυτό προκειμένου να διευκολυνθεί η διαδικασία της εκτύλιξης της φάσης (Phase unwrapping) γίνεται η εφαρμογή προσαρμοσμένων φίλτρων (adaptive filtering). Τα φίλτρα εφαρμόζονται ώστε να μειωθούν οι θόρυβοι λόγω των φαινομένων αποσυσχέτισης αλλά και της παρουσίας στιγμάτων στα διαφορικά συμβολογράματα. Σύμφωνα με τους (Li & Goldstein, 1990) μείωση της τυπικής απόκλισης της φάσης επιτυγχάνεται με χωρικό φιλτράρισμα των διαφορικών συμβολογραμάτων. Οι Goldstein & Werner (1998) πρότειναν την τεχνική του φιλτραρίσματος κατά συχνότητα σε χωρική βάση. Τέτοιου είδους φίλτρα επιτυγχάνουν μεγιστοποίηση της ισχύος του σήματος προς αυτή του θορύβου που το συνοδεύει, ανεξάρτητα της μορφής του σήματος, πράγμα το οποίο τα καθιστά καλύτερα σε σχέση με άλλα φίλτρα.

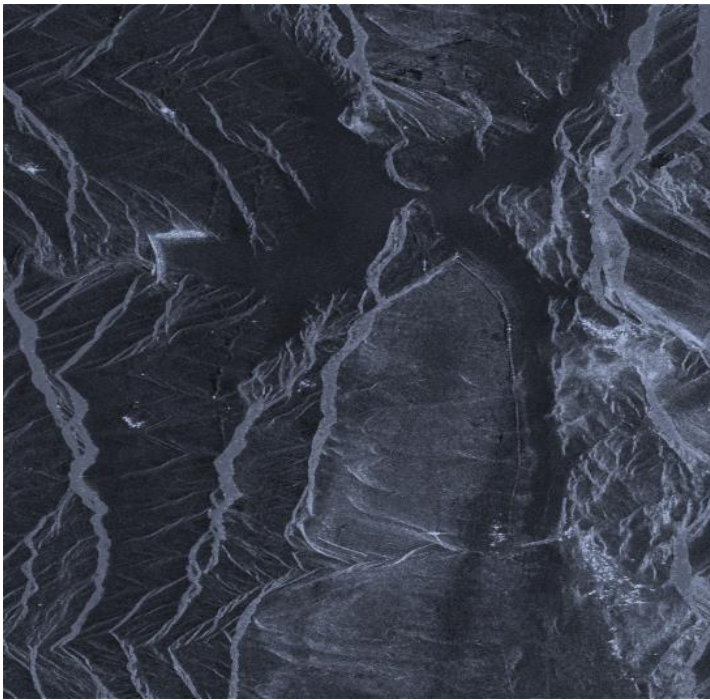
Όπως όλα τα χωρικά φίλτρα λειτουργούν βάση ενός συγκεκριμένου παραθύρου, έτσι και στην συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε μέγεθος παραθύρου 64 x 64 pixel και με βήμα (step) 8. Το φίλτρο εφαρμόστηκε και στα επίπεδα συνάφειας (Coherence) που δημιουργήθηκαν σε προηγούμενο στάδιο και τα οποία απεικονίζονται παρακάτω:



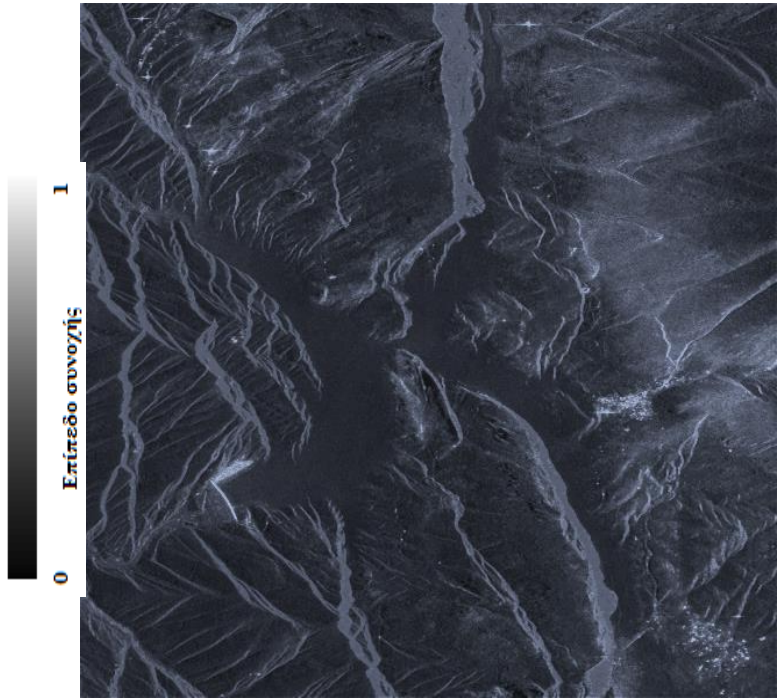
Εικόνα 29: Μέσος όρος επιπέδων συνοχής των ERS ascending



Εικόνα 30: Μέσος όρος επιπέδων συνοχής ERS descending



Εικόνα 31: Μέσος όρος επιπέδων συνοχής των ENVISAT ascending



Εικόνα 32: Μέσος όρος επιπέδων συνοχής ENVISAT descending

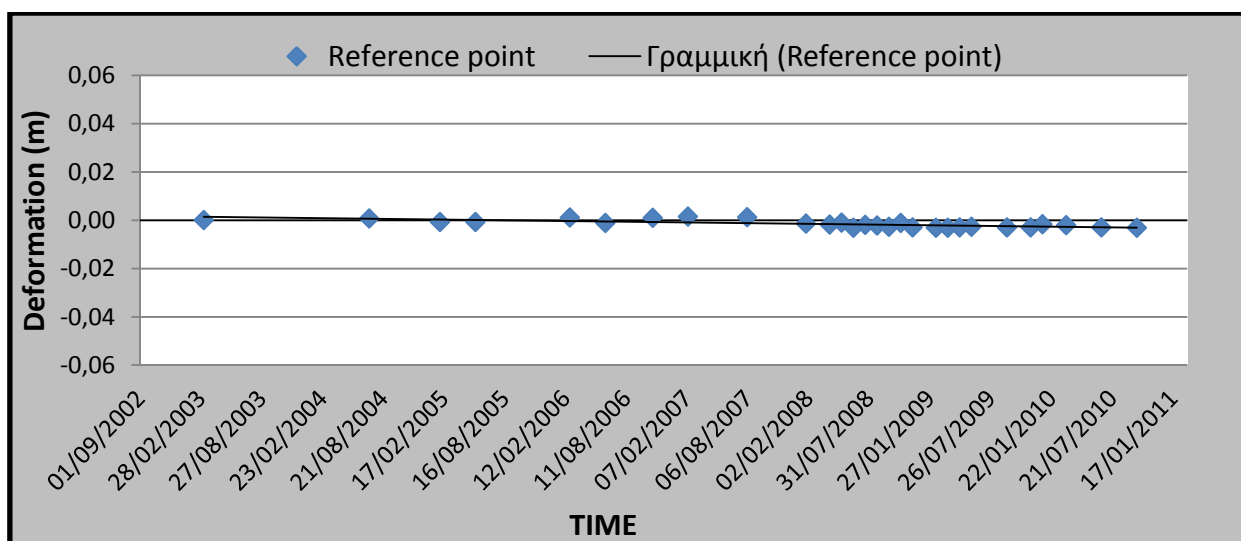
5.2.8 Εκτύλιξη Συμβολομετρικής Φάσης (Phase Unwrapping)

Το επόμενο σημαντικό στάδιο μετά την συμπροσαρμογή είναι το στάδιο της εκτύλιξης της συμβολομετρικής φάσης (phase unwrapping) με βάση την τιμή της βασικής συμβολομετρικής γραμμής που επιλέχθηκε. Η εκτύλιξη της φάσης ενός συμβολογράματος αποτελεί το πλέον δύσκολο και απαιτητικό στάδιο της συμβολομετρικής επεξεργασίας, το οποίο μάλιστα δεν είναι βέβαιο ότι θα εκτελεστεί με επιτυχία. Βασική υπόθεση των περισσότερων αλγορίθμων εκτύλιξης φάσης (phase unwrap algorithms) είναι ότι η διαφορά της εκτυλιγμένης φάσης μεταξύ των γειτονικών εικονοστοιχείων δεν οφείλει να υπερβαίνει τον μισό κύκλο, $[\varphi_n - \varphi_{n-1}] < \pi$. Έτσι, η διαδικασία εκτύλιξης απαιτεί την ολοκλήρωση των διαφορών της φάσης λαμβάνοντας υπ' όψιν τους περιορισμούς των μεταβολών της. Ενώ, λοιπόν, αναμένεται η ολοκλήρωση, κατά μήκος της ελάχιστης κυκλικής διαδρομής, να είναι μηδέν, άλματα φάσης (phase jumps) μεγαλύτερα του π , λόγω των φαινομένων αναστροφής και σκίασης, οδηγούν σε παρουσία υπολείμματος φάσης (phase residue), δηλαδή σε σφάλμα. Τα αποτελέσματα της ολοκλήρωσης εξαρτώνται, επομένως, από την επιλογή της διαδρομής στα παραπάνω κρίσιμα σημεία (Φουμέλης, 2009). Σκοπός της εκτύλιξης της φάσης είναι η ανάκτηση της πληροφορίας των ακέραιων κύκλων (Goldstein et al., 1988), ώστε η τιμή της φάσης να λαμβάνει τις πραγματικές τιμές πέρα από το όριο $[0, 2\pi)$. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη σε κάθε εικονοστοιχείο ενός ακέραιου πολλαπλασίου του 2π , ώστε να επανακτηθεί από το παρατηρούμενο μέρος της φάσης η πραγματική της τιμή.

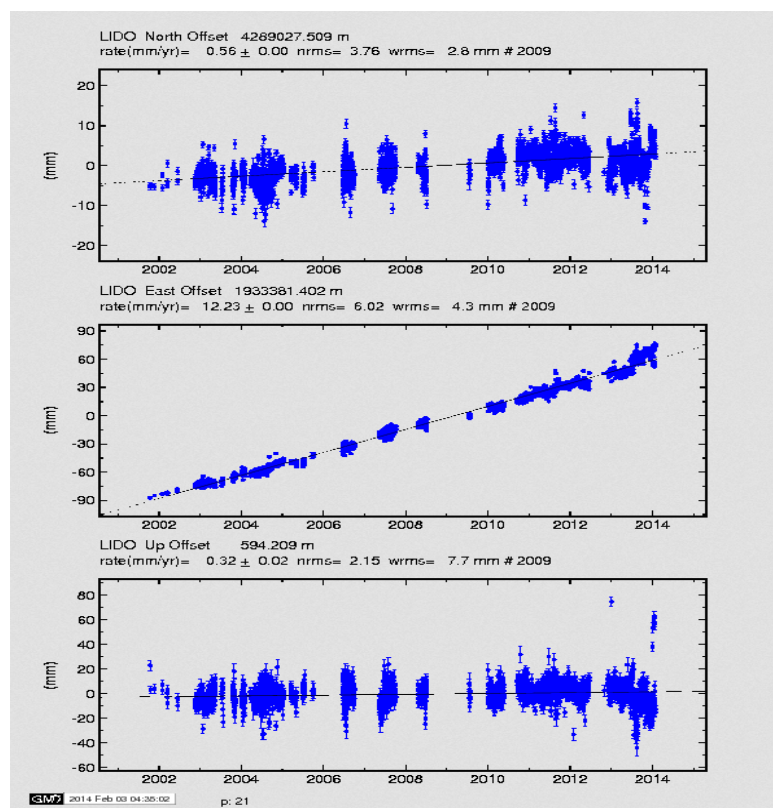
Στην βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μέθοδοι εκτύλιξης της φάσης με σκοπό την βέλτιστη επίλυση της ασάφειας της συμβολομετρικής φάσης. Ορισμένες είναι οι μέθοδοι ένωσης υπολειμμάτων (residue tying methods) (Goldstein et al., 1988), οι μέθοδοι τοπικής ανάπτυξης (region growing methods) (Hu & Cumming, 1996), οι μέθοδοι ελαχίστων τετραγώνων (Least Square) (Ghiglia & Romero, 1994; spagnolini 1995; Pritt, 1997).

Στην παρούσα μελέτη για το στάδιο του Unwrapping επιλέχθηκε σαν καταλληλότερο σημείο εκκίνησης, το σημείο αναφοράς (reference point), βάση του οποίου ξεκίνησε η εκτύλιξη (Εικόνα 34). Τα κριτήρια με τα οποία έγινε η επιλογή του συγκεκριμένου σημείου ήταν τα διαχρονικά υψηλά επίπεδα συνάφειας καθώς επίσης και η σταθερότητα της περιοχής (Σχήμα 1). Συγκεκριμένα το σημείο αναφοράς εντοπίστηκε 15km Ανατολικά του φράγματος Μόρνου, στο χωριό Λιδορίκι, σε ένα υδραγωγείο το οποίο με βάση δεδομένα GPS (Εικόνα 33) έχει

αποδειχθεί ότι είναι σταθερό (προφορική επικοινωνία από Pierre Briole (CNRS) & Panagiotis Elias (NOA)).

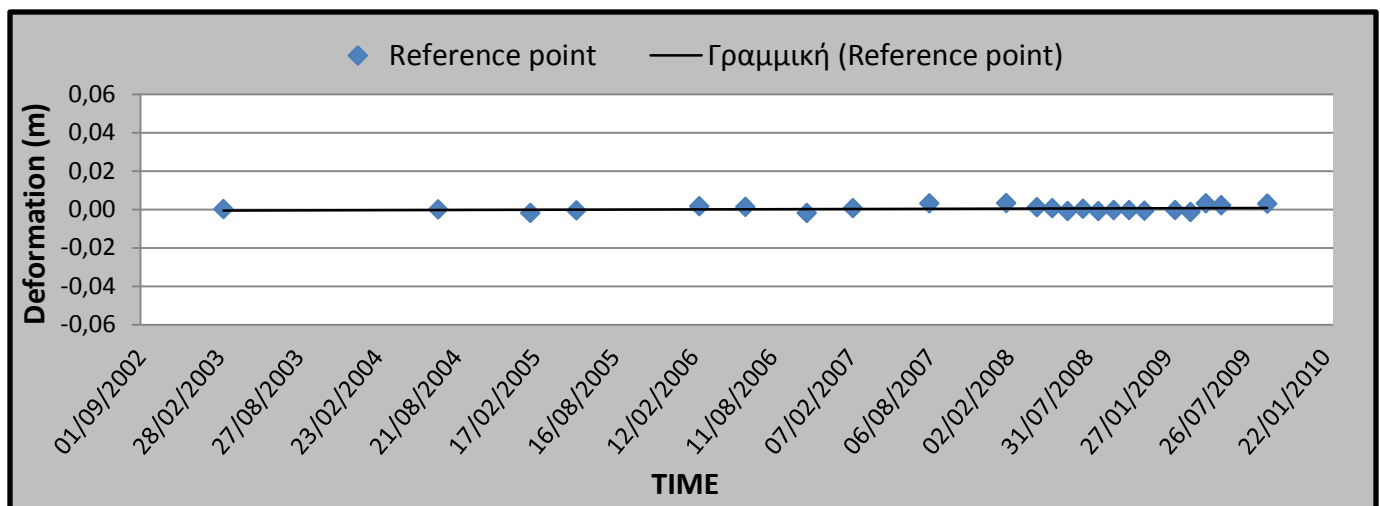


Σχήμα 1: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης του σημείου αναφοράς στο χωριό Λιδωρίκι στο οποίο φαίνεται η σταθερότητα του.



Εικόνα 33: Διαγράμματα δεδομένων GPS του σημείου αναφοράς στο Λιδωρίκι όπου φαίνεται η σταθερότητα του. (πηγή: <https://gpscope.dt.insu.cnrs.fr>)

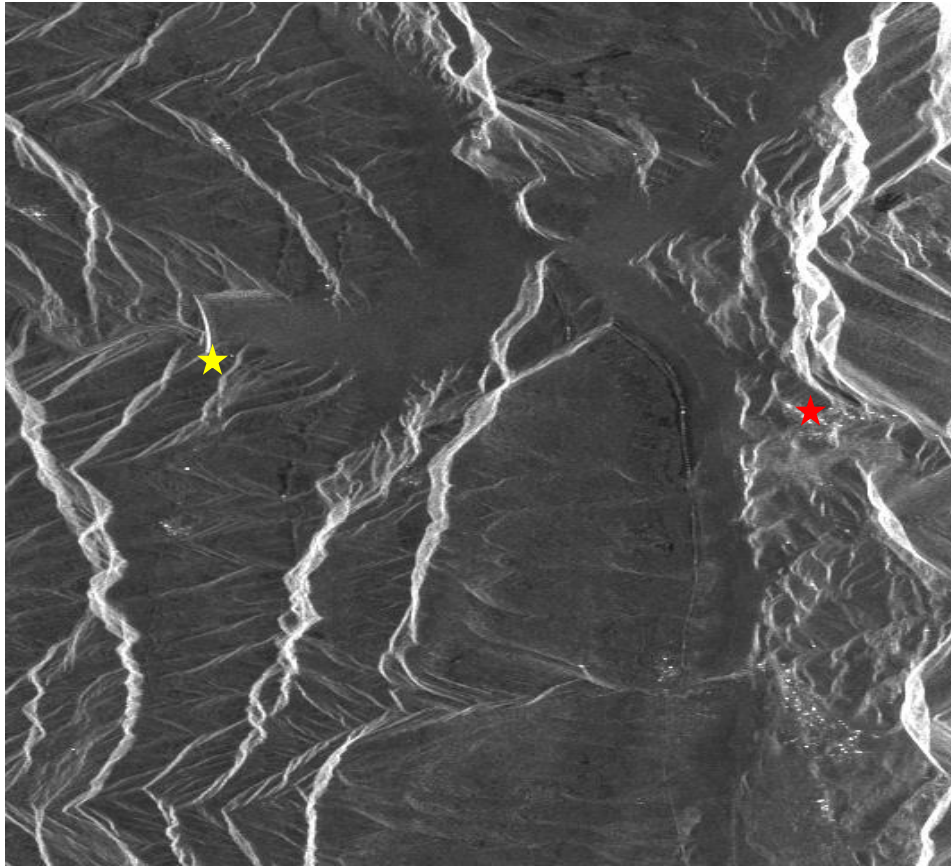
Πιο συγκεκριμένα για την επεξεργασία των ERS ascending το σημείο αναφοράς έχει εικονοσυντεταγμένες c:325, l:444, για τα ERS descending c:327, l:137 ενώ για την επεξεργασία των ENVISAT ascending το σημείο αναφοράς έχει εικονοσυντεταγμένες c:325, l:453 και για τα ENVISAT descending c:315, l:144. Επίσης κρίθηκε σκόπιμο να γίνει και ένα δεύτερο processing, πέρα από αυτό που έγινε σε ευρεία κλίμακα, το οποίο να εστιάζει τοπικά μόνο στο Φράγμα του Μόρνου. Για την επεξεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν νέα σημεία αναφοράς τα οποία επιλέχθηκαν στο Νότιο αντέρεισμα του Φράγματος. Το κριτήριο με το οποίο έγινε η επιλογή των σημείων αυτών ήταν αφενός μεν τα διαχρονικά επίπεδα συνάφειας αφετέρου δε η σταθερότητα των σημείων αυτών η οποία φάνηκε μετά από το πρώτο processing που έγινε αρχικά στην ευρεία κλίμακα (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης του σημείου αναφοράς στο Νότιο Αντέρεισμα στο οποίο φαίνεται η σταθερότητα του.

Συγκεκριμένα τα σημεία αναφοράς ήταν: για την επεξεργασία των ENVISAT ascending το σημείο αναφοράς έχει εικονοσυντεταγμένες c:141, l:120 και για τα ENVISAT descending c:410, l:105. Επιπλέον, για την επίλυση των ασαφειών φάσης επιλέχθηκε η παράμετρος της συνάφειας των εικονοστοιχείων να είναι 0,3, με την μέθοδο προγραμματισμού δικτύου (minimum cost network algorithm) (Costantini, 1998).

Τέλος αφού τελειώσει το στάδιο του Unwrapping επόμενη διαδικασία είναι η βελτίωση της αρχικής εκτίμησης της βασικής συμβολομετρικής γραμμής από τις εκτυλιγμένες διαφορικές φάσεις και εν συνεχεία ο επαναπροσδιορισμός της γεωμετρίας κάθε συμβολογραφικού ζεύγους. Ακολούθως γίνεται η επανάληψη όλων των σταδίων από την παραγωγή του απλού συμβολογράματος και μετά.



Εικόνα 34: Μέση Multi look εικόνα (Average) ανοδικής τροχιάς της περιοχής μελέτης όπου εμφανίζονται με κόκκινο αστέρι, το σημείο αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία στην ευρεία κλίμακα, ενώ με κίτρινο αστέρι είναι το σημείο αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία σε τοπική κλίμακα.

Επόμενο στάδιο ήταν να γίνει εκ νέου αξιολόγηση των εκτυλιγμένων διαφορικών συμβολογραμάτων προκειμένου να επιλεγούν τα κατάλληλα διαφορικά συμβολογράμματα τα οποία δεν παρουσίαζαν υπολειμματικές φάσεις και θόρυβο από παράγοντες αποσυσχέτισης. Συγκεκριμένα για την επεξεργασία των SAR/ERS δεδομένων ανοδικής τροχιάς από τα 41 διαφορικά συμβολογράμματα, επιλέχθηκαν συνολικά 20 ενώ για τα δεδομένα καθοδικής

τροχιάς από τα 134 διαφορεικά συμβολογράμματα επιλέχθηκαν τα συνολικά 45. Αντίστοιχα για την επεξεργασία των ASAR/ENVISAT δεδομένων ανοδικής τροχιάς από τα 71 διαφορεικά συμβολογράμματα επιλέχθηκαν συνολικά 41 ενώ για τα δεδομένα καθοδικής τροχιάς από τα 171 διαφορεικά συμβολογράμματα επιλέχθηκαν συνολικά 61 διαφορεικά συμβολογράμματα.

5.2.9 Σώρευση Διαφορικών Συμβολογραμμάτων και εφαρμογή του αλγορίθμου SVD

Προκειμένου να γίνει η παραγωγή του ρυθμού διαχρονικής παραμόρφωσης για την περιοχή μελέτης, χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία της Σώρευσης των διαφορικών συμβολογραμμάτων και η εφαρμογή του αλγορίθμου SVD (Singular Value Decomposition). Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα επιλεγμένα εκτυλιγμένα διαφορικά συμβολογράμματα που προέκυψαν από το προηγούμενο στάδιο (Multi reference) και με βάση το σημείο αναφοράς, το οποίο είναι το ίδιο με το σημείο επιλογής έναρξης εκτύλιξης της συμβολομετρικής φάσης και των αντίστοιχων δικτύων (networks), εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος SVD με την εφαρμογή του οποίου περνάμε από multi reference σε single reference με εικόνα αναφοράς την πρώτη εικόνα με βάση την ημερομηνία λήψης. Το αποτέλεσμα που παράχθηκε ήταν ένα προϊόν σε μορφή raster με τις σωρευμένες φάσεις που αποτυπώνουν τον μέσο ρυθμό μεταβολής των φάσεων ανά χρόνο (rad/year) καθώς επίσης και το ρυθμό μεταβολής των φάσεων ανά χρόνο για κάθε pixel (pixel based time series analysis).

Τέλος γίνεται η μετατροπή των τιμών σε μέτρα και στην συνέχεια χρησιμοποιείτε η γεωγραφική πληροφορία των συντεταγμένων της πραγματικής επιφάνειας από ένα ΨΜΕ (DEM) και γίνεται ο μετασχηματισμός της γεωμετρίας ραντάρ σε ένα γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, προσομοιώνοντας ένα ενδιάμεσο καρτεσιανό σύστημα μεταξύ Range Doppler Coordinates (RDC) και του ΨΜΕ, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε με Μερκατορική Προβολή UTM στη Ζώνη 34 Βόρειο.

Κεφάλαιο 6 Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων τα οποία προέκυψαν μετά από την επεξεργασία των δεδομένων με την τεχνική της Διαφορικής συμβολομετρίας βάση της μεθόδου της Σώρευσης (Stacking) και την εφαρμογή του αλγορίθμου SVD (Singular Value Decomposition). Συγκεκριμένα παρατίθενται χάρτες επιφανειακής παραμόρφωσης (deformation maps) καθώς επίσης και διαγράμματα διαχρονικής παραμόρφωσης (Time-series analysis) της περιοχής μελέτης για το χρονικό διάστημα από το 1995-2000 μέχρι το 2003-2010. Η ανάλυση έγινε σε ευρεία κλίμακα (Regional scale) παρατηρώντας την ευρύτερη περιοχή του φράγματος καθώς επίσης και σε τοπική κλίμακα (Local scale), εστιάζοντας κυρίως στο φράγμα του Μόρνου. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν διαγράμματα με την στάθμη της τεχνητής λίμνης του φράγματος Μόρνου καθώς και διαγράμματα με την σεισμική δραστηριότητα του ευρύτερου χώρου.

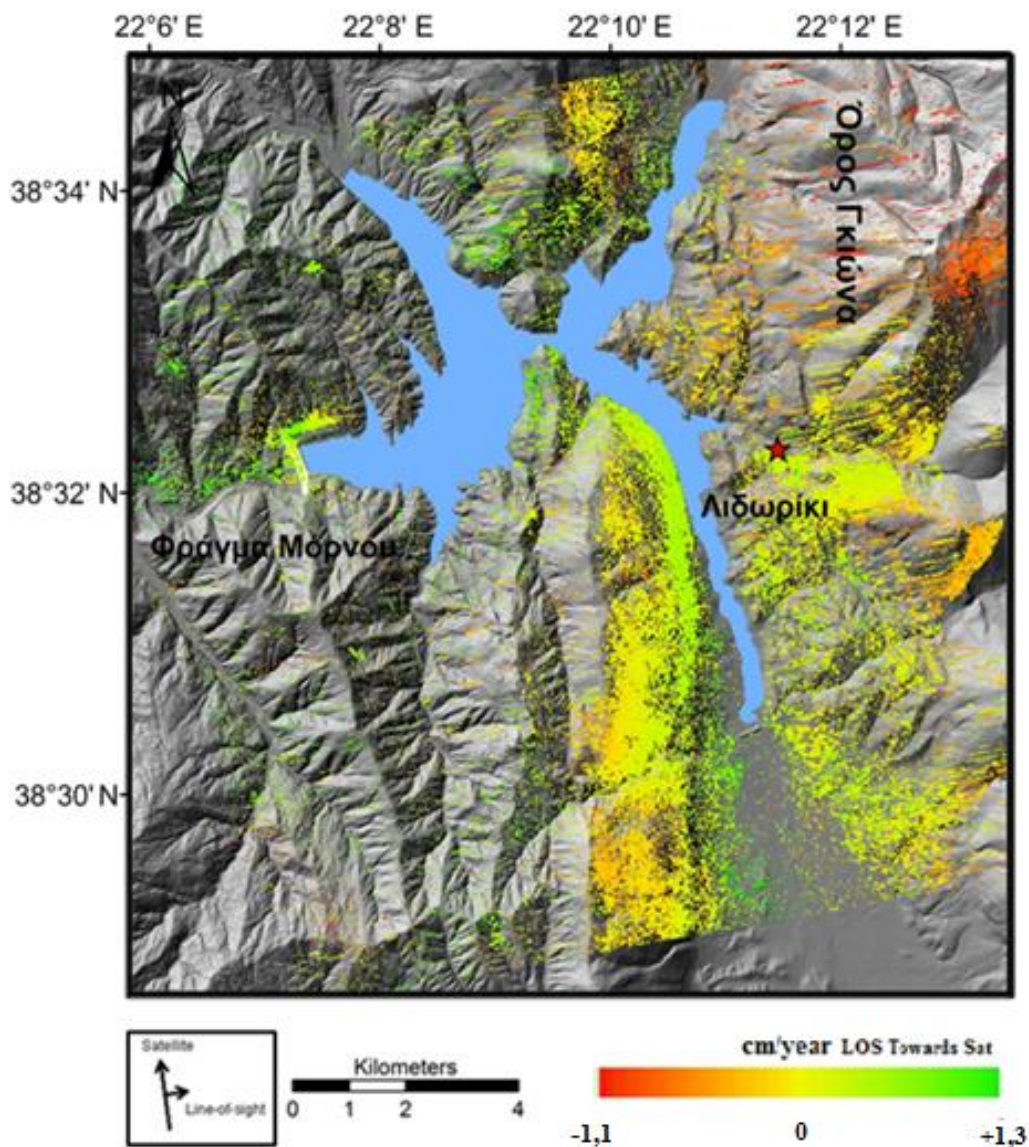
Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα μετατράπηκαν από την γεωμετρία του Ραντάρ σε γεωγραφικές συντεταγμένες και ακολούθως εισήχθησαν σε ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) προκειμένου να γίνει η τελική επεξεργασία για την δημιουργία των τελικών χαρτών με την χρήση του προγράμματος ArcMap. Επίσης θα πρέπει να τονιστεί ότι οι όροι καθίζηση ή ανύψωση που θα αναφερθούν στις αναλύσεις παρακάτω, αναφέρονται πάντα σε σχετικές τιμές παραμόρφωσης κατά το σημείο αναφοράς καθώς επίσης και οι τιμές παραμόρφωσης που παρουσιάζονται στους χάρτες, αναφέρονται στην παραμόρφωση κατά την διεύθυνση παρατήρησης του δορυφόρου (Line of Sight-LOS) η οποία είναι σχεδόν κάθετη ($\sim 23^\circ$).

6.1 Ανάλυση σε ευρεία κλίμακα (Regional Scale)

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων που έγιναν στην ευρύτερη περιοχή του φράγματος Μόρνου για τις χρονικές περιόδους 1995-2000 και 2003-2010.

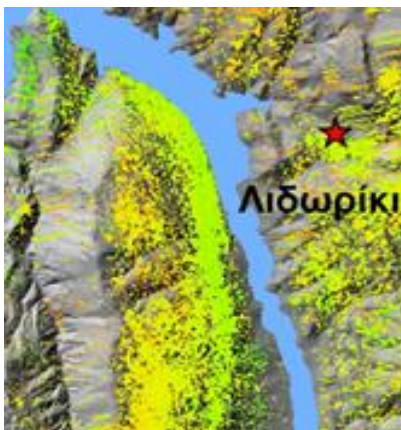
6.1.1 Διαχρονική εδαφική παραμόρφωση για την χρονική περίοδο 1993-2000

Μετά από την επεξεργασία των SAR δεδομένων των δορυφορικών συστημάτων ERS1-2, παρήχθησαν οι τελική χάρτες της διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης για την περιοχή μελέτης. Στην συνέχεια ακολουθούν οι χάρτες παραμόρφωσης ανοδικής (Εικόνα 35) και καθοδικής (Εικόνα 36) τροχιάς καθώς επίσης και τα διαγράμματα ιστορικής παραμόρφωσης για επιλεγμένα σημεία-στόχους στο φράγμα του Μόρνου:

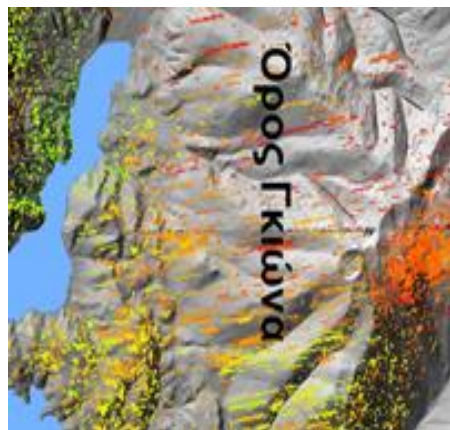


Εικόνα 35: Χάρτης διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης στην διεύθυνση του LOS (ανοδικής τροχιάς/ERS-1,2) της ευρύτερης περιοχής του φράγματος Μόρνου για την χρονική περίοδο 1995-2000. Με κόκκινο αστέρι απεικονίζεται το επιλεγμένο σημείο αναφοράς.

Κάνοντας μία πρώτη ανάγνωση στην εικόνα 35, παρατηρούμε ότι σε σχέση με το σημείο αναφοράς στο χωριό Λιδωρίκι, το οποίο χαρακτηρίζεται σταθερό, υπάρχουν περιοχές όπου παρατηρείται μία άνοδος της τάξεως των $+5\text{mm/year}$ κατά μήκος της όχθης της λίμνης απέναντι από το χωριό Λιδωρίκι ενώ όσο ανεβαίνουμε προς τον ορεινό όγκο παρατηρούμε σταθερές έως καθοδικές τιμές -2mm/year (Εικόνα 36α). Πιθανότατα να οφείλεται στην εναλλαγή των λιθολογιών που απαντώνται στην περιοχή μιας και ο ορεινός όγκος αποτελεί μία σειρά από διαφορετικούς τύπους πετρωμάτων της μεταβατικής ζώνης των Βαρδουσιών. Επίσης στα Βόρειο - Ανατολικά του Λιδωρικού στον ορεινό όγκο της Γκιώνας παρατηρείτε μία περιοχή η οποία καθιζάνει κατά -5 έως -8 mm/year , το οποίο πιθανότητα να οφείλεται στα λατομεία βωξιτών που υπάρχουν στην περιοχή εκείνη (Εικόνα 36β). Εστιάζοντας στην περιοχή του Φράγματος παρατηρούμε ότι το αριστερό Βόρειο αντέρεισμα κρίνεται σταθερό με μία μικρή άνοδο προς το φράγμα της τάξεως των $+2\text{ mm/year}$, ενώ το δεξιό Νότιο αντέρεισμα και η ανάντη πλευρά του φράγματος κρίνονται σταθερά (Εικόνα 36γ).



(α)

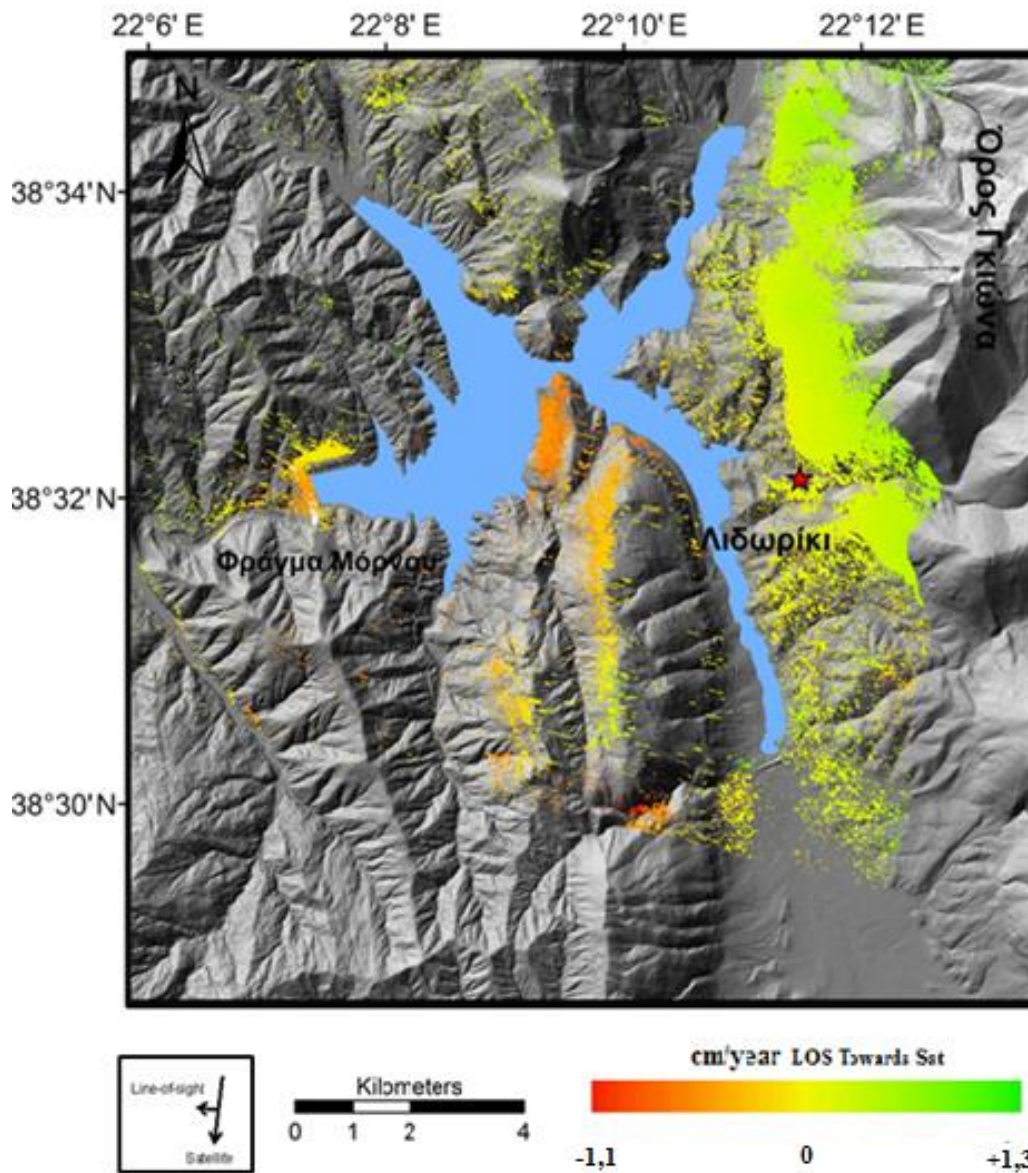


(β)



(γ)

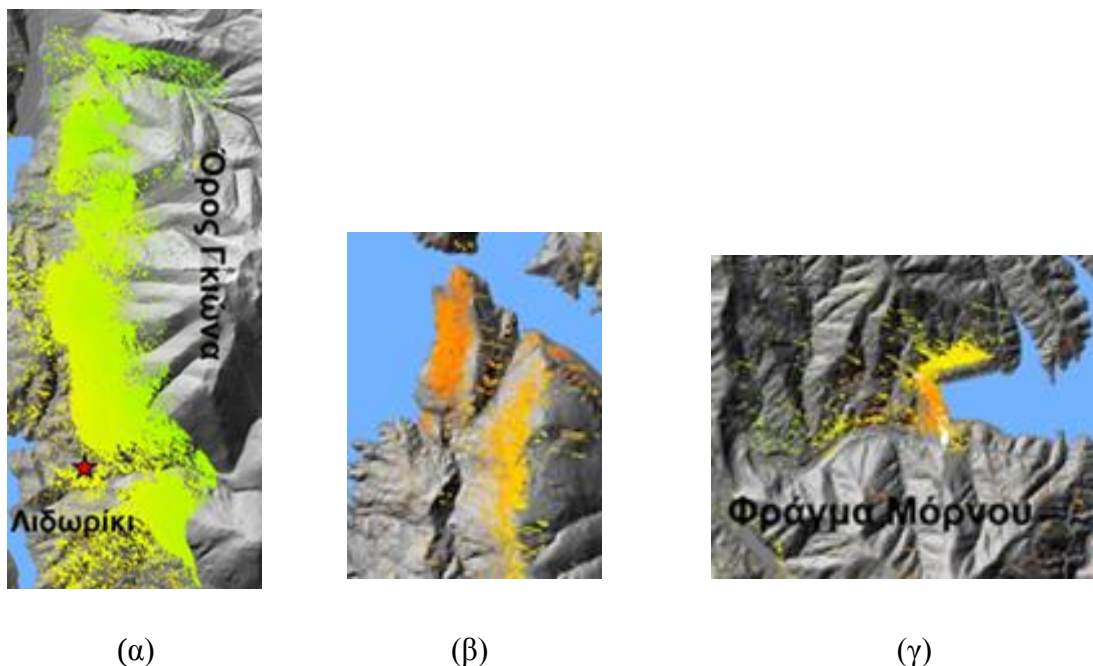
Εικόνα 36: Εστιαζόμενες περιοχές (παράθυρα) αξιολόγησης του χάρτη διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης (ERS ascending).



Εικόνα 37: Χάρτης διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης στην διεύθυνση του LOS (καθοδικής τροχιάς/ERS-1,2) της ευρύτερης περιοχής του φράγματος Μόρνου για την χρονική περίοδο 1995-2000. Με κόκκινο αστέρι απεικονίζεται το επιλεγμένο σημείο αναφοράς.

Παρατηρώντας την εικόνα 37, σε σχέση με το σημείο αναφοράς στο χωριό Λιδωρίκι, το οποίο και πάλι χαρακτηρίζεται σταθερό, βλέπουμε ότι η περιοχή κατά μήκος στις πρόποδες του ορεινού όγκου της Γκιώνας παραμένει σταθερή ενώ όσο ανεβαίνουμε προς τα ψηλότερα υψόμετρα παρατηρείται μία άνοδος της τάξης των +3 έως +5mm/year (Εικόνα 38α). Αυτό πιθανότητα να οφείλεται στον τεκτονισμό της περιοχής και συγκεκριμένα στην τεκτονική επαφή (επώθηση) που υπάρχει κατά μήκος της οροσειράς και η οποία φέρνει σε επαφή την ανώτερη

ενότητα του Παρνασσού πάνω από την ενότητα της Πίνδου. Επίσης στα κεντρικά της περιοχής μελέτης παρατηρείται μία περιοχή η οποία καθιζάνει κατά -2 έως -4mm/year και η οποία πιθανότητα να οφείλεται στην εναλλαγή των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής αυτής μιας και στο σημείο εκείνο έχουμε την εναλλαγή του σχηματισμού του φλύσχη με τους πλακώδεις ασβεστόλιθους οι οποίοι χωρίζονται από μία τεκτονική επαφή (εφίππευση) (Εικόνα 38β). Εστιάζοντας στην περιοχή του φράγματος, παρατηρούμε ότι το Δεξιό Βόρειο αντέρεισμα και το Αριστερό Νότιο αντέρεισμα χαρακτηρίζονται σταθερά με μία μικρή κάθοδο της τάξεως των -1 έως -2mm/year ενώ στο φράγμα και κατάντη αυτού παρατηρούμε μία καθίζηση της τάξεως των -5 έως -7mm/year (Εικόνα 38γ)

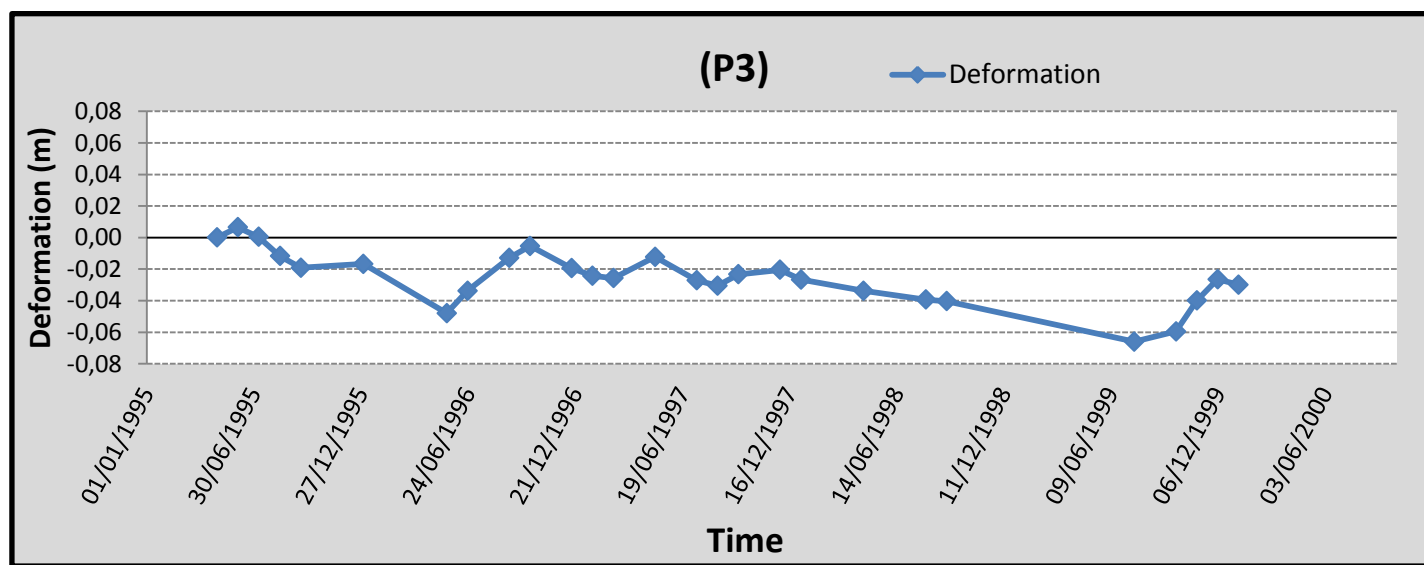
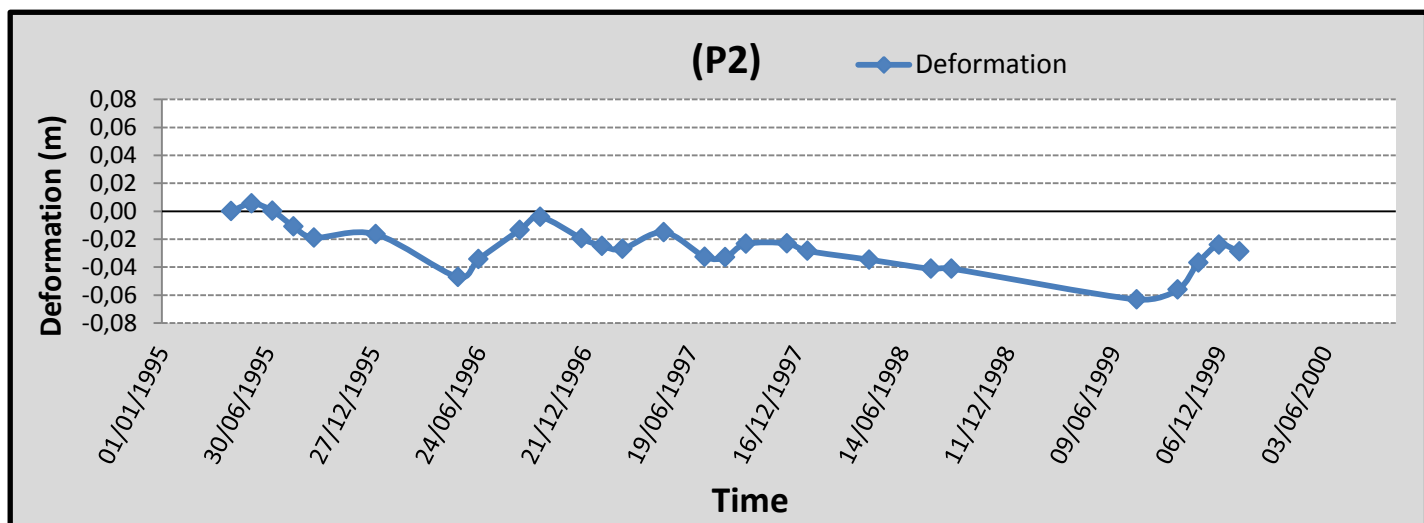
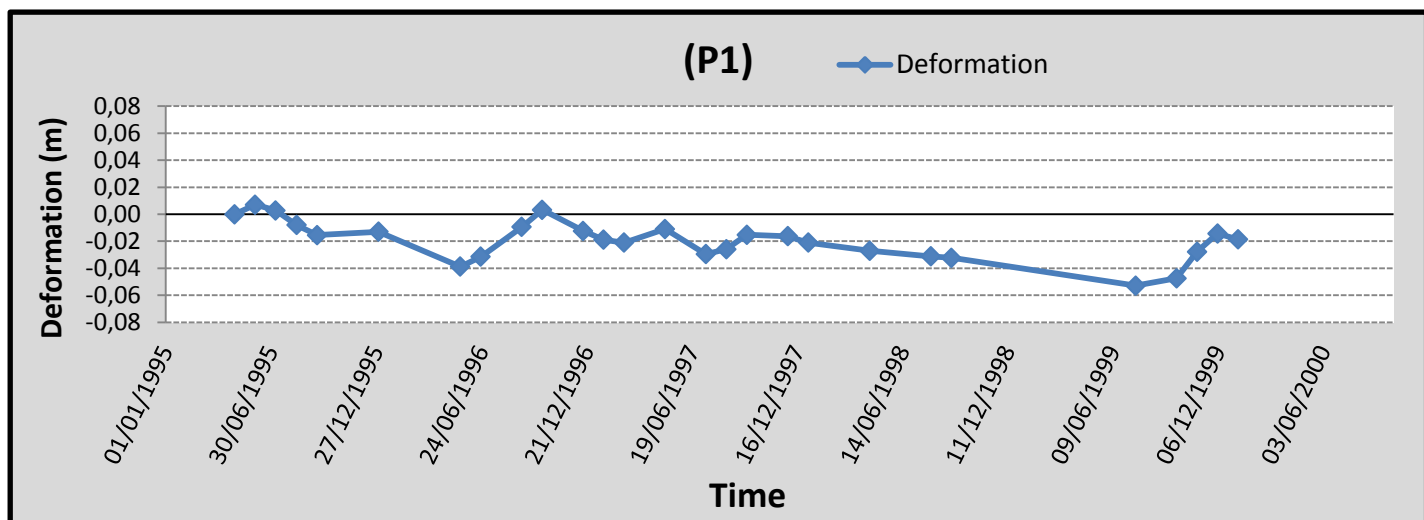


Εικόνα 38: Εστιαζόμενες περιοχές (παράθυρα) αξιολόγησης του χάρτη διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης (ERS descending).

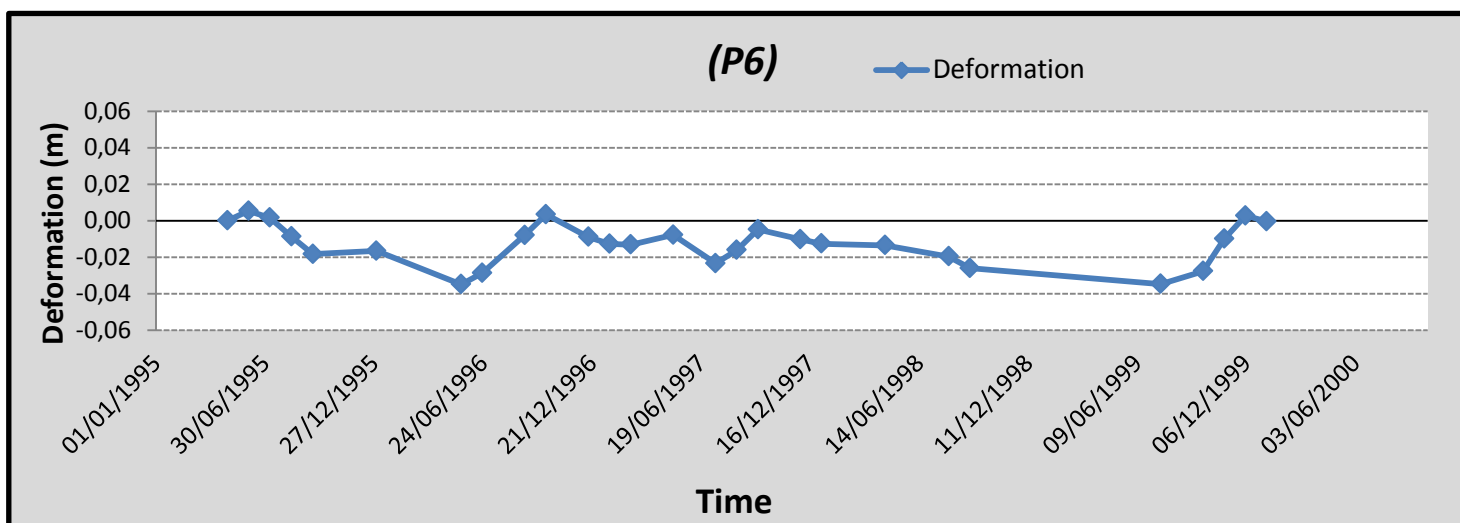
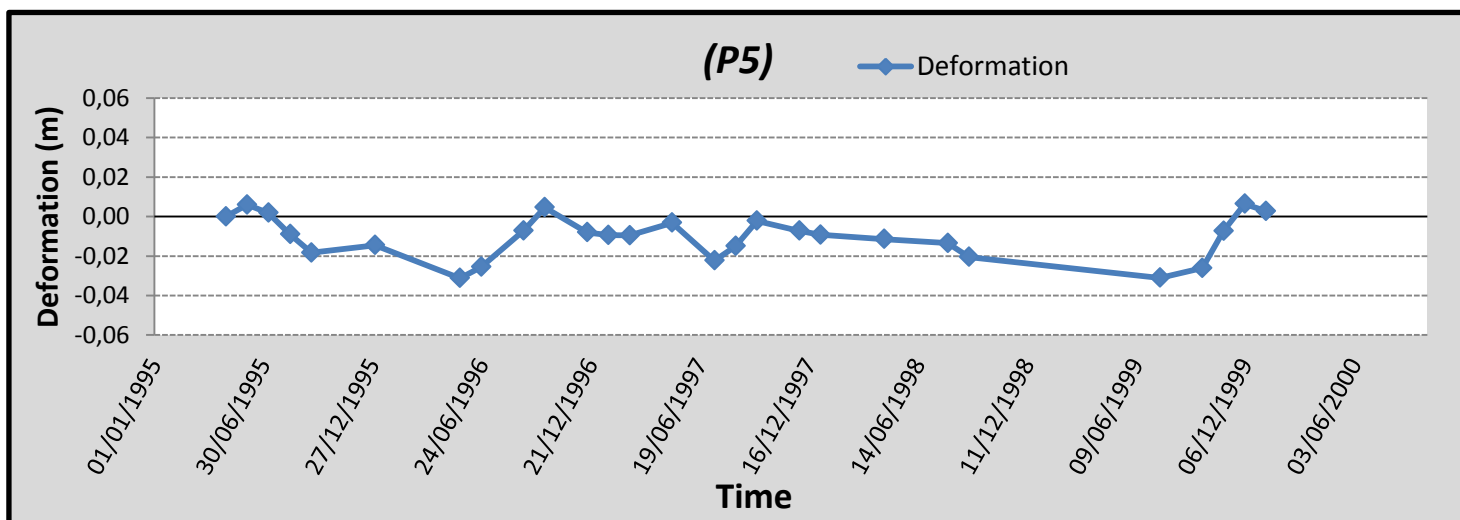
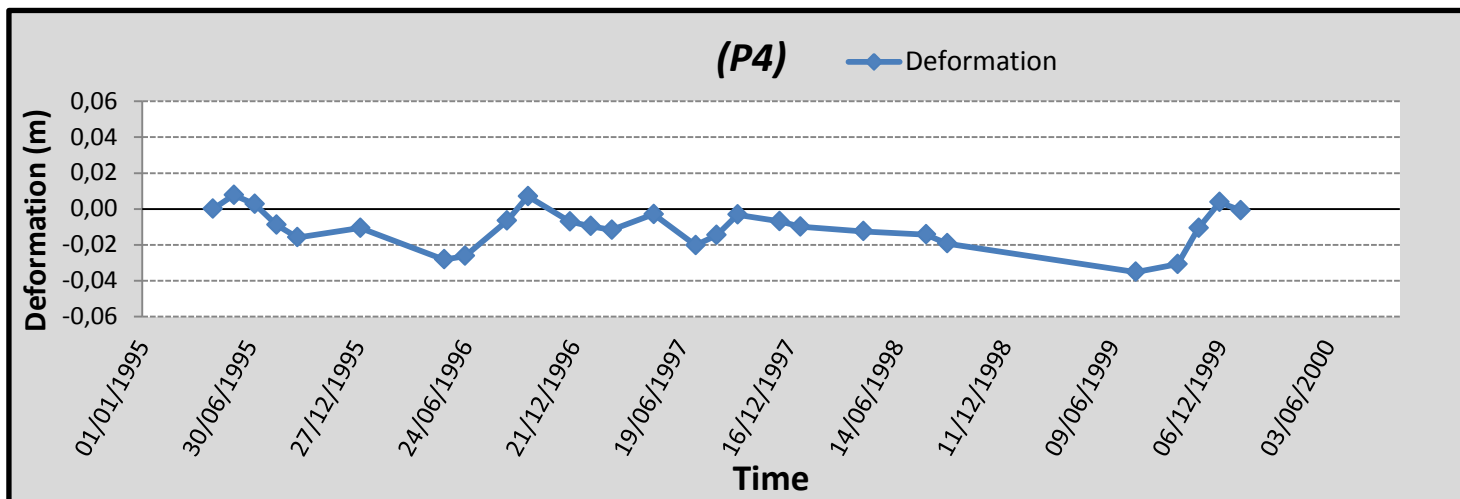
Προκειμένου να γίνει αντιληπτή τόσο η συμπεριφορά του φράγματος όσο και των αντερεισμάτων κρίθηκε σκόπιμο να γίνουν διαγράμματα της διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένα σημεία πάνω στο φράγμα όσο και στα πρανή. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 39) αναγράφονται τα σημεία στα οποία έγινε η διαχρονική ανάλυση.



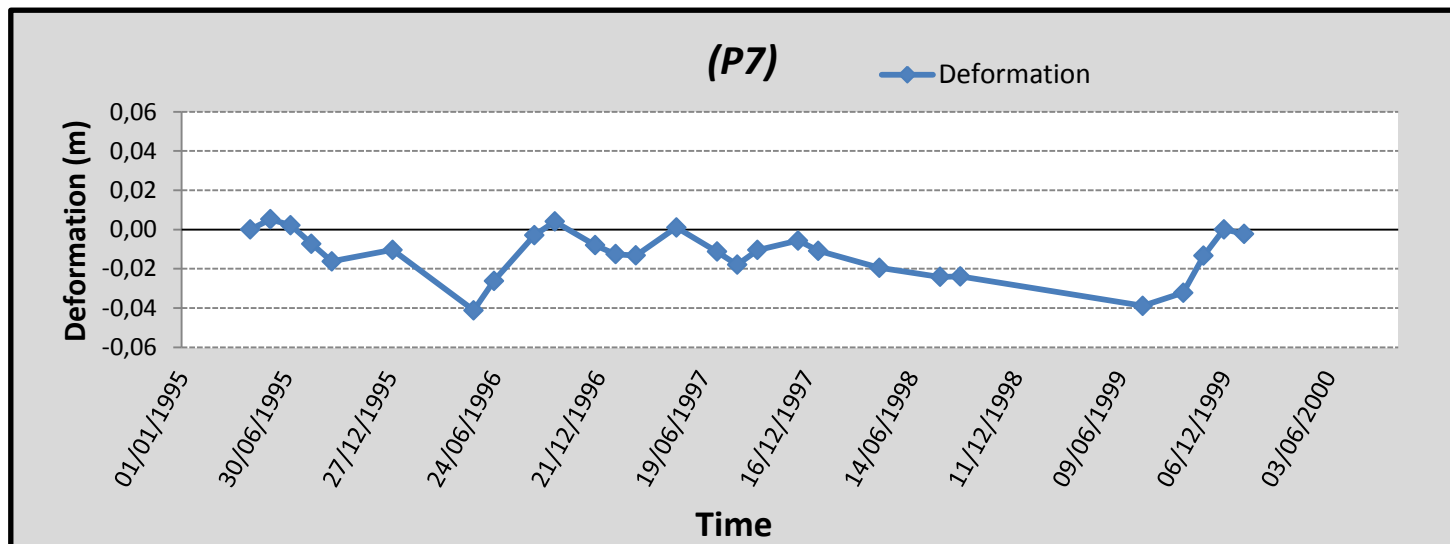
Εικόνα 39: Επιλεγμένα σημεία στα οποία έγινε η διαχρονική ανάλυση παραμόρφωσης (Time-series analysis)



Σχήμα 3: Διαγράμματα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένα σημεία πάνω στο φράγμα.



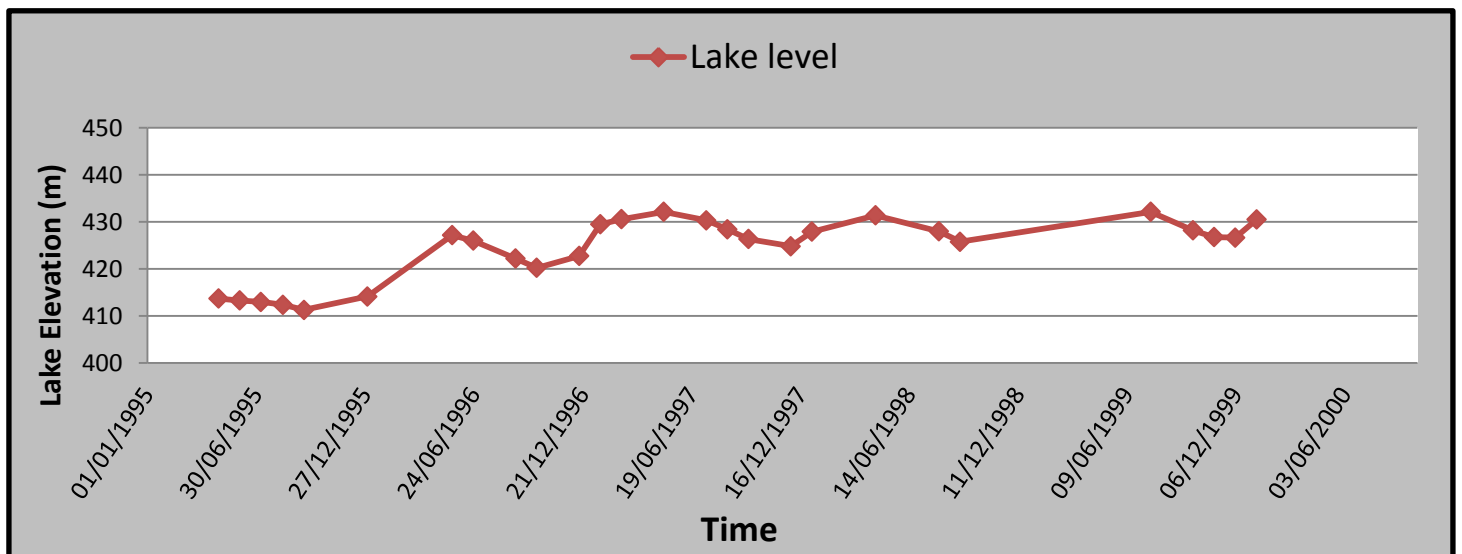
Σχήμα 4: Διαγράμματα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένα σημεία κατά μήκος του Δεξιού Βόρειου αντερείσματος.



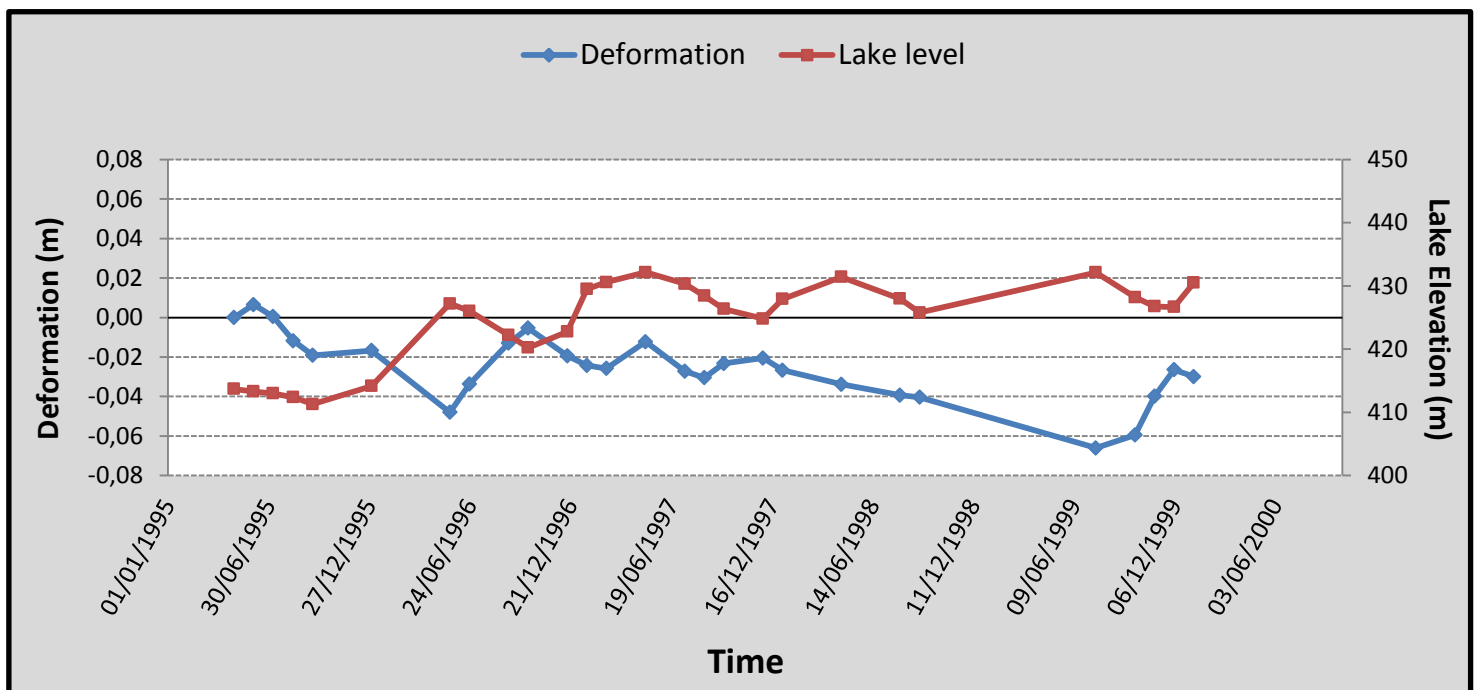
Σχήμα 5: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένο σημείο στο Αριστερού Νότιο αντέρεισμα.

Κάνοντας μία πρώτη ανάγνωση των παραπάνω διαγραμμάτων, παρατηρούμε ότι σε όλα τα διαγράμματα το μοτίβο της διαχρονικής παραμόρφωσης είναι σχεδόν το ίδιο. Αυτό που αλλάζει είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης όπου στα σημεία πάνω στο φράγμα παρατηρούμε ότι είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τα δύο αντερείσματα (Βόρειο – Νότιο). Αναλύοντας τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε συγκεκριμένα ότι ξεκινώντας από την ημερομηνία λήψης 29/04/1995 όπου είναι η ημερομηνία αναφοράς, παρατηρούμε ότι μέχρι της 19/05/1996 σε διάστημα σχεδόν ενός χρόνου έχουμε μία παραμόρφωση της τάξεως των - 5cm συνολικά στο φράγμα ενώ στα δύο αντερείσματα της τάξεως των -3,5 έως -4 cm. Ακολούθως παρατηρούμε ότι γίνεται μία επαναφορά της παραμόρφωσης μέχρι της 06/10/1996 και εν συνεχεία από το διάστημα 15/12/1996 μέχρι της 18/07/1999 παρατηρείται μία εκ νέου παραμόρφωση η οποία φθάνει τα - 6cm, μέσα σε 2,5 χρόνια, στο φράγμα ενώ στα δύο αντερείσματα τα -4cm. Τέλος γίνεται και πάλι επαναφορά της παραμόρφωσης μέχρι την ημερομηνία 09/01/2000.

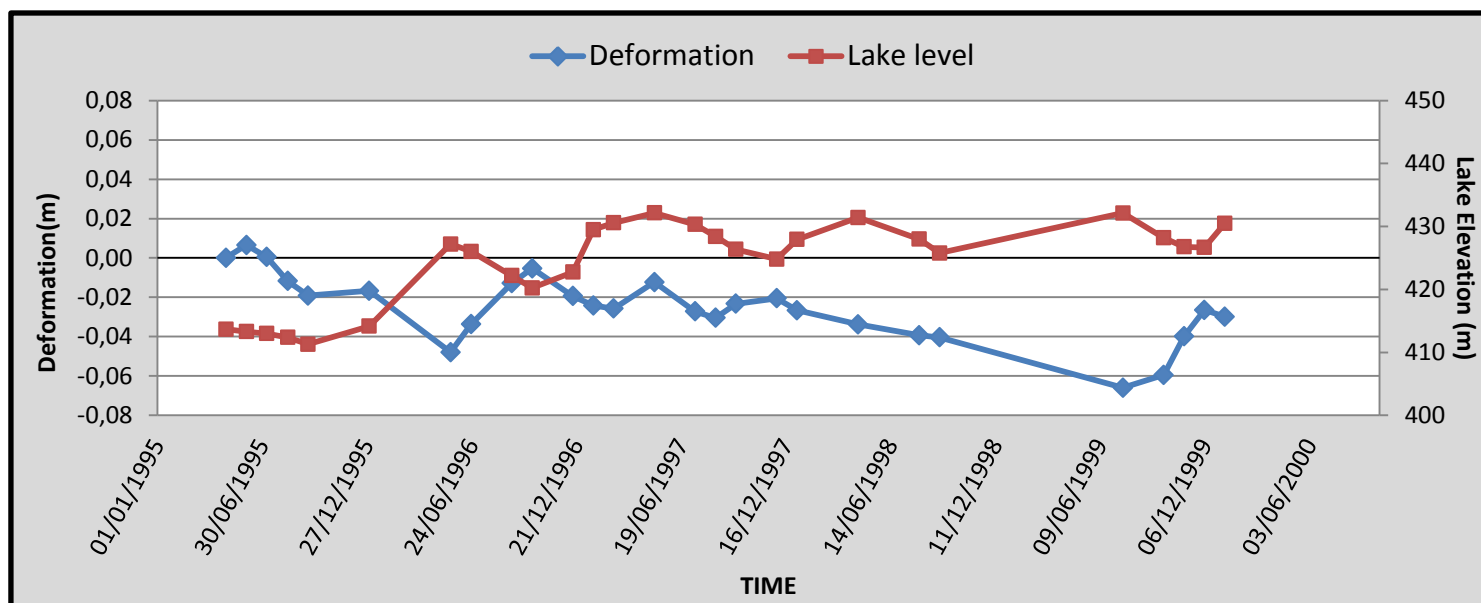
Για την καλύτερη αξιολόγηση-ερμηνεία των παραπάνω διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα διάγραμμα της στάθμης της τεχνητής λίμνης του Φράγματος και της σεισμικής δραστηριότητας της ευρύτερης περιοχής, τα οποία συσχετίστηκαν με το διάγραμμα της διαχρονικής παραμόρφωσης.



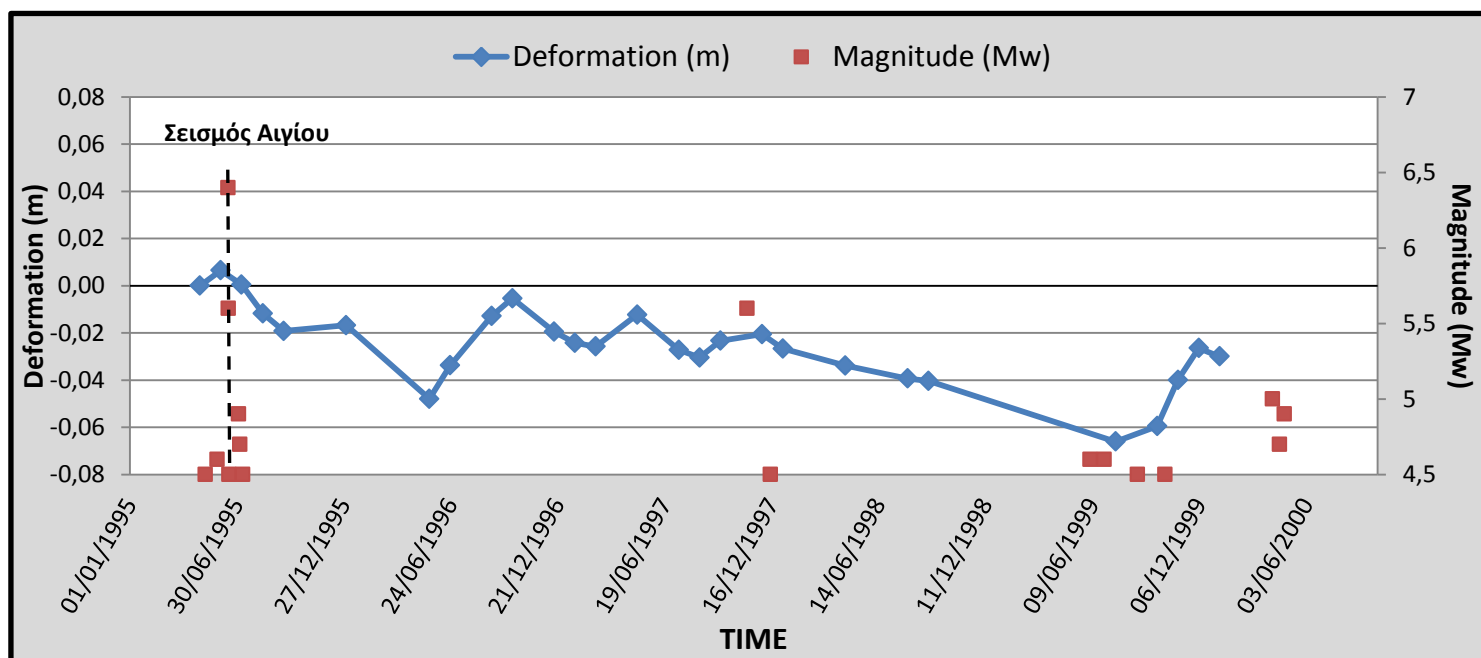
Σχήμα 6: Διάγραμμα της στάθμης της τεχνητής λίμνης του φράγματος Μόρνου για το χρονικό διάστημα 1995-2000.



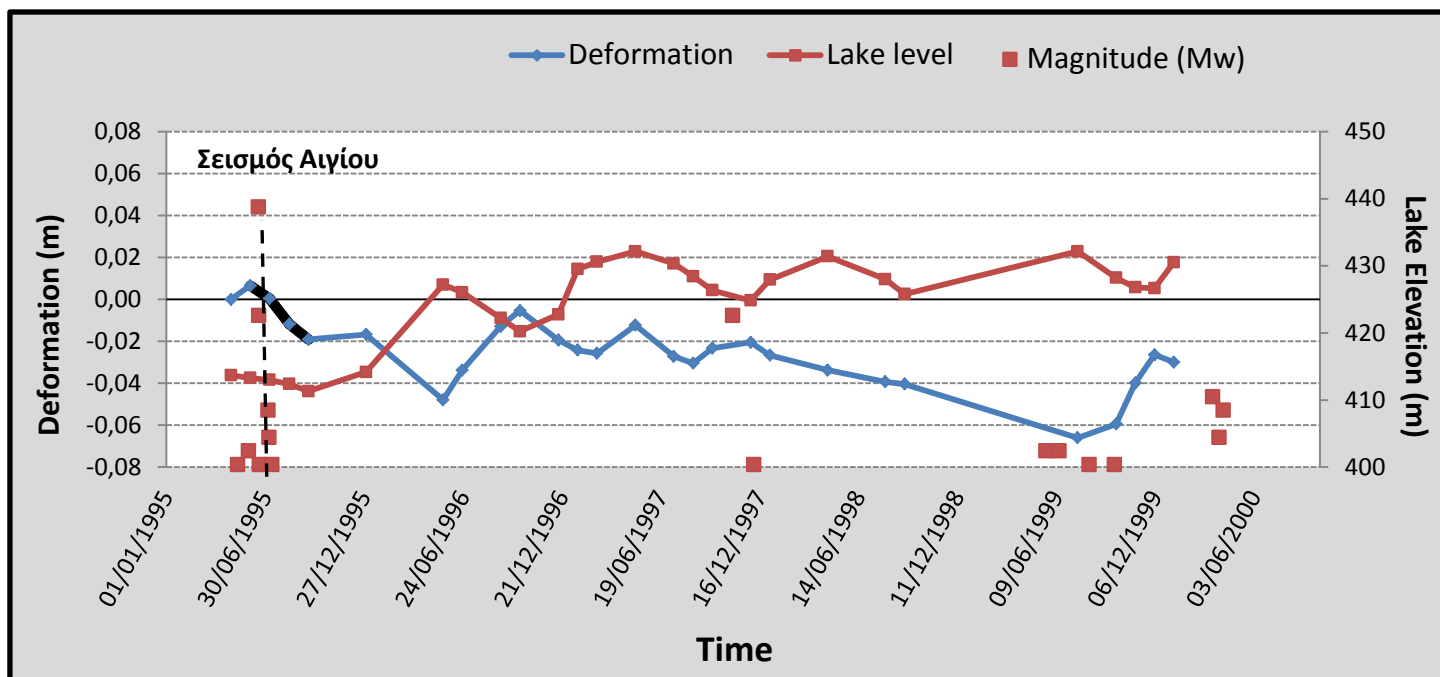
Σχήμα 7: Συσχέτιση των διαγραμμάτων της διαχρονικής παραμόρφωσης του φράγματος και της στάθμης της τεχνητής λίμνης Μόρνου για το χρονικό διάστημα 1995-2000.



Σχήμα 8: Συσχέτιση των διαγραμμάτων της διαχρονικής παραμόρφωσης του Αριστερού Βόρειου αντερείσματος και της στάθμης της τεχνητής λίμνης Μόρνου για το χρονικό διάστημα 1995-2000.



Σχήμα 9: Συσχέτιση των διαγραμμάτων της διαχρονικής παραμόρφωσης του φράγματος Μόρνου και της σεισμικής δραστηριότητας για το χρονικό διάστημα 1995-2000.

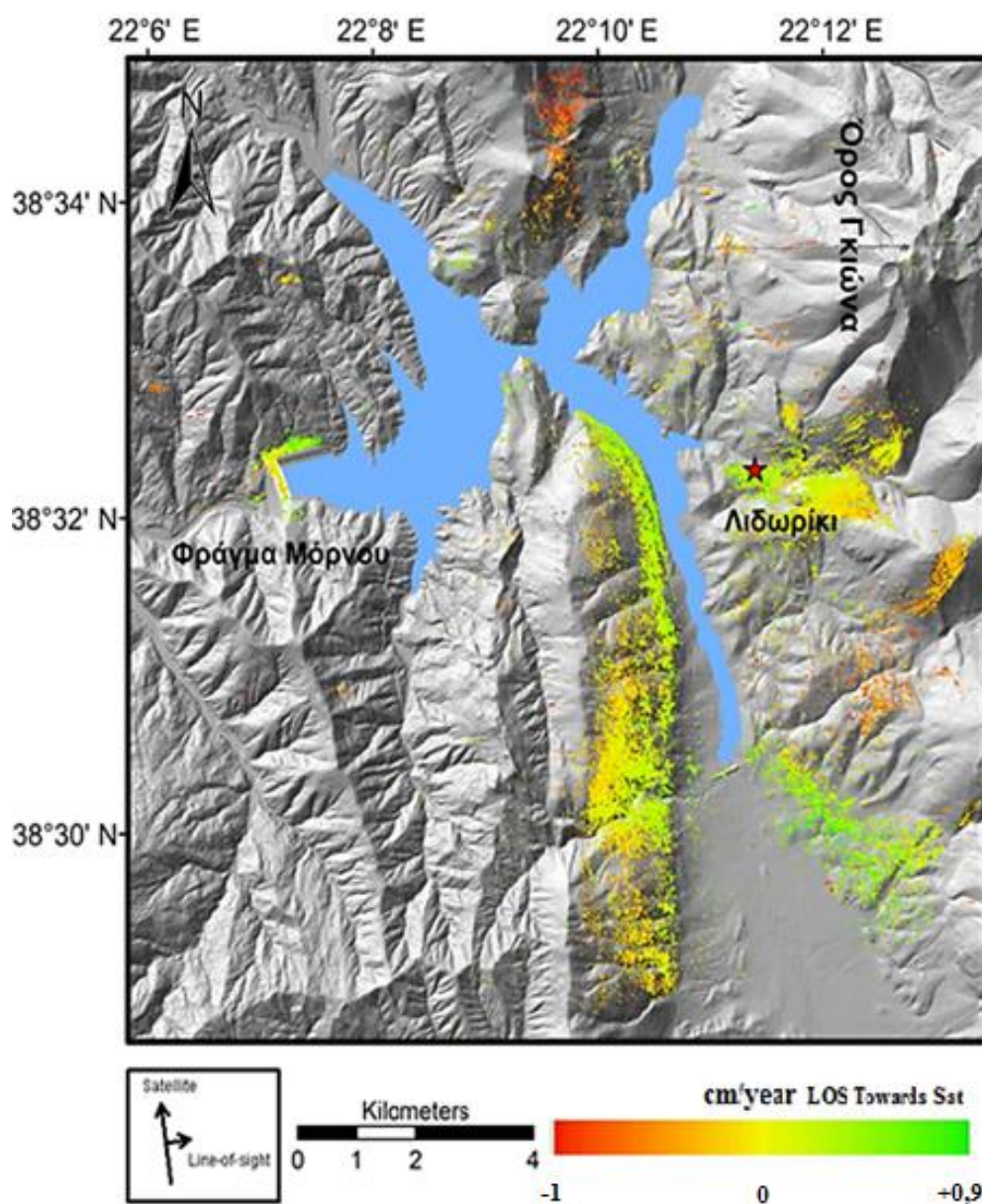


Σχήμα 10: Συσχέτιση των διαγραμμάτων της διαχρονικής παραμόρφωσης του φράγματος Μόρνου, της στάθμης της τεχνητής λίμνης και της σεισμικής δραστηριότητας για το χρονικό διάστημα 1995-2000.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε ότι ο ρυθμός της διαχρονικής παραμόρφωσης έχει άμεση σχέση με την στάθμη της τεχνητής λίμνης. Συγκεκριμένα τις χρονικές περιόδους όπου έχουμε αύξηση της στάθμης της λίμνης είτε λόγω των βροχοπτώσεων είτε λόγω των υδάτων που προέρχονται από το φράγμα του Εύηνου, έχουμε αντίστοιχα μία καθίζηση του φράγματος ενώ τις χρονικές περιόδους όπου παρουσιάζεται μία μείωση της στάθμης της λίμνης, παρουσιάζεται αντίστοιχα μία επαναφορά του φράγματος. Αξιοσημείωτο είναι όμως το χρονικό διάστημα από 03/06/1995 έως 17/09/1995 όπου παρατηρούμε ότι ενώ θα αναμέναμε λόγω της σταθερής στάθμης της λίμνης, το φράγμα να παραμένει σταθερό, αντιθέτως βλέπουμε το φράγμα αλλά και τα αντερείσματα να παρουσιάζουν μια παραμόρφωση στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα της τάξεως των -3 cm συνολικά. Αυτό πιθανότατα να οφείλεται στην ισχυρή σεισμική δραστηριότητα ($M_w=6,2$) που έλαβε χώρα στις 15/06/1995 στην περιοχή του Αιγίου και ίσως να επηρέασε τοπικά την συμπεριφορά του φράγματος.

6.1.2 Διαχρονική εδαφική παραμόρφωση για την χρονική περίοδο 2003-2010

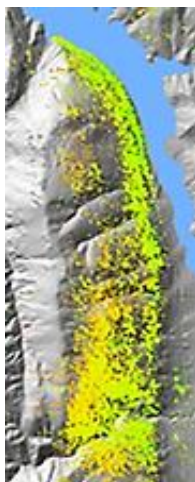
Μετά από την επεξεργασία των ASAR δεδομένων του δορυφορικού συστήματος ENVISAT, παρήχθησαν οι τελική χάρτες της διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης για την περιοχή μελέτης. Στην συνέχεια ακολουθούν οι χάρτες παραμόρφωσης ανοδικής (Εικόνα 40) και καθοδικής (Εικόνα 41) τροχιάς καθώς επίσης και τα διαγράμματα ιστορικής παραμόρφωσης για επιλεγμένα σημεία-στόχους στο φράγμα του Μόρνου:



Εικόνα 40: Χάρτης διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης στην διεύθυνση του LOS (ανοδικής τροχιάς/ENVISAT) της ευρύτερης περιοχής του φράγματος Μόρνου για την χρονική περίοδο 2003-2010. Με κόκκινο αστέρι απεικονίζεται το επιλεγμένο σημείο αναφοράς.

Παρατηρώντας την εικόνα 40, βλέπουμε ότι σε γενικές γραμμές το μοτίβο της παραμόρφωσης στην ευρύτερη περιοχή παραμένει ίδιο με το χρονικό διάστημα 1995-2000 αλλά σε μικρότερο όμως ρυθμό. Συγκεκριμένα με βάση το σημείο αναφοράς που επιλέχθηκε στο χωριό Λιδωρίκι, το οποίο χαρακτηρίζεται σταθερό με μία μικρή άνοδο της τάξης των $+1,5\text{mm/year}$, παρατηρούμε ότι το ίδιο μοτίβο παραμόρφωσης διακρίνουμε στο απέναντι ορεινό όγκο από το χωριό Λιδωρίκι με μικρότερο ρυθμό και συγκεκριμένα άνοδο της τάξεως των $+3\text{mm/year}$ κατά μήκος της όχθης της τεχνητής λίμνης ενώ όσο πηγαίνουμε προς τα υψηλότερα σημεία σταθεροποιείται ή και μειώνεται κατά $-1,5\text{mm/year}$ (Εικόνα 41α).

Εστιάζοντας στην περιοχή του φράγματος, παρατηρούμε ότι το φράγμα και συγκεκριμένα η ανάντη πλευρά παρουσιάζει μία καθίζηση της τάξεως των $-1,5$ έως -2mm/year ενώ στο Δεξιό Βόρειο αντέρεισμα βλέπουμε μία εναλλαγή στην παραμόρφωση και συγκεκριμένα ξεκινώντας από το φράγμα και πηγαίνοντας προς τα Ανατολικά κατά μήκος του πρανούς παρατηρούμε αρχικά μία μείωση της τάξεως των $-0,5$ έως 1mm/year , στην συνέχεια μία άνοδος της τάξεως των $+2,5\text{mm/year}$, στην συνέχεια μία εκ νέου μείωση της τάξεως των -1mm/year και τέλος προς το τέλος του πρανούς μία άνοδος της τάξεως των $+2\text{mm/year}$ (Εικόνα 41 β). Αυτό πιθανότατα να οφείλεται στην εναλλαγή της λιθολογίας του πρανούς που ενώ αποτελείται γενικά από τον σχηματισμό του φλύσχη, πιο συγκεκριμένα χαρακτηρίζεται από την εναλλαγή της αργιλικής φάσης του φλύσχη και της ψαμμιτικής φάσης του φλύσχη.

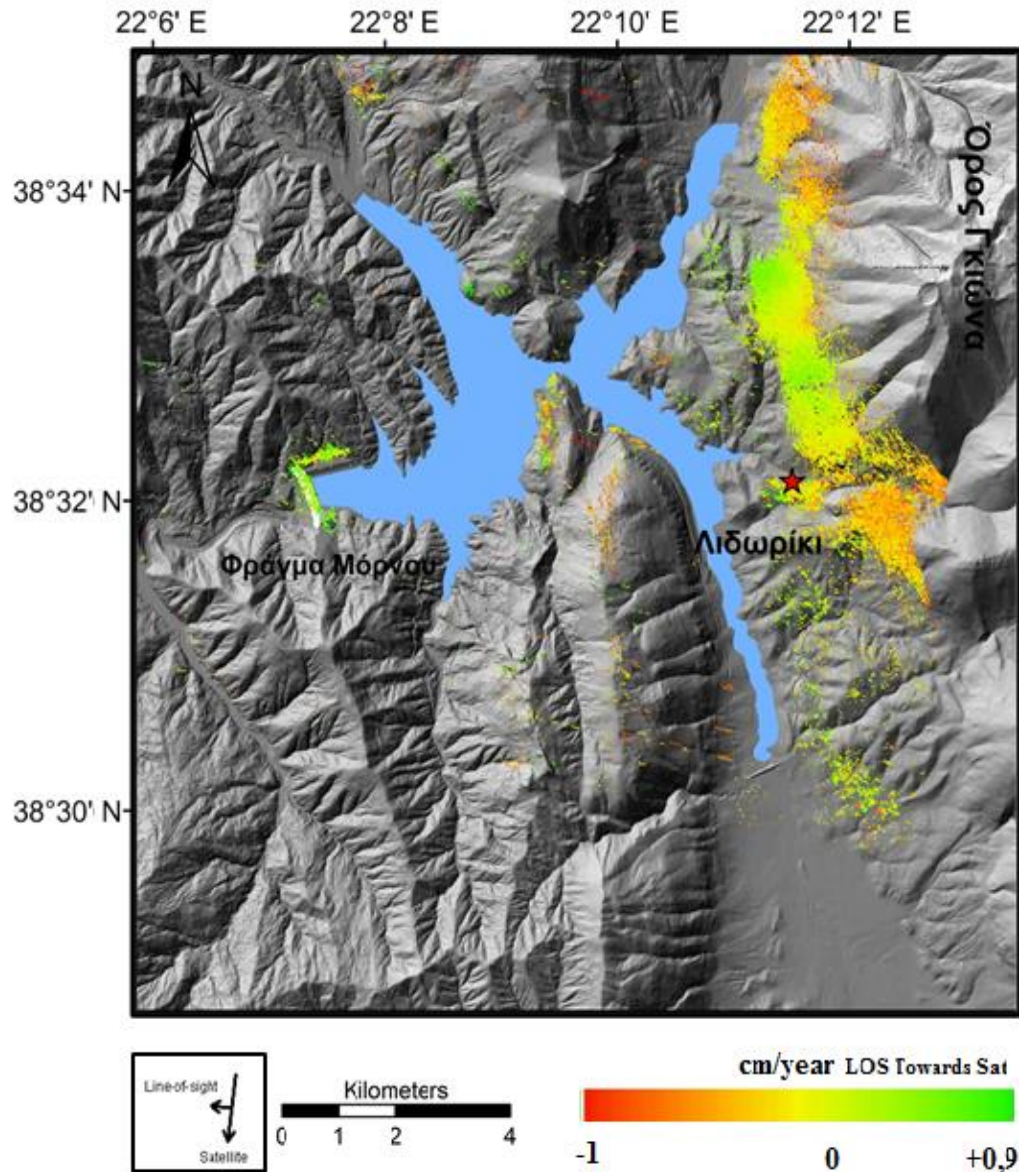


(α)



(β)

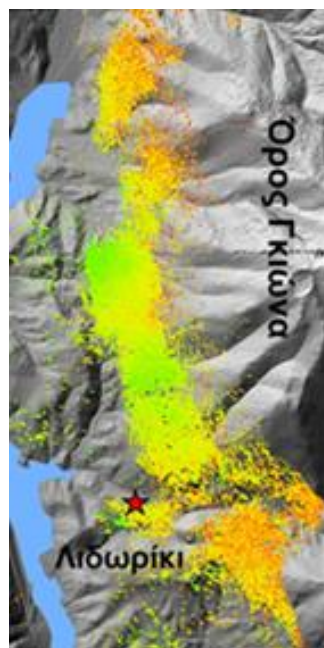
Εικόνα 41: Εστιαζόμενες περιοχές (παράθυρα) αξιολόγησης του χάρτη διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης (Envisat ascending).



Εικόνα 42: Χάρτης διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης στην διεύθυνση του LOS (καθοδικής τροχιάς/ENVISAT) της ευρύτερης περιοχής του φράγματος Μόρνου για την χρονική περίοδο 2003-2010. Με κόκκινο αστέρι απεικονίζεται το επιλεγμένο σημείο αναφοράς.

Παρατηρώντας την εικόνα 42, βλέπουμε ότι σε σχέση με το σημείο αναφοράς που επιλέχθηκε στο χωριό Λιδωρίκι, το οποίο χαρακτηρίζεται σχεδόν σταθερό με μία μικρή κάθοδο της τάξεως των -1mm/year , διακρίνουμε Βόρεια του Λιδωρικίου δύο περιοχές όπου έχουμε άνοδο της τάξεως των $+2$ έως $+3\text{mm/year}$ ενώ εκατέρωθεν αυτών η περιοχή είναι σταθερή και παράλληλα, κατά μήκος στις πρόποδες του όρους Γκιώνα παρουσιάζεται μία μείωση της τάξεως

των -3mm/year (Εικόνα 43 α). Εστιάζοντας στην περιοχή του φράγματος, παρατηρούμε ότι το Δεξιό Βόρειο αντέρεισμα παρουσιάζει μία εναλλαγή στην παραμόρφωση όπως και στον προηγούμενο χάρτη και συγκεκριμένα ξεκινώντας από το φράγμα και πηγαίνοντας προς τα Ανατολικά κατά μήκος του πρηνούς παρατηρούμε αρχικά μία μείωση της τάξεως των $-0,5$ έως -1mm/year , στην συνέχεια μία άνοδος της τάξεως των $+2\text{mm/year}$, στην συνέχεια μία εκ νέου μείωση της τάξεως των -1mm/year και τέλος προς το τέλος του πρηνούς μία άνοδος της τάξεως των $+2\text{mm/year}$. Αυτό πιθανότητα να οφείλεται στην εναλλαγή των λιθολογίας του πρηνούς που ενώ αποτελείται γενικά από τον σχηματισμό του φλύσχη, πιο συγκεκριμένα χαρακτηρίζεται από την εναλλαγή της αργιλικής φάσης και της ψαμμιτικής φάσης του φλύσχη. Το Αριστερό Νότιο αντέρεισμα χαρακτηρίζεται τόσο από σταθερά σημεία όσο και από σημεία όπου παρουσιάζουν άνοδο της τάξεως των $+2$ έως $+3\text{ mm/year}$ ενώ το φράγμα του Μόρνου και κατάντη αυτού παρουσιάζει μία άνοδο της τάξης των $+1,5\text{mm/year}$ (Εικόνα 43 β).



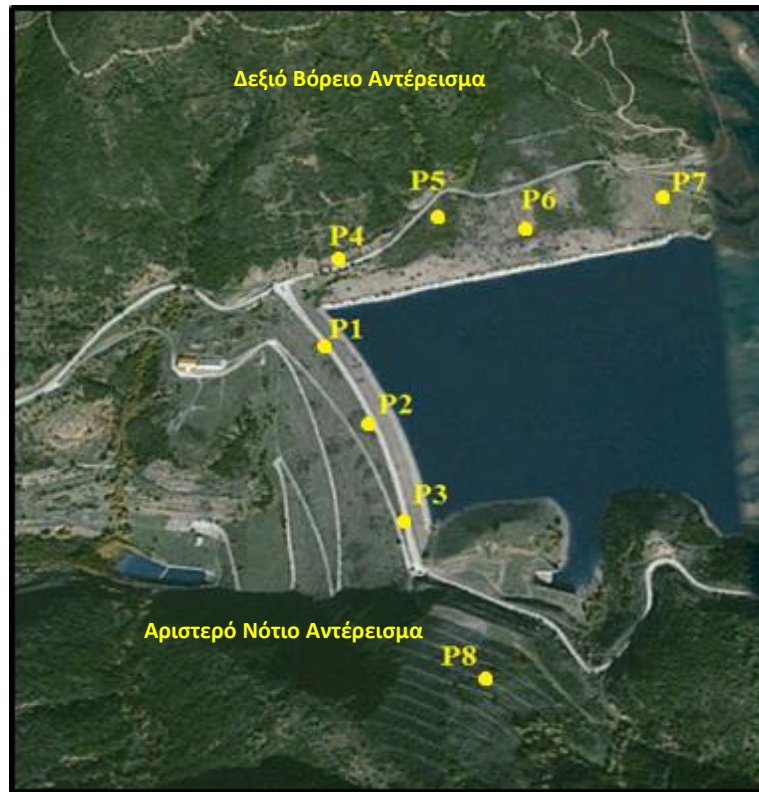
(α)



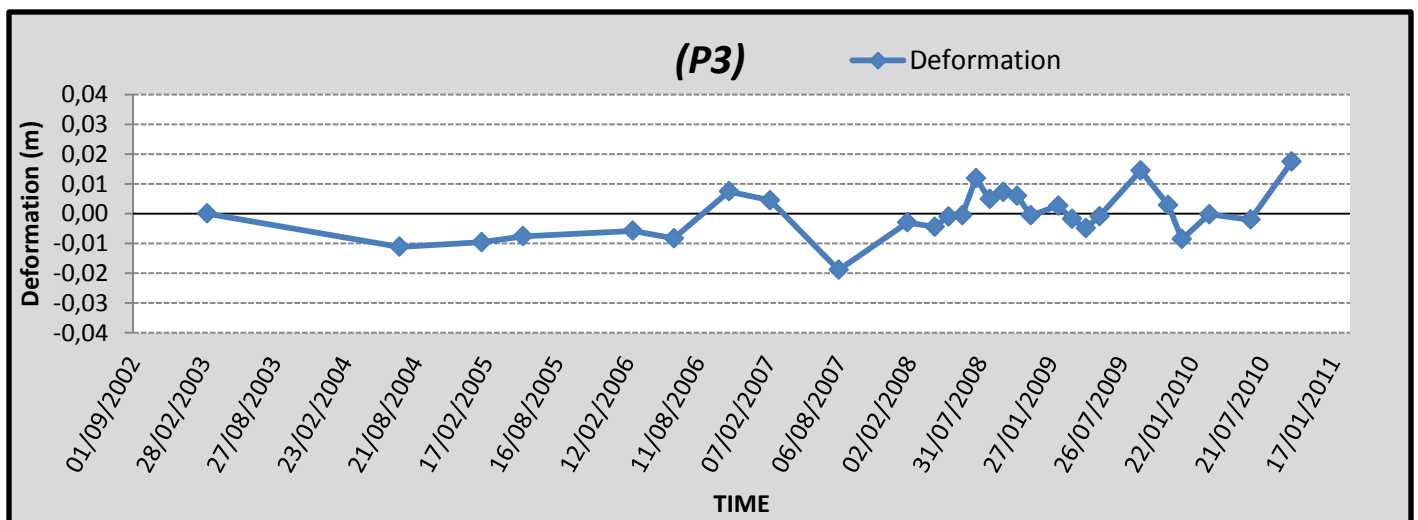
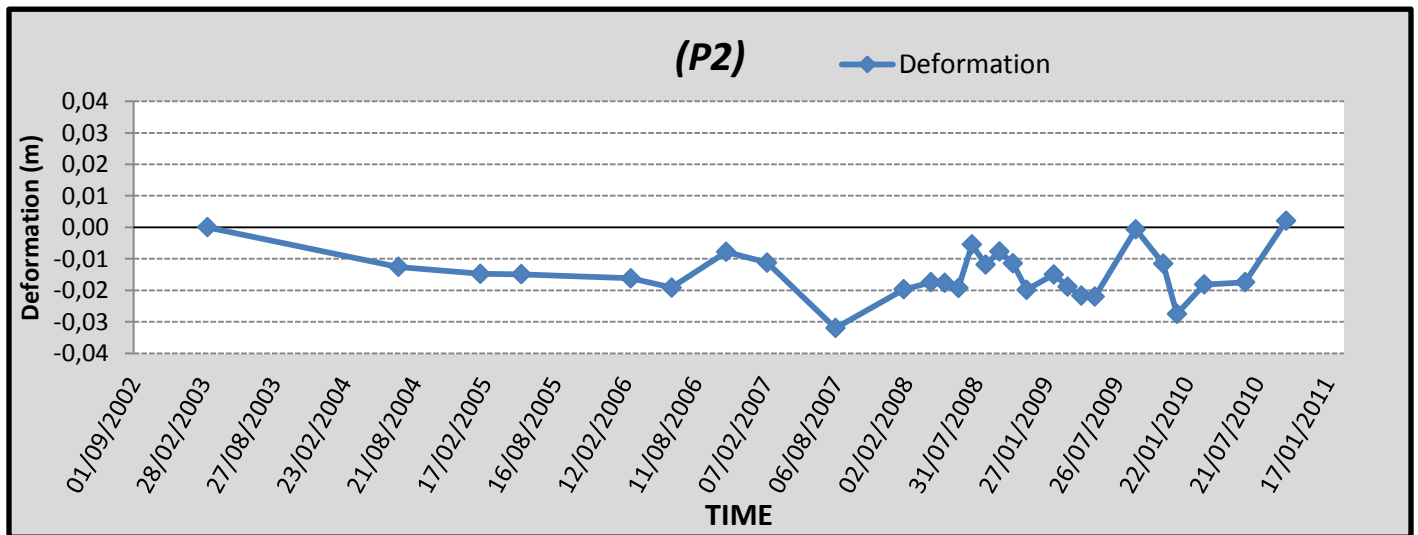
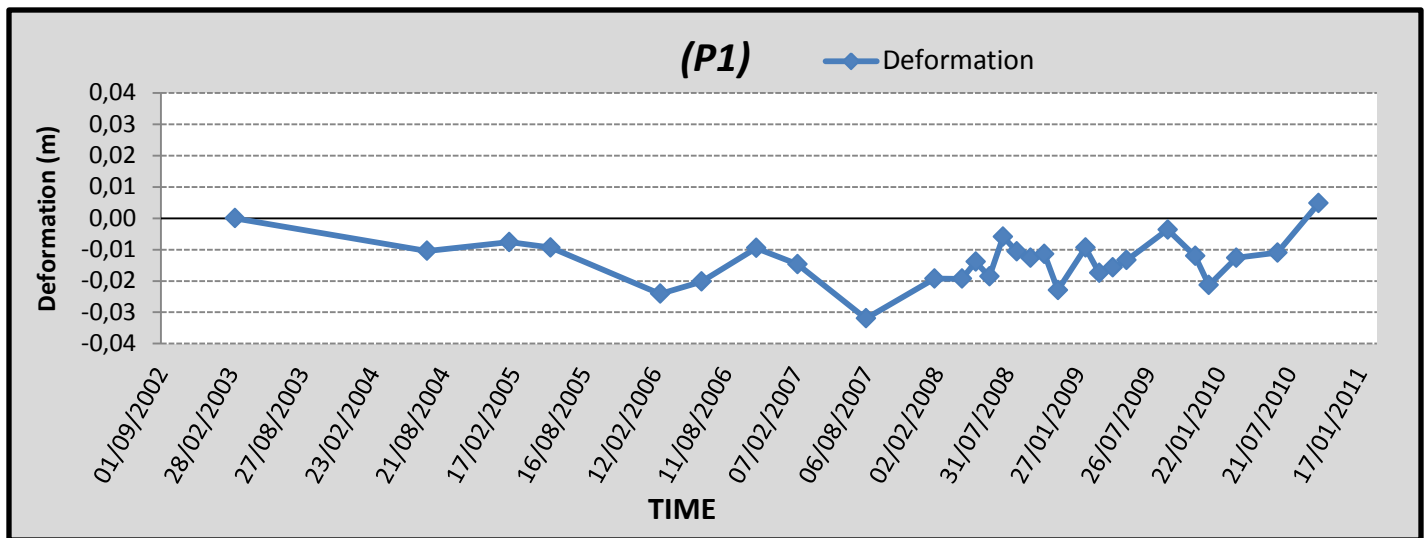
(β)

Εικόνα 43: Εστιαζόμενες περιοχές (παράθυρα) αξιολόγησης του χάρτη διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης (Envisat descending).

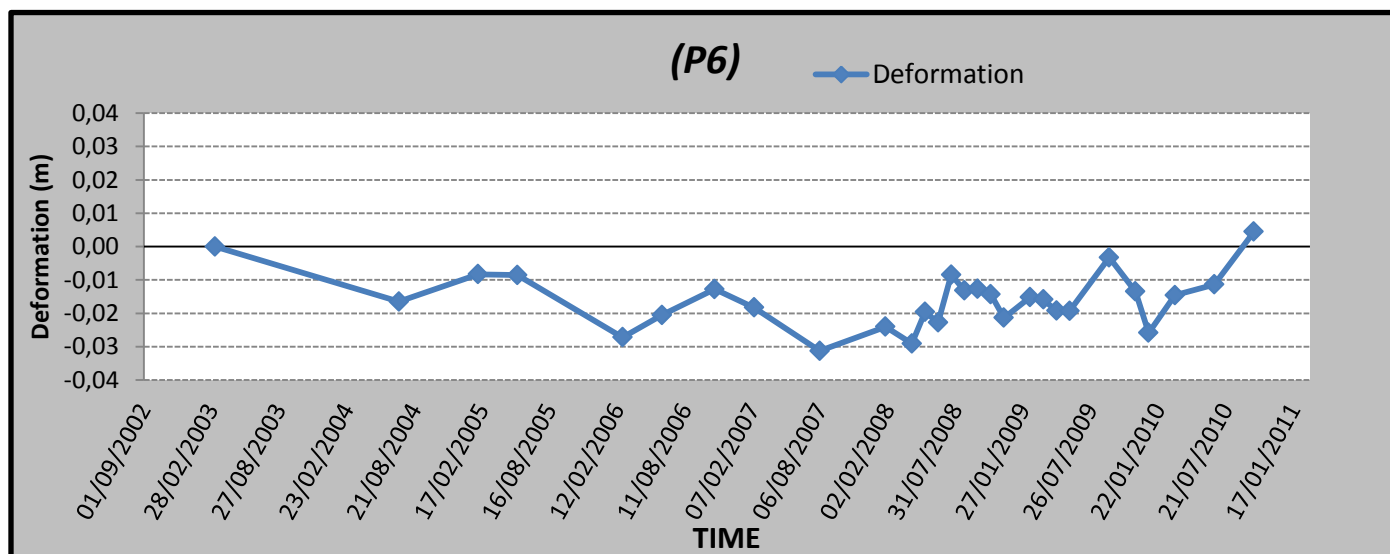
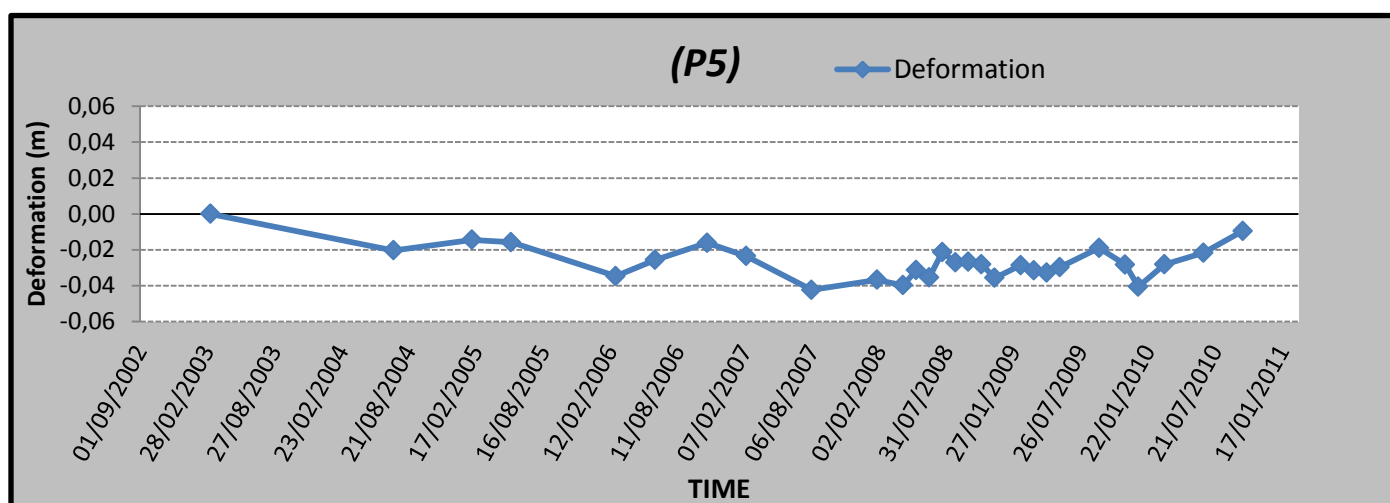
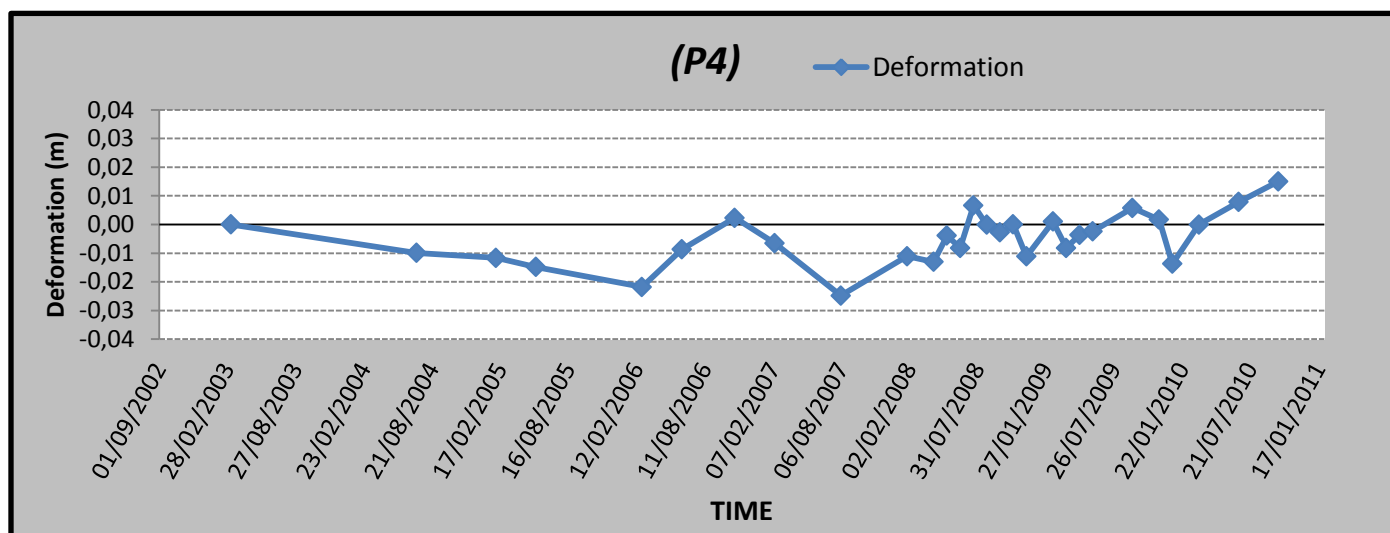
Προκειμένου να γίνει αντιληπτή τόσο η συμπεριφορά του φράγματος όσο και των αντερεισμάτων κρίθηκε σκόπιμο να γίνουν διαγράμματα της διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένα σημεία πάνω στο φράγμα όσο και στα πρανή. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 44) αναγράφονται τα σημεία στα οποία έγινε η διαχρονική ανάλυση.



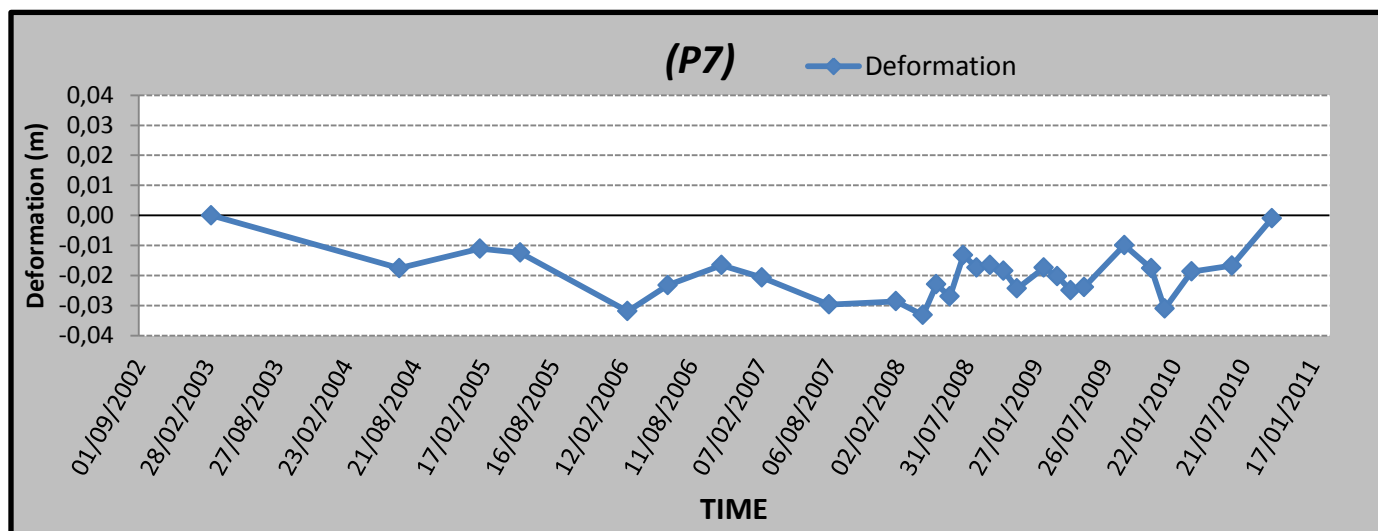
Εικόνα 44: Επιλεγμένα σημεία στα οποία έγινε η διαχρονική ανάλυση παραμόρφωσης (Time-series analysis)



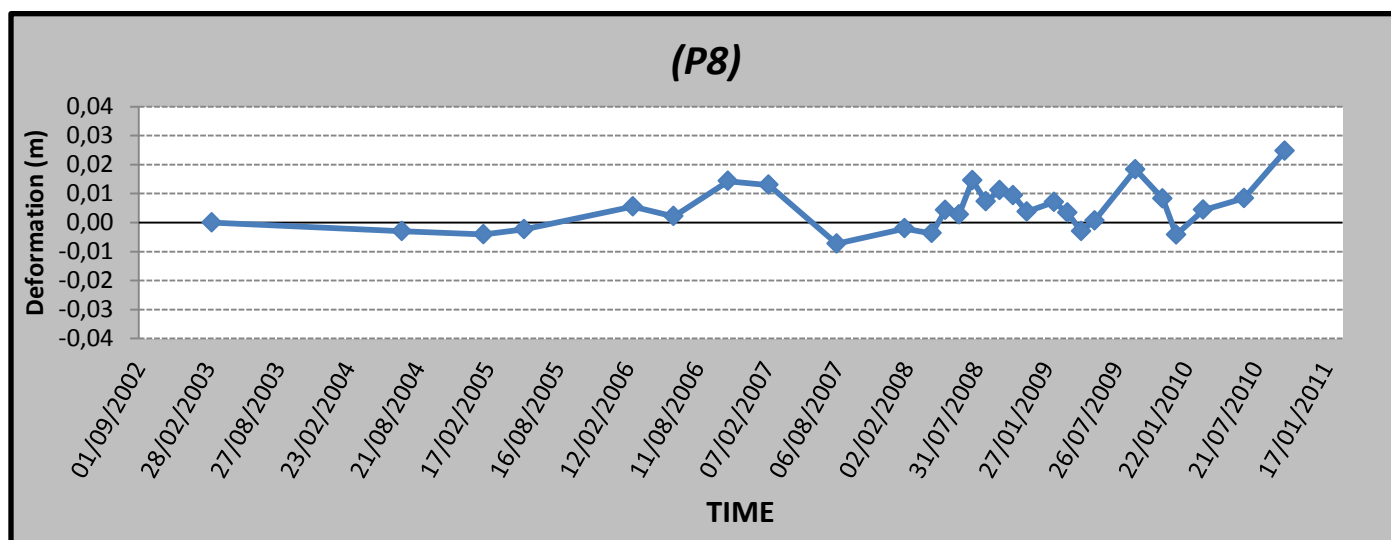
Σχήμα 11: Διαγράμματα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένα σημεία πάνω στο φράγμα.



Σχήμα 12: Διαγράμματα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένα σημεία κατά μήκος του Δεξιού Βόρειου αντερείσματος.



Σχήμα 13: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένο σημείο κατά μήκος του Δεξιού Βόρειου αντερείσματος.

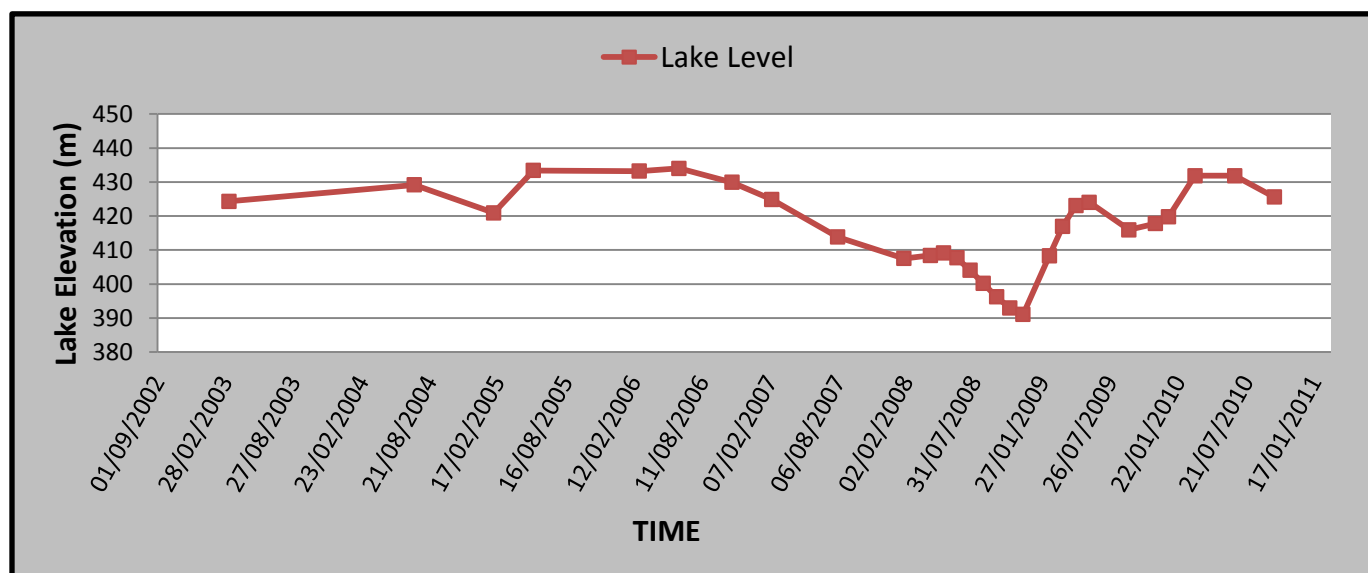


Σχήμα 14: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένο σημείο κατά μήκος του Δεξιού Βόρειου αντερείσματος.

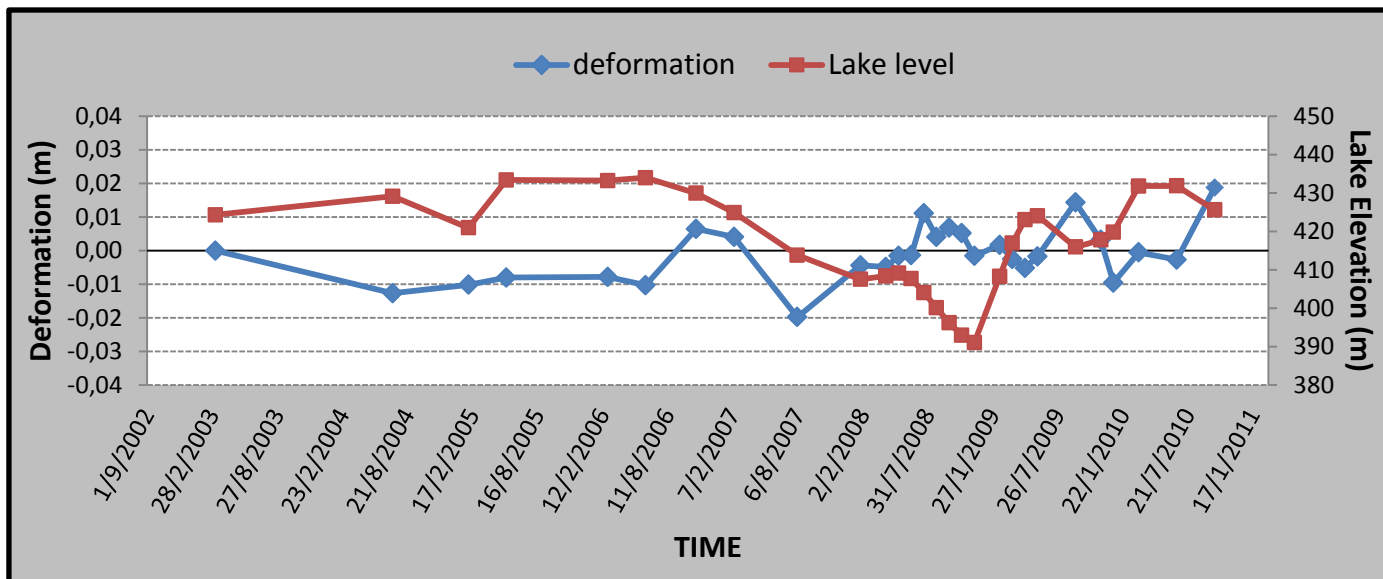
Κάνοντας μία πρώτη ανάγνωση των παραπάνω διαγραμμάτων, παρατηρούμε ότι σε όλα τα διαγράμματα το μοτίβο της διαχρονικής παραμόρφωσης είναι σχεδόν το ίδιο. Αυτό που αλλάζει είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης όπου στα σημεία πάνω στο φράγμα παρατηρούμε ότι είναι μικρότερος σε σχέση με τα δύο αντερείσματα (Βόρειο – Νότιο).

Αναλύοντας τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε συγκεκριμένα ότι ξεκινώντας από την ημερομηνία λήψης 09/03/2003 όπου είναι η ημερομηνία αναφοράς, παρατηρούμε ότι μέχρι της 05/08/2007 έχουμε μία παραμόρφωση της τάξεως των -3cm στο φράγμα ενώ στο Δεξιό Βόρειο αντέρεισμα έχουμε μία παραμόρφωση της τάξεως των +4cm στο σημείο P4, +4,5cm στο σημείο P5, +3cm στα σημεία P6 και P7 ενώ το αριστερό Νότιο Αντέρεισμα χαρακτηρίζεται σταθερό με μία μικρή άνοδο της τάξεως των +1 cm. Ακολούθως παρατηρούμε ότι γίνεται μία σταδιακή επαναφορά της παραμόρφωσης μέχρι της 13/09/2009 και εν συνεχεία από το διάστημα 13/09/2009 μέχρι της 27/12/2009 παρατηρείται μία εκ νέου παραμόρφωση η οποία φθάνει τα -2cm στο φράγμα αλλά και στα δύο αντερείσματα. Τέλος από το διάστημα 27/12/2009 γίνεται και πάλι μία απότομη επαναφορά της παραμόρφωσης της τάξεως των +3,5cm μέχρι την ημερομηνία 03/10/2010.

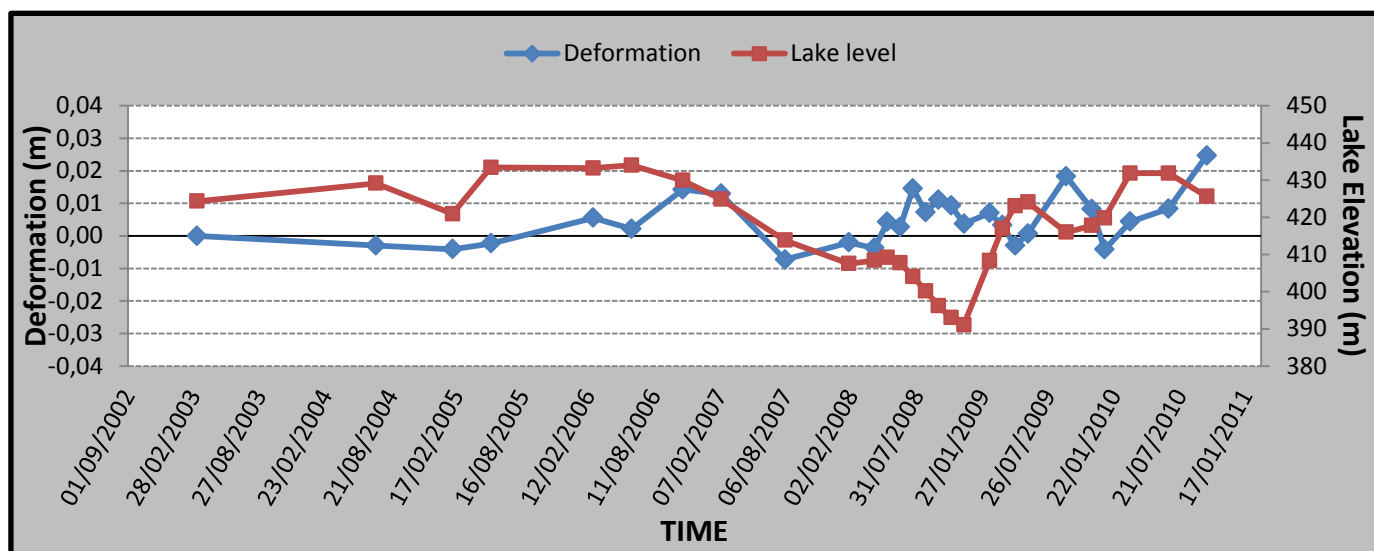
Για την καλύτερη αξιολόγηση-ερμηνεία των παραπάνω διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα διαγράμματα της στάθμης της τεχνητής λίμνης του Φράγματος και της σεισμικής δραστηριότητας, τα οποία συσχετίστηκαν με το διάγραμμα της διαχρονικής παραμόρφωσης.



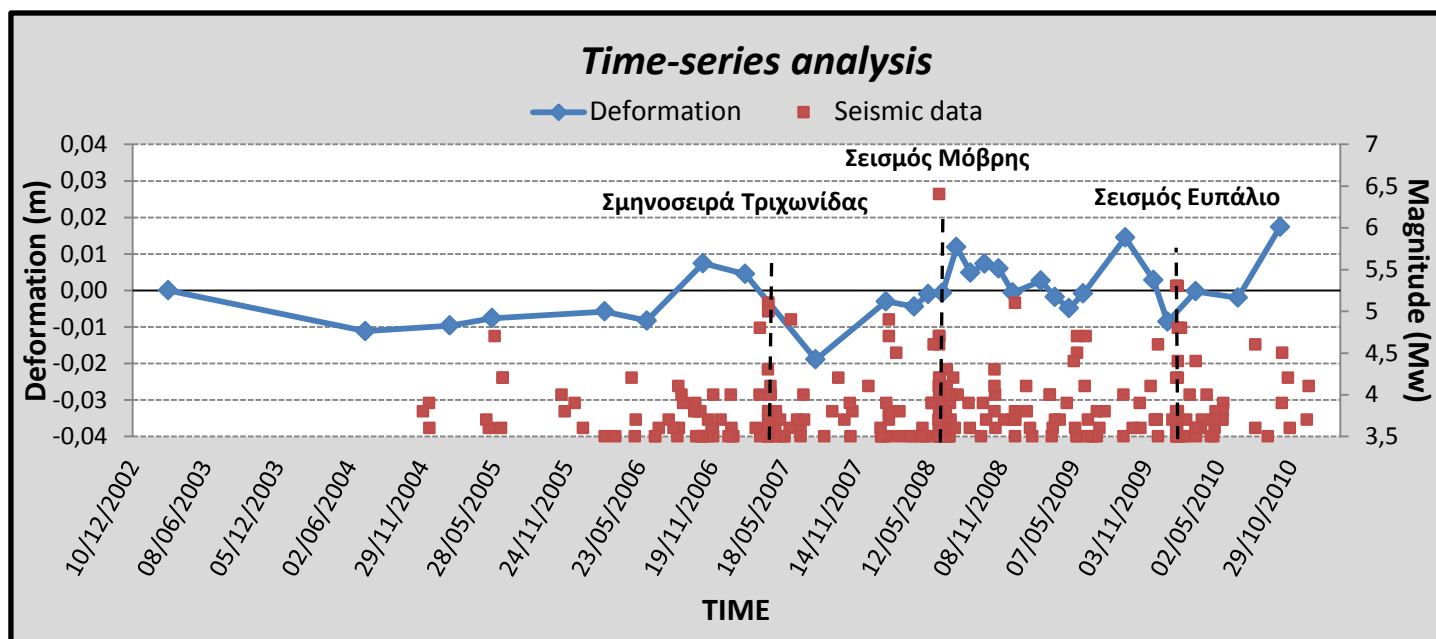
Σχήμα 15: Διάγραμμα της στάθμης της τεχνητής λίμνης του φράγματος Μόρνου για το χρονικό διάστημα 2003-2010.



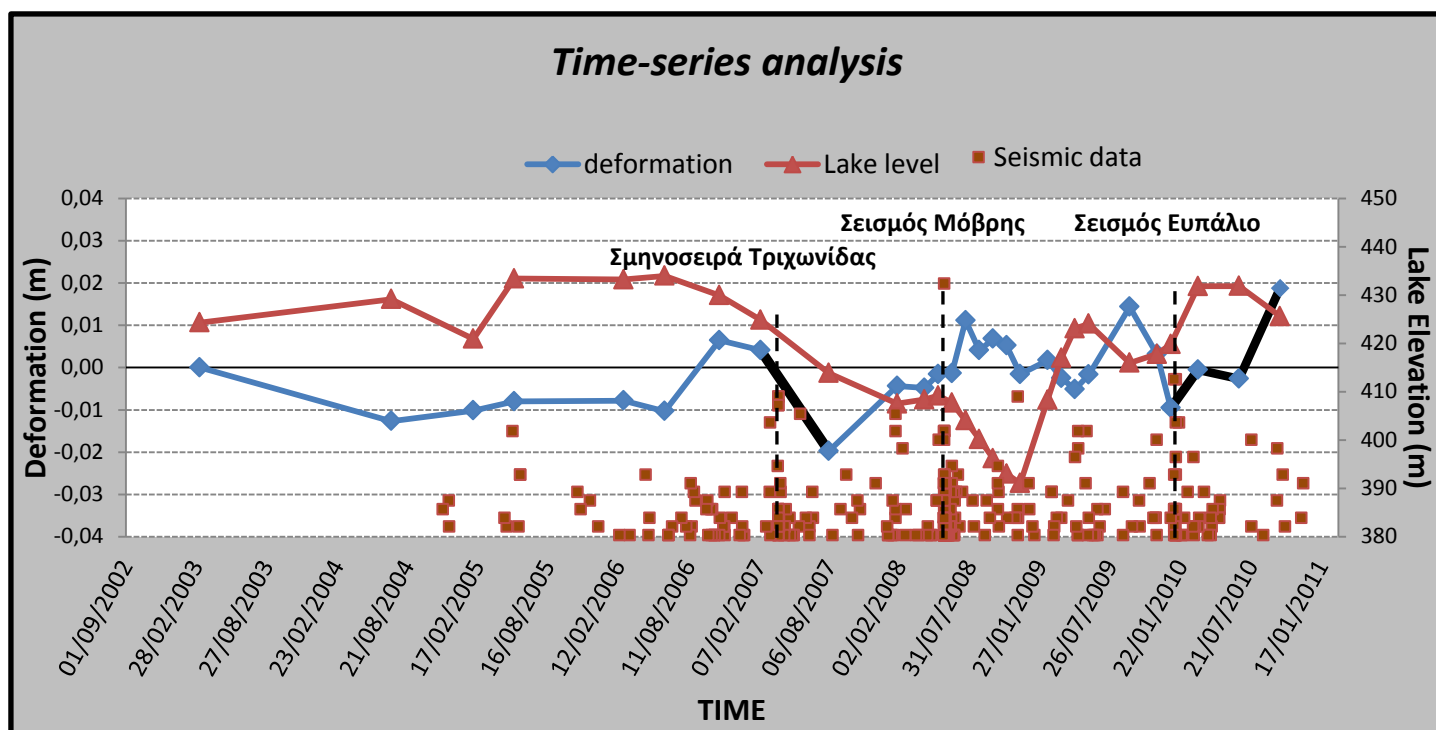
Σχήμα 16: Συσχέτιση των διαγραμμάτων της διαχρονικής παραμόρφωσης του φράγματος Μόρνου και της στάθμης της τεχνητής λίμνης για το χρονικό διάστημα 2003-2010.



Σχήμα 17: Συσχέτιση των διαγραμμάτων της διαχρονικής παραμόρφωσης του Αριστερού Βόρειου αντερείσματος και της στάθμης της τεχνητής λίμνης για το χρονικό διάστημα 2003-2010.



Σχήμα 18: Συσχέτιση των διαγραμμάτων της διαχρονικής παραμόρφωσης του φράγματος Μόρνου και της σεισμικής δραστηριότητας για το χρονικό διάστημα 2003-2010.



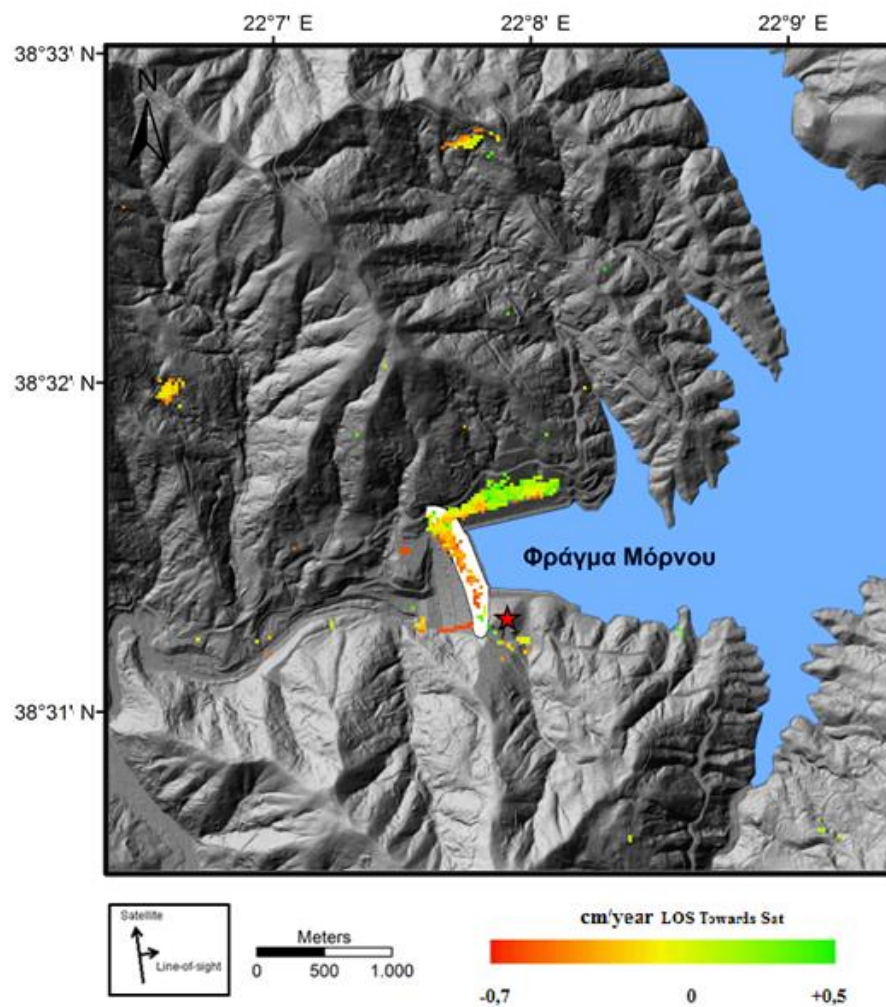
Σχήμα 19: Συσχέτιση των διαγραμμάτων της διαχρονικής παραμόρφωσης του φράγματος Μόρνου, της στάθμης της τεχνητής λίμνης και της σεισμικής δραστηριότητας για το χρονικό διάστημα 2003-2010.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε ότι ο ρυθμός της διαχρονικής παραμόρφωσης έχει άμεση σχέση με την στάθμη της τεχνητής λίμνης. Συγκεκριμένα τις χρονικές περιόδους όπου έχουμε αύξηση της στάθμης της λίμνης είτε λόγω των βροχοπτώσεων είτε λόγω των υδάτων που προέρχονται από το φράγμα του Εύηνου, έχουμε αντίστοιχα μία καθίζηση του φράγματος ενώ τις χρονικές περιόδους όπου παρουσιάζεται μία μείωση της στάθμης της λίμνης, παρουσιάζεται αντίστοιχα μία επαναφορά του φράγματος. Αξιοσημείωτο είναι όμως το χρονικό διάστημα από 11/02/2007 έως 05/08/2007 καθώς και από 22/12/2009 μέχρι 3/10/2010 όπου παρατηρούμε ότι ενώ θα αναμέναμε λόγω της μείωσης στάθμης της λίμνης, το φράγμα να παρουσιάζει μία άνοδο και αντίστοιχα λόγω της αύξησης της στάθμης το φράγμα να παρουσιάζει καθίζηση, αντιθέτως βλέπουμε το φράγμα αλλά και τα αντερείσματα να ακολουθούν τον ρυθμό της καμπύλης της στάθμης. Αυτό πιθανότατα μπορεί να οφείλεται στις ισχυρές σεισμικές δραστηριότητες που έλαβαν χώρα στις 10/04/2007 στην περιοχή της Τριγωνίδας ($M_w=5,2$) που απέχει περίπου 40Km και ο μηχανισμός του ρήγματος ήταν οριζόντιας ολίσθησης και στις 18/01/2010 ($M_w=5,3$) στη περιοχή του Ευπαλίου που απέχει περίπου 15Km και ο μηχανισμός του ρήγματος ήταν κανονικός αντίστοιχα και επηρέασαν τοπικά την συμπεριφορά του φράγματος.

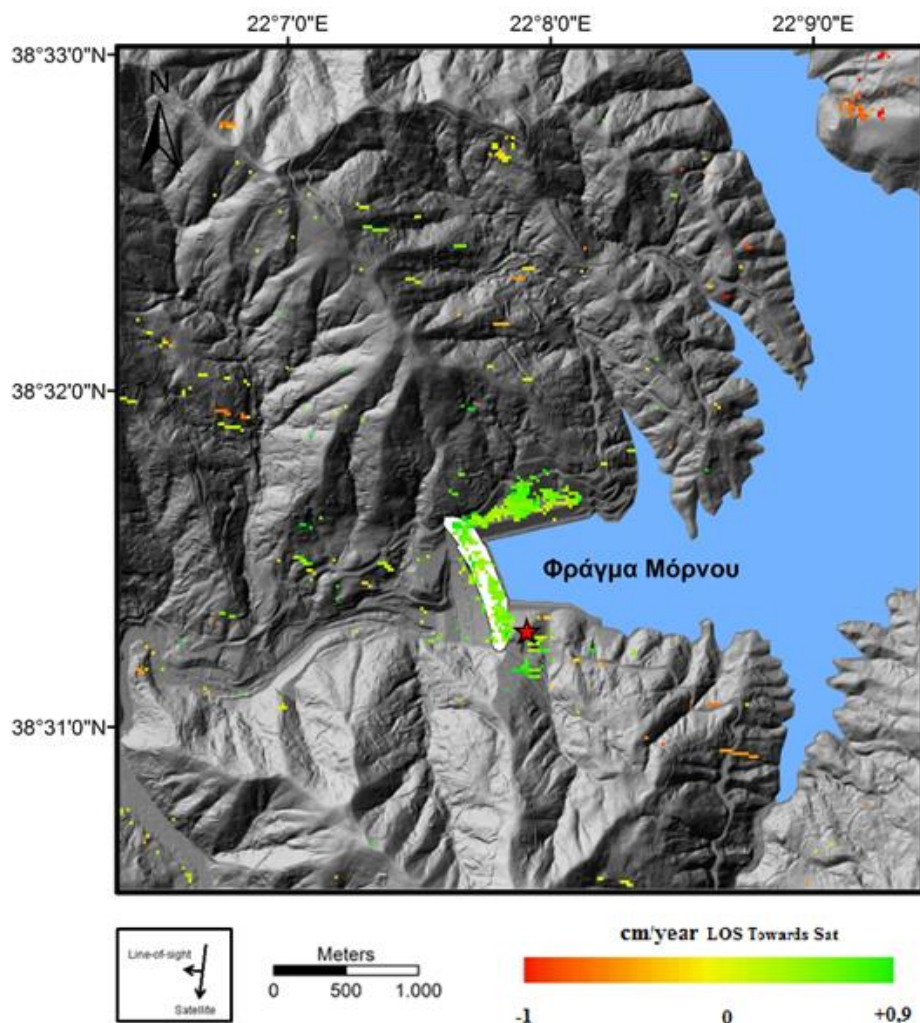
6.2 Ανάλυση σε τοπική κλίμακα (Local scale)

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων που έγιναν τοπικά στο φράγμα του Μόρνου για την χρονική περίοδο 2003-2010.

6.2.1 Διαχρονική εδαφική παραμόρφωση για την χρονική περίοδο 2003-2010



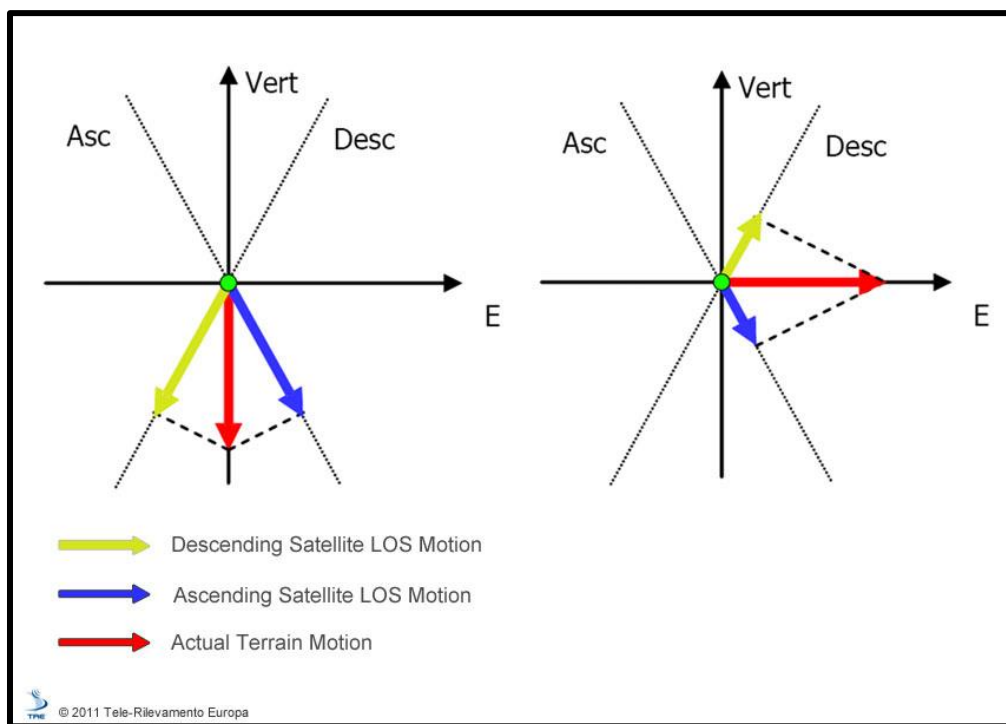
Εικόνα 45: Χάρτης διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης στην διεύθυνση του LOS (ανοδικής τροχιάς/ENVISAT) στο φράγμα του Μόρνου για το χρονικό διάστημα 2003-2010. Με κόκκινο αστέρι απεικονίζεται το επιλεγμένο σημείο αναφοράς.



Εικόνα 46: Χάρτης διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης στην διεύθυνση του LOS (καθοδικής τροχιάς/ENVISAT) στο φράγμα του Μόρνου για το χρονικό διάστημα 2003-2010. Με κόκκινο αστέρι απεικονίζεται το επιλεγμένο σημείο αναφοράς.

Θέλοντας να εστιάσουμε στην συμπεριφορά του φράγματος και στα πρανή, πραγματοποιήθηκε μία νέα επεξεργασία των ASAR δεδομένων για το χρονικό διάστημα 2003-2010. Λαμβάνοντας υπόψη στην συγκεκριμένη περίπτωση το σημείο αναφοράς, το οποίο χαρακτηρίζεται ως σταθερό βάση του πρώτου processing που έγινε προηγουμένως και επιλέχθηκε στα νότια του φράγματος, παρήχθησαν οι παραπάνω χάρτες διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης.

Παρατηρούμε ότι και σε αυτήν την επεξεργασία τα αποτελέσματα είναι σχεδόν ίδια με τα προηγούμενα που υπολογίστηκαν. Πιο συγκεκριμένα, στην επεξεργασία των δεδομένων ανοδικής τροχιάς (Εικόνα 45) παρατηρούμε ότι το φράγμα παρουσιάζει μία παραμόρφωση της τάξεως των -4mm/year ενώ στο Δεξιό Βόρειο αντέρεισμα αποτυπώνεται και πάλι η εναλλαγή της παραμόρφωσης. Αντίθετα στην επεξεργασία των δεδομένων καθοδικής τροχιάς (Εικόνα 46) παρατηρούμε ότι το φράγμα παρουσιάζει μία παραμόρφωση της τάξεως των $+4\text{mm/year}$ ενώ στο Δεξιό Βόρειο αντέρεισμα παρουσιάζει την ίδια εναλλαγή παραμόρφωσης αλλά με μικρότερο ρυθμό.



Εικόνα 47: Γραφικό σκαρίφημα του συνδυασμού των ανοδικών και καθοδικών τροχιών προκειμένου να αναλυθούν κινήσεις τεμαχών. (Πηγή: Tele-Rilevamento Europa, 2011)

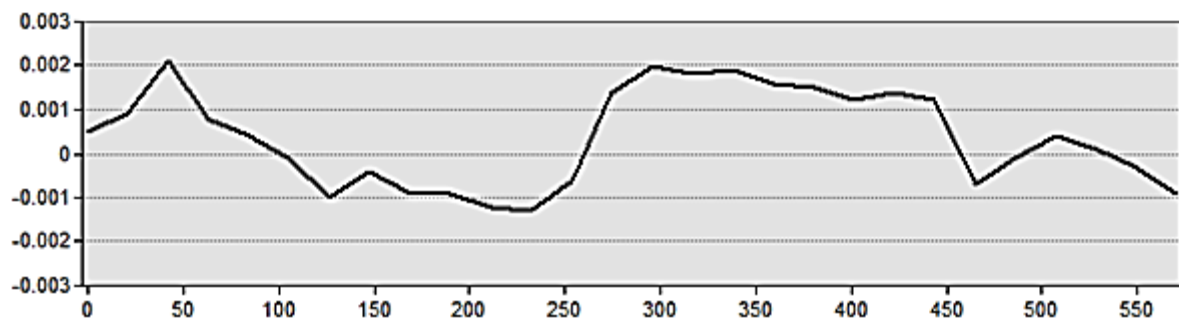
Εστιάζοντας στην συμπεριφορά του φράγματος και χρησιμοποιώντας το παραπάνω σκαρίφημα μπορούμε να πούμε ότι το φράγμα εκτός της παραμόρφωσης κατά την διεύθυνση της παρατήρησης του δορυφόρου (Line of sight, LOS) που παρουσιάζει, πιθανότητα παρουσιάζει και οριζόντιες κινήσεις και συγκεκριμένα αναλύοντας προηγουμένως τα αποτελέσματα της εδαφικής παραμόρφωσης είδαμε ότι κατά την ανοδική τροχιά το φράγμα

παρουσιάζει μία καθίζηση δηλαδή απομακρύνεται από τον δορυφόρο ενώ κατά την καθοδική τροχιά το φράγμα παρουσιάζει μια άνοδο δηλαδή πλησιάζει προς τον δορυφόρο. Επομένως βλέποντας το παραπάνω σκαρίφημα υποθέτουμε ότι το φράγμα πιθανότητα να παρουσιάζει και οριζόντιες μετακινήσεις προς τα ανατολικά. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από την αναφορά (Gikas et all, 2005) η οποία δείχνει μία οριζόντια μετακίνηση του φράγματος.

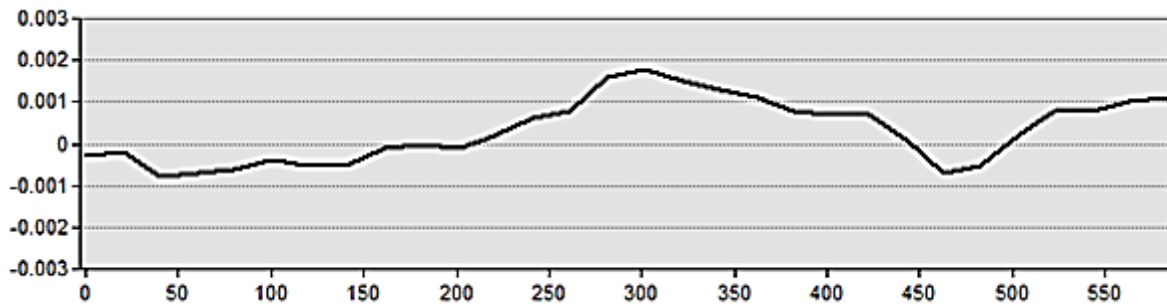
Εστιάζοντας αντίστοιχα στο Δεξιό Βόρειο αντέρεισμα παρατηρούμε ότι και στις δυο τροχιές (ανοδική και καθοδική) η παραμόρφωση παρουσιάζει το ίδιο μοτίβο. Έτσι παρατηρώντας το παραπάνω σκαρίφημα και αναλύοντας τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι υπάρχουν σημεία όπου έχουμε καθιζήσεις δηλαδή τα σημεία αυτά απομακρύνονται από τον δορυφόρο και στην ανοδική τροχιά αλλά και στην καθοδική τροχιά επομένως τα σημεία αυτά πιθανότατα να παρουσιάζουν κατακόρυφες κινήσεις. Άρα στο Δεξιό Βόρειο αντέρεισμα σε σημεία όπου η παραμόρφωση είναι η ίδια και στις δύο τροχιές τότε πιθανότατα να παρουσιάζουν κάποια φαινόμενα ερπυσμού. Στα παρακάτω σχήματα παρατηρούμε τα προφίλ παραμόρφωσης του Βόρειου αντερείσματος, τα οποία δείχνουν την εναλλαγή του ρυθμού παραμόρφωσης.



Εικόνα 48: Τομή πάνω στο Βόρειο αντέρεισμα κατά μήκος της οποίας απεικονίζεται το προφίλ παραμόρφωσης



Σχήμα 20: Προφίλ παραμόρφωσης κατά μήκος του Δεξιού Βόρειου Αντερείσματος (επεξεργασία ανοδικής τροχιάς)



Σχήμα 21: Προφίλ παραμόρφωσης κατά μήκος του Δεξιού Βόρειου Αντερείσματος (επεξεργασία καθοδικής τροχιάς)

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα

Η συμβολή της τεχνικής της Διαφορικής Συμβολομετρίας Ραντάρ (DInSAR) και ιδιαίτερα η εφαρμογή της σόρευσης συμβολογραμάτων και του αλγορίθμου SVD αποδείχθηκε πολύτιμη στην διερεύνηση του ρυθμού επιφανειακής παραμόρφωσης της περιοχής μελέτης όσο και της διαχρονικής παραμόρφωσης του Φράγματος Μόρνου. Τα συμπεράσματα τα οποία μπορούν να εξαχθούν είναι:

- ✚ Όσον αφορά την ευρύτερη περιοχή του φράγματος, οι προκείμενες επιφανειακές παραμορφώσεις είναι πιθανόν να οφείλονται στο γεωμορφολογικό και τεκτονικό υπόβαθρο της περιοχής, στην μεταβολή της στάθμης της τεχνητής λίμνης του ταμιευτήρα καθώς επίσης και στα σεισμικά γεγονότα που εκδηλώθηκαν στον ευρύτερο χώρο.
- ✚ Όσον αφορά την παραμόρφωση που υφίσταται το φράγμα αλλά και τα αντερείσματα, αποδείχθηκε αναλύοντας τα διαγράμματα της διαχρονικής παραμόρφωσης ότι οι μεταβολές της στάθμης της λίμνης κυρίως επηρεάζουν την συμπεριφορά του φράγματος αλλά και των αντερεισμάτων καθώς επίσης και συγκεκριμένα σεισμικά γεγονότα επηρέασαν τοπικά την συμπεριφορά του φράγματος. Πιο συγκεκριμένα, τις περιόδους όπου υπήρξε άνοδος της στάθμης της λίμνης, το φράγμα και τα πρανή παρουσίαζαν μία καθοδική παραμόρφωση (απομάκρυνση από τον δορυφόρο) ενώ τις περιόδους όπου η στάθμη της λίμνης παρουσίαζε μείωση, το φράγμα και τα πρανή παρουσίαζαν μία ανοδική παραμόρφωση (προς τον δορυφόρο).
- ✚ Όμως σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους όπου θα αναμέναμε να ισχύει η παραπάνω παρατήρηση, αντιθέτως παρατηρήθηκε ότι η συμπεριφορά του φράγματος αλλά και των αντερεισμάτων ακολουθούσαν το ρυθμό μεταβολής της στάθμης της λίμνης δηλαδή την περίοδο όπου υπήρξε μείωση της στάθμης, αντίστοιχα υπήρξε μία καθοδική παραμόρφωση στο φράγμα, ενώ όταν η στάθμη της λίμνης αυξανόταν αντίστοιχα, υπήρξε μία ανοδική παραμόρφωση στο φράγμα. Προβάλλοντας τα σεισμικά γεγονότα της ευρύτερης περιοχής, παρατηρήθηκε ότι τις συγκεκριμένες χρονικές περιόδους είχαν εκδηλωθεί ισχυρά σεισμικά γεγονότα (σεισμός Αιγίου, σμηνοσειρά Τριχωνίδας, Ευπαλίου) τα οποία πιθανός να επηρέασαν τοπικά την συμπεριφορά του φράγματος ενώ άλλα σεισμικά γεγονότα όπως της

Μόβρης, Γαλαξιδίου, Αμφίκλειας δεν φάνηκε να επηρεάσαν την συμπεριφορά του φράγματος .

- ✚ Η μέγιστη διακύμανση της παραμόρφωση που υφίσταται το φράγμα για την χρονική περίοδο 1995-2000 είναι της τάξεως των 7cm ενώ για το χρονικό διάστημα 2003-2010 είναι της τάξεως των 4cm.
- ✚ Εστιάζοντας στην συμπεριφορά του φράγματος παρατηρήθηκε ότι συνδυάζοντας τα δεδομένα ανοδικής και καθοδικής τροχιάς και αναλύοντάς τα στο καρτεσιανό σύστημα ,εκτός από την παραμόρφωση κατά την διεύθυνση παρατήρησης του δορυφόρου (LOS), πιθανός να υπάρχουν και οριζόντιες παραμορφώσεις κυρίως προς τα Ανατολικά.

Τέλος, άξια αναφοράς είναι η μελλοντική ερευνητική μελέτη για την περιοχή μελέτης. Εναλλακτικές τεχνικές Διαφορικής Συμβολομετρίας, όπως η τεχνική των Σταθερών Σκεδαστών (Permanent Scatters Interferometry – PS) ή SBAS, της Συμβολομετρίας με εικόνες υψηλής ευκρίνειας π.χ COSMO-SkyMed, TerraSAR-X καθώς επίσης και η εφαρμογή Γεωδαιτικών μετρήσεων GPS μπορούν να εφαρμοστούν προκειμένου να επαληθεύουν τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης και να βοηθήσουν στην ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

Βαλκανιώτης Σ., (2009): Συσχέτιση Νεοτεκτονικών Δομών και Σεισμικότητας στην ευρύτερη περιοχή του Κορινθιακού κόλπου, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης/ Τμήμα Γεωλογίας, Θεσσαλονίκη.

Ζαμπετάκη-Λέκκα Α., (2011): Κεφάλαια Στρωματογραφίας, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Καρτάλης, Κ. και Χ. Φειδάς, (2006): Αρχές & εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, Β. Γκιουρδас Εκδοτική, Αθήνα.

Κουρκούλη, Π., (2010): Παρατήρηση της εδαφικής παραμόρφωσης του δέλτα του Μόρνου με τη χρήση της συμβολομετρίας των σταθερών ανακλαστήρων, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μεταπτυχιακή εργασία.

Μέρτικας Στ., (1999): Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας, Παρίκου Σ. & ΣΙΑ ΟΕ, Αθήνα.

Μουντράκης, Δ., (1985): Γεωλογία της Ελλάδας. University studio press, Θεσσαλονίκη, 207 σ.

Φουμέλης Μ., (2009): Μελέτη επιφανειακής παραμόρφωσης ευρύτερης περιοχής Αθηνών βάσει διαφορικών μετρήσεων GPS και Συμβολομετρίας Ραντάρ, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών/ Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος/ Τομέας Γεωφυσικής και Γεωθερμίας, Αθήνα.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Amelung F., Galloway D.L., Bell J.W., Zebker H.A. & Lacznia R.J. (1999). Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*, 27, 483–486.

Avallone, A., Zollo, A., Briole, P., Delacourt, C., Beauducel, F., (1999). Subsidence of Campi Flegrei (Italy) detected by SAR interferometry. *Geophysical Research Letters* 26 (15), art. no. 1999GL900497, pp. 2303-2306.

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40 (11), pp. 2375–2383.

Briole, P., Armijo, R., Avallone, A., Bernard, P., Charara, R., Deschamps, A., Dimitrov, D., Elias, P., Grandin, R., Ilieva, M., Lambotte, S., Lyon-Caen, H., Meyer, B., Mouratidis, A., Nercessian, A., Papanastassiou, D., Ruegg, J.C., Sokos, E., Sykioti, O. (2008). Multidisciplinary study of the June 8, 2008, Mw=6.4 Andravida earthquake. European Seismological Commission ESC 2008. Hersonissos, Crete, Greece. 7 - 12 September 2008.

Briole, P., De Natale, G., Gaulon, R., Pingue F., Scarpa, R. (1986). Inversion of geodetic data and seismicity associated with the Friuli earthquake sequence (1976-1977). *Annales Geophysicae*, 4, pp. 481-492.

Briole, P., Rigo, A., Lyon-Caen, H., Ruegg, J., Papazissi, K., Mitsakaki, K., et al. (2000). Active deformation of the Corinth rift, Greece: Results from repeated Global Positioning System surveys between 1990 and 1995. *J. Geophys. Res.* 2000, 105, pp. 25605–25625.

Colesanti, C., Ferretti, A., Prati C., Rocca, F. (2003). Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology* 68 (2003), pp. 3–14.

Colesanti, C. and Wasowski, J. (2006). Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology* 88 (2006) pp. 173-199.

Crosetto, M., Agudo, M., Monserrat, O., Pucci, B., (2008). Inter-comparison of persistent scatterer interferometry results. European Space Agency, (Special Publication) ESA SP (649 SP).

Elias, P., Briole, P., Sykioti, O. (2008) PALSAR/ALOS interferometry in the Gulf of Corinth and Patras (Greece). Comparison with ERS and ASAR/ENVISAT results and GPS measurements, ALOS 2008 PI Symposium, Rhodes, Greece, November 3 - 7, 2008.

Elias, P., Kontoes, C., Papoutsis, I., Kotsis, I., Sakellariou, D., Marinou, A. and Paradissis D. (2009). Permanent Scatterer InSAR analysis and validation in the Gulf of Corinth. *Sensors*, vol. 9(1), pp. 46-55.

Elias, P. (2013). Ground deformation observed in the western Corinth rift (Greece) by means of SAR interferometry, Phd dissertation, Ecole Normale Supérieure, France and University of Patras, Greece.

Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. and Monti Guarnieri, A., (1997). Multibaseline SAR interferometry for automatic DEM reconstruction. 3rd ERS Workshop, Florence, Italy.

Ferretti, C. Prati, F. Rocca, (2000). Non-linear subsidence rate estimation using permanent scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE TGARS*, Vol. 38, no. 5.

GAMMA Remote Sensing. Urs Wegmóller, Charles Werner, Tazio Strozzi, Andreas Wiesmann, Maurizio Santoro. Worbstrasse 225, CH-3073 Gómigen, Switzerland.

Gikas V., Paradissis D., Raptakis K., Antonatou O., (2005), Deformation Studies of the Mornos Artificial Lake via Analysis of Geodetic Data, Greece.

Goldstein R. & Zebker H. (1987). Interferometric radar measurement of ocean surface current. *Nature*, 328(6132), 707-709.

Goldstein R., Zebker H. & Werner C. (1988). Satellite Radar Interferometry: Two-Dimensional Phase Unwrapping. *Radio Science*, 23(4).

Hanssen R. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, Kluwer Academic Press, Dordrecht. The Netherlands, 298pp.

Massonnet, D., Briole, P., Arnaud, A. (1995). Deflation of Mount Etna monitored by Spaceborne Radar Interferometry. *Nature* 375, pp. 567–570.

Massonnet, D., Feigl, K.L. (1998). Radar Interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Review of Geophysics* 36, pp. 441–500.

Luzi G. (2010). *Ground based SAR Interferometry: a novel tool for Geoscience*, University of Florence, Italy

Parcharidis, I., Foumelis, M., Kourkouli, P., Wegmuller, U., 2009. Persistent Scatterers InSAR to detect ground deformation over Rio-Antirio area (Western Greece) for the period 1992-2000. *Journal of Applied Geophysics* 68 (3), pp. 348-355.

Rosen, P. A., Hensley, S., Zebker, H.A., Webb, F.H., Fielding, E.J. (1996). Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii from SIR-C radar interferometry. *J. Geophys. Res.*, 101, 23, pp. 109-123,125.

Rosen, P.A., Henley, S., Peltzer, G., Simons, M. (2004). Updated repeat orbit interferometry package released. *EOS, Trans. Am. geophys. Un.*, 85(5), 47.

Sokos, E., Zahradnik, J., Kiratzi, A., Jansky, J., Gallovic, F., Novotny, O., Kostelecky, J., Serpetsidaki, A., Tselentis, G.-A., (2012). The January 2010 Efpalio earthquake sequence in the western Corinth Gulf (Greece). *Tectonophysics* 530-531, pp. 299–309.

Sykioti, O., Kontoes, C., Elias, P., Sachpazi, M., Paradissis, D. and Kotsis, I., (2003). Ground deformation at Nisyros volcano (Greece), detected by ERS2 SAR differential interferometry. *International Journal of Remote Sensing*, 24(1), pp. 183-188.

Usai, S. (2002). A least-squares approach for long-term monitoring of deformations with differential SAR interferometry. *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2002)*, Toronto (Canada), 24–28 June 2002, vol. 2, pp. 1247–1250.

Van der Kooij, M., Hughes, W., Sato, S., Poncos, V. (2006). Coherent target monitoring at high spatial density: Examples of validation results. *Eur. Space Agency Spec. Publ.*, SP- 610.

Van der Kooij, M. (1999). Engineering geology landslide investigations and SAR Interferometry. Proceedings of FRINGE'99, Liege, Belgium

Wiley, C. A., 1985. Synthetic Aperture Radars: A Paradigm for Technology Evolution. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, v. AES-21, n. 3, pp 440-443.

Zebker, H., Rosen P., Goldstein R., Gabriel A., Werner, C., (1994). On the derivation of coseismic displacement fields using Differential Radar Interferometry: the Landers earthquake. Journal of Geophysical Research 99 (B10), pp. 19617–19634.

Zebker, H., Goldstein, R. (1986). Topographic mapping from interferometer synthetic aperture radar observations. Journal of Geophysical Research v91 issue B5, pp. 4993– 4999.

Διαδικτυακή Βιβλιογραφία

European-Mediterranean Seismological Center: <http://www.emsc-csem.org>

UC Santa Barbara *Geography*: <http://www.geog.ucsb.edu/>

Radar *Altimetry* Tutorial: <http://www.altimetry.info/>

European Space Agency – ESA: <http://www.earth.esa.int>

National Center for Scientific Research: <https://gpscope.gt.insu.cnrs.fr>

Tele-Rilevamento Europa: <http://treuropa.com>