🇊 ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Τμήμα Γεωγραφίας

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

Έφαρμοσμένη Γεωγραφία και Διαχείριση του Χώρου' Κατεύθυνση Γεωπληροφορική

# ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ ΡΑΤΝΤΑΡ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΤΡΙΧΩΝΙΔΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ (2003-2010)

Διπλωματική εργασία του Γεωργίου Μπενέκου

Αθήνα, Ιούλιος 2012

## ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

## Τμήμα Γεωγραφίας

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

Έφαρμοσμένη Γεωγραφία και Διαχείριση του Χώρου' Κατεύθυνση Γεωπληροφορική

# ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ ΡΑΤΝΤΑΡ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΤΡΙΧΩΝΙΔΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ (2003-2010)

Διπλωματική εργασία του Γεωργίου Μπενέκου

Επιβλέπων: Παρχαρίδης Ισαάκ

Αθήνα, Ιούλιος 2012

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	8
ABSTRACT	9
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΕΝΕΡΓΑ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ	10
1.1 Βασικές Αρχές της Μικροκυματικής ακτινοβολίας στα ενεργά Δορυφορικά Συστήματα	10
1.2 Τι Είναι τα Ενεργά Δορυφορικά Συστήματα;	11
1.3 Τα Δορυφορικά Συστήματα RADAR	
2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ RADAR	
2.1 Γεωμετρία εικονοληψίας του συστήματος RADAR	
2.2 Χωρική Ανάλυση του συστήματος Radar	19
2.3 Επανασκέδαση σήματος Radar	21
2.4 Παραμορφώσεις εικόνων Radar	22
3. ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ RADAR	24
3.1 Γεωμετρία Συμβολομετρίας	25
3.2 Περιγραφή των Βασικών Αρχών της Συμβολομετρίας	26
3.2.1 Συμβολομετρική Φάση και Συμβολογράφημα	26
3.2.2 Εξομάλυνση του Συμβολογράφηματος	
3.2.3 Συμβολομετρική Συνοχή	29
3.2.4 Πηγές Αποσυσχέτισης Συμβολομετρικής Φάσης	
3.3 Από το Συμβολογράφημα στην Τοπογραφική πληροφορία	
3.4 Διαφορική Συμβολομετρία	
3.4.1 Περιγραφή Λειτουργίας της Διαφορικής Συμβολομετρίας	
3.4.2 Τεχνικές Διαφορικής Συμβολομετρίας	
3.4.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση - Εφαρμογές Διαφορικής Συμβολομετρίας	
4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	41
4.1 Ανθρωπογεωγραφία	41
4.2 Γεωμορφολογία	
4.3 Γεωλογία – Τεκτονισμός	
4.4 Γεωδυναμικός Χαρακτήρας της Περιοχής	45
4.5 Σεισμικότητα	
4.5.1 Η Σμεινοσηρά σεισμών (earthquake swarm) τον Απρίλιο του 2007	
4.6 Βιβλιογραφική-Μελετιτική Ανασκόπηση Περιοχής Μελέτης	

5. ΔΕΔΟΜΕΝΑ	53
6. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	56
6.1 Μεθοδολογία Επεξεργασίας & Ανάλυσης Διαφορικής Συμβολομετρίας	57
6.1.1 Μετατροπή των Raw Data (Τροχιακών Δεδομένων) σε SLC	57
6.1.2 Διακρίβωση Τροχιάς Δεδομένων	58
6.1.3 Συμπροσαρμογή (CO-REGISTRATION)	59
6.1.4 Υπολογισμός της βασικής συμβολομετρικής γραμμής	60
6.1.5 Παραγωγή Απλού Συμβολογραφήματος	62
6.1.6 Παραγωγή Διαφορικού Συμβολογραφήματος	63
6.1.7 Εφαρμογή Φίλτρου Διαφορικού Συμβολογραφήματος	64
6.1.8 Εκτύλιξη Συμβολομετρικής Φάσης (Phase Unwrapping)	64
6.1.9 Επαναπροσδιορισμός της βασικής συμβολομετρικής γραμμής	66
6.1.10 Μετατροπή της Συμβολομετρικής Φάσης σε Μήκος	66
6.1.11 Γεωκωδικοποίηση	67
6.2 Μεθοδολογία Σώρευση Διαφορικών Συμβολογραφημάτων (Stacking)	67
6.2.1 Προσδιορισμός Επιφανειακής Παραμόρφωσης Πριν το Σεισμικό Γεγονός της Σμηνοσειράς του Απριλίου 2007 [Χρονική Περίοδος: 2003/10/14 – 2006/10/03]	70
6.2.2 Προσδιορισμός Επιφανειακής Παραμόρφωσης Μετά το Σεισμικό Γεγονός της Σμηνοσειράς του Απριλίου 2007 [Χρονική Περίοδος: 2008/03/11 – 2010/02/09]	71
6.3 Μεθοδολογία Γραμμικού Συνδυασμού Συμβολογραφημάτων (Linear Combination)	72
7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	74
7.1 Διαχρονική Επιφανειακή Παραμόρφωση Πριν το Σεισμικό Γεγονός της Σμηνοσειράς του Απριλίου του 2007 [Χρονική Περίοδος: 14/10/2003 – 03/10/2006]	75
7.2 Διαχρονική Επιφανειακή Παραμόρφωση Μετά το Σεισμικό Γεγονός της Σμηνοσειράς του Απριλίου του 2007 [Χρονική Περίοδος: 11/03/2008 – 09/02/2010]	79
7.3 Ανάλυση Γραμμικού Συνδυασμού Συμβολογραφημάτων (Linear Combination) [i)16-01-2007/15- 04-2008 ii) 15-04-2008 /02-09-2008 iii) 11-11-2008/24-01-2009]	82
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	88
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	90

## Πίνακας Περιεχομένων Εικόνων

Εικόνα 1. Αναπαράσταση Λειτουργίας Παθητικών (δεξιά) και Ενεργητικών (αριστερά) Δορυφορικών	
Συστημάτων	10
Εικόνα 2 Το Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα	11
Εικόνα 3. Η Όψη και τα όργανα καταγραφής με τα οποία είναι εξοπλισμένος ο δορυφόρος ENVISAT	14
Εικόνα 4 Γεωμετρία εικονοληπτικού συστήματος SAR	19
Εικόνα 5 Χωρική ανάλυση εικονοληπτικού συστήματος SAR. (Δεξία - range or across-track resolution)	
και (Αριστερά- azimuth or along-track resolution)	20
Εικόνα 7 Επανασκέδαση σήματος Radar με διάφορες γεωμετρίες της επιφάνειας της Γής και η απόδοση	
τους ως εικόνα Radar	21
Εικόνα 6 Γεωμετρία τεχνολογίας SAR (Synthetic Aperture Radar)	21
Εικόνα 8 Γεωμετρία ενός συμβολομετρικού συστήματος SAR (Τροποποιημένο Fletcher,2007)	25
Εικόνα 9 Αναπαράσταση Διαδικασίας Συμβολομετρικής Φάσης (Τροποποιημένο Fletcher,2007)	27
Εικόνα 10 Αριστερά: ένα συμβολογράφημα ERS ενός μέρους των ιταλικών Άλπεων και Δεξιά: το	
interferogram flattering - οι ασυνέχειες φάσης μοιάζουν με τις ισοϋψείς καμπύλες -	
(Fletcher,2007 PartA)	28
Εικόνα 11 Γεωμετρία Διαφορικής Συμβολομετρίας (Crosetto et al., 2005)	33
Εικόνα 12 Χάρτης Χρήσεις Γής Περιοχής Μελέτης Τριχωνίδας	42
Εικόνα 13 Γεωμορφολογικός Χάρτης Περιοχής Μελέτης Τριχωνίδας	43
Εικόνα 14 Γεωλογικός και Τεκτονικός Χάρτης Περιοχής Μελέτης Τριχωνίδας	45
Εικόνα 15 Γεωδυναμικός χαρακτήρας της περιοχής μελέτης. Μετρήσεις GPS/ Σταθμοί PRSL και ΙΟΟΟ/	
Πηγή Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών	47
Εικόνα 16 Χάρτης Απεικόνιση Σμηνοσειράς του Απριλίου του 2007 καθώς και αποτύπωση του σεισμικού	
φαινομένου της 31 Δεκεμβρίου του 1975 (Kiratzi et al., 2008)	51
Εικόνα 17 Μέση εικόνα multi-look (1x5) της περιοχής μελέτης του δορυφόρου ENVISAT	54
Εικόνα 18 Στάδια Επεξεργασίας – Μεθοδολογίας Διαφορικής Συμβολομετρίας Radar	56
Εικόνα 19 Διαδικασία συμπροσαρμογής των εικόνων	60
Εικόνα 20 Μέσος Όρος Επιπέδων Συνοχής των Συμβολογραφημάτων	63
Εικόνα 21 Χάρτης Υπο-περιοχών μελέτης (sub-AOI). Βόριο Τμήμα της Λίμνης – Πορτοκαλί / Νότιο Τμήμα	
της Λίμνης – Πράσινο / Νοτιοανατολικό Τμήμα της Λίμνης «το οποίο εξετάζετε ξεχωριστά λόγο	
των δύο ρηγμάτων» – Μπλε	74
Εικόνα 22 Χάρτης Διαχρονικής Συνιστώσας Επιφανειακών Παραμορφώσεων στην Διεύθυνση LOS, για	
την περίοδο 2003/10/14 – 2006/10/03, βάσει Σώρευσης Διαφορικών Συμβολογραφημάτων	
εγκάρσιου ανύσματος βάσης <150μ. Δίνετε η θέση του Επιλεγμένου Σημείου Αναφοράς	
(κόκκινο αστέρι)	76
Εικόνα 23 Χάρτης Διαχρονικής Συνιστώσας Επιφανειακών Παραμορφώσεων στην Διεύθυνση LOS, για	
την περίοδο 2008/03/11 – 2010/02/09, βάσει Σώρευσης Διαφορικών Συμβολογραφημάτων	
εγκάρσιου ανύσματος βάσης <150μ. Δίνετε η θέση του Επιλεγμένου Σημείου Αναφοράς	
(κόκκινο αστέρι)	79
Εικόνα 24 Χάρτης Διαχρονικής Συνιστώσας Επιφανειακών Παραμορφώσεων στην Διεύθυνση LOS, με τον	
γραμμικό συνδυασμό των Συμβολογραφημάτων i)2007-01-16/2008-04-15 ii)2008-04-15/2008-	
09-02 iii)2008-11-11/2009-01-24, με εγκάρσιου ανύσματος βάσης <150μ. Δίνετε η θέση του	
Επιλεγμένου Σημείου Αναφοράς (κόκκινο αστέρι)	83
Εικόνα 25 Χάρτης Συνολικής Αναπαράστασης Αποτελεσμάτων (preseismic, coseismic και postseismic) με	
Αναλογικό Συμβολισμό Παραμόρφωσης ± 5mm/yrs (βέλη)	87

## Πίνακας Περιεχομένων Πινάκων

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά Δορυφόρου ERS	13
Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά ENVISAT	14
Πίνακας 3 Χρονικές περίοδοι λειτουργίας των δορυφορικών συστημάτων SAR και τεχνικά	
χαρακτηριστικά τους (Stevens & Wadge, 2004)	17
Πίνακας 4 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση - Εφαρμογές Διαφορικής Συμβολομετρίας	39
Πίνακας 5 Δεδομένα GPS	46
Πίνακας 6 Καταγραφή σεισμικών φαινομένων της σμηνοσειράς του Απριλίου του 2007 (Kiratzi et al.,	
2008)	50
Πίνακας 7 Δεδομένα του δορυφόρου ENVISAT	54
Πίνακας 8 Πηγές και Τοπολογία Δεδομένων	55
Πίνακας 9 Συνδυασμός Ζευγών Συμβολοφραφημάτων με βασική συμβολομετρική γραμμή μικρότερη	
των 150μ	62
Πίνακας 10 Χαρακτηριστικά Επιλεγμένων Προσεισμικών Διαφορικών Συμβολογραφημάτων	
(Διαγραμμένα αυτά που παρουσίασαν υπολειμματική φάση και θόρυβο)	71
Πίνακας 11 Χαρακτηριστικά Επιλεγμένων Μετασεισμικών Διαφορικών Συμβολογραφημάτων	
(Διαγραμμένα αυτά που παρουσίασαν υπολειμματική φάση και θόρυβο)	72
Πίνακας 12 Επιλεγμένα Συμβολογραφήματα Γραμμικού Συνδυασμού Συνσεισμικής Περιόδου	73
Πίνακας 13 Βασικά Στατιστικά Επιφανειακών Παραμορφώσεων Διεύθυνση LOS για τους Οικισμούς της	
Περιοχής Μελέτης , την περίοδο 2003/10/14 – 2006/10/03	77
Πίνακας 14 Βασικά Στατιστικά Επιφανειακών Παραμορφώσεων Διεύθυνση LOS για τους Οικισμούς της	
Περιοχής Μελέτης , την περίοδο 2008/03/11 – 2010/02/09	81
Πίνακας 15 Βασικά Στατιστικά Επιφανειακών Παραμορφώσεων Διεύθυνση LOS για τους Οικισμούς της	
Περιοχής Μελέτης ψεύδο-συμβολογραφήματος	84

## Πίνακας Περιεχομένων Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Μέσος Όρος Επιφανειακών Παραμορφώσεων Διεύθυνση LOS για τους Οικισμούς της	
Περιοχής Μελέτης, την περίοδο 2003/10/14 – 2006/10/03. Βόριο Τμήμα της Λίμνης –	
Πορτοκαλί / Νότιο Τμήμα της Λίμνης – Πράσινο / Νοτιοανατολικό Τμήμα της Λίμνης «το	
οποίο εξετάζετε ξεχωριστά λόγο των δύο ρηγμάτων» – Μπλε	. 78
Διάγραμμα 2 Μέσος Όρος Επιφανειακών Παραμορφώσεων Διεύθυνση LOS για τους Οικισμούς της	
Περιοχής Μελέτης, την περίοδο 2008/03/11 – 2010/02/09. Βόριο Τμήμα της Λίμνης –	
Πορτοκαλί / Νότιο Τμήμα της Λίμνης – Πράσινο / Νοτιοανατολικό Τμήμα της Λίμνης «το	
οποίο εξετάζετε ξεχωριστά λόγο των δύο ρηγμάτων» – Μπλε	. 81
Διάγραμμα 3 Μέγιστες και Ελάχιστες Τιμές Ρυθμών Παραμόρφωσης Οικισμών Πριν και Μετά την	
Σμηνοσειρά του Απριλίου του 2007	. 82
Διάγραμμα 4 Μέσος Όρος Επιφανειακών Παραμορφώσεων Διεύθυνση LOS ψεύδο-	
συμβολογραφήματος για τους Οικισμούς της Περιοχής Μελέτης . Βόριο Τμήμα της Λίμνης –	
Πορτοκαλί / Νότιο Τμήμα της Λίμνης – Πράσινο / Νοτιοανατολικό Τμήμα της Λίμνης «το	
οποίο εξετάζετε ξεχωριστά λόγο των δύο ρηγμάτων» – Μπλε	. 85

#### ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στην εκπόνηση μελέτης η οποία βασίζεται στην τεχνική της διαφορικής συμβολομετρίας της σώρευσης (stacking). Η συγκεκριμένη τεχνική παρουσιάζει ραγδαία ανάπτυξη την τελευταία εικοσαετία και καλύπτει ένα αρκετά ευρύ φάσμα εφαρμογών της Τηλεπισκόπησης. Για την επιλογή του συγκεκριμένου θέματος, καθώς επίσης και στην εκπόνηση της εργασίας, βοήθησε σημαντικά ο επιβλέπον καθηγητής μου κ. Ισαάκ Παρχαρίδης ο οποίος με την συνεχή υποστήριξη του αποτέλεσε ακρογωνιαίο λίθο της μελέτης. Τον οποίο και ευχαριστώ καθώς ήταν εκείνος που με παρότρυνε να ασχοληθώ με την συγκεκριμένη τεχνική. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κ<sup>ο</sup> Μιχάλη Φουμέλη και την Κ<sup>α</sup> Πηνελόπη Κουρκούλη για την σημαντική βοήθεια πάνω στα θέματα της συμβολομετρίας καθώς και για την παροχή σημαντικού ερευνητικού και τεχνικού συμβολομετρικού υλικού τους. Καθώς και τον συνάδελφο μου - Γεωγράφο, Βύρωνα Στεργιόπουλο που μου κατέδειξε τα βήματα της μεθοδολογίας αυτής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος για την διάθεση των εικόνων Ραντάρ καθώς και τον Κύριο Αθανάσιο Γκανά (Διευθυντή Ερευνών, στο Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών) για την παροχή των δεδομένων (gps).

<sup>..</sup>Το παρόν κείμενο και την προσπάθεια μου την αφιερώνω στην οικογένεια μου, τον πατέρα μου Ηλία την μητέρα μου Αδαμαντία καθώς και στα δύο μου αδέρφια Νίκο και Πάρη...

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η απεικόνιση των παραμορφώσεων του εδάφους για την ευρύτερη περιοχή της λίμνης Τριχωνίδας (Δυτική Ελλάδα). Το έναυσμα για την εφαρμογή της μελέτης αποτέλεσε η ακολουθία των σεισμών, που ονομάζεται σμηνοσειρά (earthquake swarm) στη νότιο-ανατολική πλευρά της λίμνης Τριχωνίδας, τον Απρίλιο του 2007. Η περιοχή αυτή, σχηματίζει μία pull-apart λεκάνη, η οποία παρουσιάζει μία έντονη σεισμική δραστηριότητα λόγο των δύο ενεργών ρηγμάτων κατά μήκος της βόρειας και νότιας όχθης της λίμνης. Η «σμηνοσειρά» ξεκίνησε από μικρά σεισμικά γεγονότα, στις 9 Απριλίου 2007 ενώ ακολούθησαν τρία ισχυρότερα σεισμικά γεγονότα στις 10 Απριλίου 2007, με μεγέθη που κυμαίνονται 5,0 έως 5,2 Mw, τα οποία αποτέλεσαν και τα μεγαλύτερα ολόκληρης της σειράς. Η σεισμική δραστηριότητα συνεχίστηκε για περισσότερο από ένα μήνα με μικρότερα σεισμικά γεγονότα. Τα σεισμολογικά δεδομένα από αυτή την σεισμική δραστηριότητα οριοθέτησαν δύο νέα κανονικά ρήγματα τείνοντας από ΒΔ στα ΝΑ στην νοτιοανατολική όχθη της λίμνης. Χρησιμοποιώντας ένα σύνολο ραντάρ δεδομένων, με 28 εικόνες ENVISAT ASAR που κάλυπταν την περίοδο από το Φεβρουάριο του 2003 μέχρι τον Φεβρουάριο του 2010 Εφαρμόστηκε η τεχνική της διαφορικής συμβολομετρίας (DInSAR) και πιο συγκείμενα μία σειρά τεχνικών σώρευσης συμβολογραφημάτων (stacking) Με σκοπό την ανίχνευση και χαρτογράφηση των παραμορφώσεων του εδάφους που προκλήθηκε από την «σμηνοσειρά σεισμών». Τα αποτελέσματά των συγκεκριμένων τεχνικών ανέδειξαν ότι η περιοχή παρουσιάζει ένα εντελώς διαφορετικό ρυθμό παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της προσεισμικής και μετασεισμικής περιόδου. Ενώ τα συν-σεισμικά αποτελέσματα, ανέδειξαν ένα διαφορετικό μοτίβο παραμόρφωσης με την βόρεια όχθη της λίμνης, με τις αστικές περιοχές, να υποχωρεί και το νότιο τμήμα να ανυψώνεται.

8

## ABSTRACT

The aim of this study is to identify ground deformation for the broader area of Lake Trichonis (Western Greece). This study focus on the sequence of earthquakes which termed as "earthquakes swarm" on the south-east side of the Lake Trichonis in April 2007. This area, forming a pull-apart basin, presents an intense seismic activity from the two active normal faults along the northern and southern part of the Lake. The "earthquakes swarm" initiated by small events on 8<sup>th</sup> of April 2007 and followed by the three strongest events of the entire sequence on 10<sup>th</sup> of April 2007, with magnitudes ranging from 5.0 to 5.2 Mw. The seismic activity continued for longer than a month with smaller seismic events. Based on seismological data this seismic activity was attributed to two new defined NW SE trending normal fault that bounds the SE bank of the Lake. Using a data set of 28 ENVISAT ASAR scenes covering the period from February 2003 until February 2010 and applying a number of stacking techniques in order to detect and map the ground deformation provoked by the "earthquakes swarm". Our results show that the area presents a completely different pattern of deformation during the periods of pre-co and post "earthquakes swarm". The coseismic pattern, which reveals that the north lakeside urban areas subside and the south uplift, is consistent with the structural model proposed and based on seismological data.

## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΕΝΕΡΓΑ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΗΣ

Τα διαστημικά συστήματα παρακολούθησης της Γης διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με την προέλευση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία αντανακλάται και στη συνέχεια ανιχνεύεται. Τα συστήματα αυτά (δέκτες, σαρωτές ή αισθητήρες) μπορούν να διακριθούν σε παθητικά και σε ενεργητικά. Παθητικά είναι εκείνα που ανιχνεύουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προερχόμενη από μία φυσική πηγή (συνήθως τον ήλιο), ενώ ενεργά εκείνα που παράγουν ακτινοβολία την εκπέμπουν και στην συνέχεια την συλλέγουν όπως τα Radar (Εικόνα 1). Τα παθητικά συστήματα χρησιμοποιούν από το ηλεκτρομαγνητικό εύρος το ηλεκτρομαγνητικό χρησιμοποιούν το μικροκυματικό (microwave).



Εικόνα 1. Αναπαράσταση Λειτουργίας Παθητικών (δεξιά) και Ενεργητικών (αριστερά) Δορυφορικών Συστημάτων ( Μιγκίρος και άλλοι, 2003 -τροποποιημένο)

## 1.1 Βασικές Αρχές της Μικροκυματικής ακτινοβολίας στα ενεργά Δορυφορικά Συστήματα

Το μικροκυματικό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος περιλαμβάνει μήκη κύματος από 0.1cm έως 1m, τα οποία δεν είναι αντιληπτά από το ανθρώπινο μάτι. Οι ενεργοί δορυφόροι που χρησιμοποιούν αυτά τα μήκη κύματος μπορούν να καταγράφουν τις γεωμετρικές ιδιότητες της επιφάνειας του εδάφους (τοπογραφία, μορφολογία, τραχύτητα του εδάφους) καθώς και την διηλεκτρική συμπεριφορά των οντοτήτων της επιφανείας (σχετίζεται με το ποσοστό ενεργείας που ανακλάται σε σχέση με την διείσδυση και το μήκος του κύματος). Ακόμα ένα χαρακτηριστικό που επωμίζονται τα ενεργά δορυφορικά συστήματα από το μικροκυματικό φάσμα είναι η ονομασία αυτών ως παντός καιρού. Η λειτουργικότητα τους (χρησιμοποιώντας την δική τους πηγή ακτινοβολίας) μαζί με την ικανότητα τις μικροκυμματικής ακτινοβολίας να διεισδύει μέσα από τα νέφη και να μην είναι ευαίσθητη στις καιρικές συνθήκες δικαιολογεί αυτό τον χαρακτηρισμό.



Εικόνα 2 Το Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα (Fletcher,2007 PartA)

#### 1.2 Τι Είναι τα Ενεργά Δορυφορικά Συστήματα;

Τα ενεργά συστήματα, όπως τα Ραντάρ (Radar), χρησιμοποιούν τη μικροκυματική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που εκπέμπεται από μια κεραία μεταφερόμενη είτε από το αεροσκάφος είτε από δορυφόρο, για να ακτινοβολούν «φωτίζουν» την επιφάνεια της γης και να μετρούν το μέγεθος της επιστρέφουσας σκεδασμένης ακτινοβολίας. Επομένως η θέση των χαρακτηριστικών πάνω στην εικόνα καταγράφεται με βάση τον χρόνο μεταβίβασης και επιστροφής της ακτινοβολίας. Λόγο όλης αυτής της λειτουργικότητας τους καταναλώνουν πολύ ενέργεια και για αυτό τον λόγο η λειτουργία τους δεν είναι συνεχής.

Τα RADAR (Radio Detection and Ranging), από την ονομασία τους υποδηλώνουν ότι τα συστήματα αυτά λειτουργούν στις φασματικές ζώνες των ραδιοφωνικών κυμάτων και μικροκυμάτων. Το μήκος κύματος που χρησιμοποιούν τα περισσότερα συστήματα είναι μεταξύ 1mm – 1000mm. Τα συστήματα SAR (Synthetic Aperture Radar) εκπέμπουν και δέχονται κύματα διαφορετικού μήκους στο μικροκυμματικό τα οποία έχουν προσδιοριστεί με συγκεκριμένες ζώνες από τυχαία ονομασία γραμμάτων με φθίνουσα σειρά μήκους από 100cm έως 0.3cm (P,L,S,C,X,K,Q,V και W) (Fletcher,2007 PartA).

11

Συγκριμένα η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος έχει ως εξής. Αρχικά το σύστημα radar δεν κοιτάζει κατευθείαν προς τα κάτω (ναδίρ), αλλά κάνει μία πλάγια και δεξία στο τροχιακό επίπεδο εικονοληψία. Αυτή η πλάγια εικονοληψία αποδίδει και στην εικόνα την «διάσταση» στη διεύθυνση των μετρούμενων αποστάσεων. Εν συνεχεία εκπέμπει παλμούς ηλεκτρομαγνητικής μικροκυματικής ακτινοβολίας και καταγράφει τον χρόνο επιστροφής του παλμού από τους στόχους. Έτσι η ηλεκτρομαγνητική μικροκυματική ακτινοβολία που επιστρέφει καταγράφεται, υπολογίζεται και χρονομετρείται. Ο χρόνος που απαιτείται για την ενέργεια του κύματος να ταξιδέψει στην επιφάνεια και να σκεδαστεί πίσω στον αισθητήρα καθορίζει την απόσταση (ή το εύρος) της κεραίας με τον εκάστοτε στόχο της επιφάνειας. Αυτή η λειτουργία γίνεται για όλη την επιφάνεια και κατ' επέκταση σε όλους τους στόχους που έχουν επιστρέψει ηλεκτρομαγνητική μικροκυματική ακτινοβολία κατά το πέρασμα του δορυφόρου με αποτέλεσμα να αποδοθεί μια πλάγια δισδιάστατη εικόνα της επιφάνειας. Αυτή η παραγόμενη πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ΨΜΕ (DEM) ή ακόμα και με την βοήθεια κατάλληλων τεχνικών και επεξεργασία (πχ InSAR, DInSAR) να αποδώσει μετατοπίσεις της γήινης επιφάνειας (Μερτίκας, 1999).

## 1.3 Τα Δορυφορικά Συστήματα RADAR

Σε αυτό το κεφάλαιο καταγράφονται τα σημαντικότερα δορυφορικά συστήματα τηλεπισκόπισης RADAR με τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Ενώ δίνεται μία πιο αναλυτική περιγραφή του δορυφόρου (ENVISAT) που αποτελεί και το δορυφορικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη.

## Δορυφορικό σύστημα ERS-1 και ERS-2

Η Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (European Space Agency - ESA), που ιδρύθηκε το 1975 με κύριο στόχο την ανάπτυξη της διαστημικής επιστήμης και της τεχνολογίας, σχεδίασε το δορυφορικό πρόγραμμα παρατήρησης της Γης ERS. Μέχρι σήμερα έχουν τεθεί σε τροχιά οι δορυφόροι με χρήση radar ERS-1 και ERS-2. Ο ERS -1 εκτοξεύτηκε στις 17 Ιουλίου του 1991, ενώ ο ERS -2 το 21 Απριλίου του 1995 με βασικό ερευνητικό στόχο στη μελέτη του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα ο ERS-1 είχε ως κύρια αποστολή την μελέτη της αλληλεπίδρασης ωκεανού - ατμόσφαιρας και την κυκλοφορία των υδάτινων μαζών, την παρατήρηση των πάγων και την παρακολούθηση των

ΕRS-1 Χαρακτηριστικά									
Sponsor:	European Space Agency								
Expected Life:	3 years, (has been exceeded)								
SIC Code:	6177								
NORAD SSC Code:	21574								
Launch Date:	July 17, 1991								
<b>RRA Diameter:</b>	20 cm								
RRA Shape:	hemispherical								
Reflectors:	9 corner cube								
Orbit:	circular								
Inclination:	98.5 degrees								
Perigee:	780 km								
Period:	100 minutes								
Weight:	2400 kg								

δυναμικών παράκτιων διεργασιών. Ενώ τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αποτυπώνονται στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά Δορυφόρου ERS

Ο ERS-2 είχε ακριβώς τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά η μόνη διαφορά που υπήρχε ήταν ένα επιπλέον όργανο το GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) το οποίο μελετούσε χαρακτηριστικά της χημείας της ατμόσφαιρας. Σήμερα, ο μεν ERS-1 έχει τεθεί εκτός λειτουργίας ενώ και ο ERS-2 παρουσιάζει σοβαρά τεχνικά προβλήματα (ουσιαστικά από τις αρχές του 2000) (Μερτίκας και άλλοι, 2003).

## Δορυφορικό σύστημα ENVISAT

Το πρόγραμμα ERS αντικαταστήθηκε από το δορυφόρο ENVISAT. Την 1η Μαρτίου του 2002, η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος εκτόξευσε τον ENVISAT, έναν εξελιγμένο δορυφόρο πολικής τροχιάς. Ο δορυφόρος ENVISAT κόστισε στην ESA περίπου 2.3 δισεκατομμύρια δολάρια. Ακολουθούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου (Πίνακας 2).

Χαρακτηριστικά Envisat									
Sponsor:	European Space Agency								
Primary SLR Applications:	POD								
COSPAR ID:	0200901								
NORAD SSC Code:	27386								
Launch Date:	1 March 2002								
NP Bin Size:	15 seconds								
RRA Diameter:	20 cm								
Reflectors:	9 corner cubes								
Orbit:	circular, sun-synchronous polar								
Inclination:	98.54 degrees								
Perigee:	796 km								

Period:	100 minutes
Weight:	8211 kg

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά ENVISAT

Τα όργανα καταγραφής με τα οποία είναι εξοπλισμένος ο δορυφόρος ENVISAT (Εικόνα 3) είναι τα ακόλουθα:

- Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR). Το όργανο αυτό παράγει τις υψηλής ποιότητας εικόνες στο μικροκυματικό τμήμα του φάσματος, για τη μελέτη και τη παρακολούθηση της Γης σε θέματα φυσικών καταστροφών, αλλαγών στις χρήσεις γης, τοπογραφικών χαρτογραφήσεων, γεωλογίας. Ενώ λειτουργεί στην φασματική ζώνη C και εξασφαλίζει την συνέχεια του ERS 1/2
- Advanced Along-Track Scanning Radiometer (AATSR). Αποτελεί συνέχεια του οργάνου ATSR των ERS για την καταγραφή των θερμοκρασιών στην επιφάνεια της θάλασσας.
- Doppler Orbitography and Radio
  Positioning Integrated by Satellite (DORIS). Χρησιμεύει για τον εντοπισμό
   του δορυφόρου στο διάστημα επιτρέποντας τη ρύθμιση της θέσης
   του.
- Global Ozone monitoring by Occultation of Stars (GOMOS). Το συγκεκριμένο όργανο κάνει μετρήσεις του όζοντος και άλλων αερίων της ατμόσφαιρας σε υψόμετρα 20-100 km πάνω από την επιφάνεια της Γης.



Εικόνα 3. Η Όψη και τα όργανα καταγραφής με τα οποία είναι εξοπλισμένος ο δορυφόρος ENVISAT

- Laser Retro-Reflector (LRR)
  Προσδιορίζει τον ακριβή καθορισμό της τροχιάς του δορυφόρου.
- Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS). Καταγράφει την ηλιακή ακτινοβολία της γης και τα σύννεφα στο ορατό και υπέρυθρο τμήμα του φάσματος. Ενώ καταγράφει την συγκέντρωση της χλωροφύλλης στους ωκεανούς και στα παράκτια ύδατα.

- Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS). Παρέχει τα προφίλ της ατμοσφαιρικής πίεσης και θερμοκρασίας.
- Radar Altimeter (RA-2). Το συγκεκριμένο όργανο καταγραφεί το ύψος των κυμάτων, την ταχύτητα των ανέμων, την αποτύπωση της τοπογραφίας της γης, της Θάλασσας και των πάγων.
- Microwave Radiometer (MWR). Αποτυπώνει την ποσότητα περιεκτικότητα των νεφών σε υγρασία και των ατμοσφαιρικών υδρατμών
- Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography (SCIAMACHY). Αποτυπώνει την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε αέρια και αερολύματα μέσω του ανακλώμενου και σκεδαζόμενου φωτός. Αποτελεί μία βελτιωμένη έκδοση του οργάνου GOME του ERS-2. (https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat, 22/3/12)

## Δορυφορικό σύστημα Seasat

Ο Seasat 1 είναι ο πρώτος από μία σειρά δορυφόρων που εκτοξεύθηκε τον Ιούλιο του 1987 και ανήκει στην κατηγορία των Radar με σύστημα SAR. Ο Seasat 1 παρουσίασε κάποια τεχνικά προβλήματα, 99 ημέρες μετά την εκτόξευση, που περιόρισαν την παραγωγή δεδομένων. Οι εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν με χρήση εικόνων SAR του Seasat 1 αφορούσαν βασικά ωκεανογραφικές μελέτες, ανάλυση υδρογραφικών δικτύων και χαρτογράφηση των πάγων στους πόλους. Ενώ χρησιμοποιήθηκε για την χαρτογράφηση της βλάστησης και την γεωλογική ανίχνευση των γραμμώσεων, ρηγμάτων, πτυχών και διαρρήξεων (Μερτικάς και άλλοι, 2003)..

## <u>Δορυφορικό σύστημα SIR</u>

Ο δορυφόρος SIR-A αποτέλεσε μια τροποποιημένη έκδοση του SEASAT SAR ο οποίος εκτοξεύτηκε τον Νοέμβριο του 1981. Ο SIR-A ήταν ένας δέκτης τύπου SAR. Ο SIR-B εκτοξεύτηκε το Οκτώβριο του 1984, λειτούργησε στη φασματική ζώνη L, αλλά με καλύτερη διακριτική ικανότητα σε σχέση με τον SIR-A (Μερτικάς και άλλοι, 2003). Ενώ τέλος ο SIR-C εκτοξεύτηκε το 1994 και αποτέλεσε το πρώτο διαστημικό ραντάρ με δυνατότητα απόκτησης εικόνων σε τα ριφασματικά κανάλια (L,X,C)

#### Δορυφορικό σύστημα JERS

Ο JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite), τέθηκε σε τροχιά το 1992 και σταμάτησε να λειτουργεί το 1998. Η διαστημική πλατφόρμα του JERS-1 φέρει έναν οπτικό δέκτη OS (Optical System - σαρωτής ωστικής σάρωσης) και ένα radar τύπου SAR στην μικροκυματική ζώνη L (L-Band: 23cm). Οι εικόνες του JERS-1 βοήθησαν στην ανίχνευση και παρακολούθηση του χερσαίου περιβάλλοντος της Γης (Μερτίκας και άλλοι, 2003).

#### <u>Δορυφορικό σύστημα Radarsat</u>

Ο δορυφόρος Radarsat-1 εκτοξεύτηκε το Νοέμβριο του 1995, και ο Radarsat-2 το Δεκέμβριο του 2007 και οι δύο πλατφόρμες φέρουν έναν ενεργητικό μικροκυματικό αισθητήρα που εγγυάται τη συλλογή δεδομένων ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών και συνθηκών φωτισμού. Ο Radarsat-1 λειτούργησε για 5 χρόνια και τα δεδομένα του χρησιμοποιήθηκαν για εφαρμογές στη γεωργία, στη δασολογία, στη γεωλογία, στην χαρτογράφηση, στην υδρολογία, στην ωκεανογραφία, στις παράκτιες διεργασίες και στη χρήση γης. Ο Radarsat-2 φέρει δύο σημαντικά χαρακτηριστικά, το πρώτο είναι η πόλη μικρή χωρική διακριτική ικανότητα και το δεύτερο είναι η δυνατότητα αριστερή και δεξιάς απεικόνισης (http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat/radarsat-tableau.asp , 22/3/12).

#### Δορυφορικό σύστημα ALOS

Οι Ιάπωνες το Ιανουάριο του 2006 έθεσαν σε τροχιά τον (Advance Land Observation Satellite – ALOS) και αποτέλεσε ένα από τους μεγαλύτερους δορυφόρους του κόσμου. Ο ALOS παρέχει υψηλής ποιότητας δεδομένα με χαμηλό κόστος. Τα προϊόντα του χρησιμοποιούνται για ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών όπως τοπογραφία, παρακολούθηση φυσικών καταστροφών και των φυσικών πόρων. Η πλατφόρμα του ALOS φέρει μία σειρά από υψηλής ποιότητας όργανα. Αξιοσημείωτο είναι το όργανο PALSAR (Phase Array type L-band Aperture Radar) που είναι ένα μικροκυματικός αισθητήρας παντός καιρού, λαμβάνοντας εικόνες ημέρα και νύχτα ξεπερνώντας το φαινόμενο της νεφοκάλυψης (Μερτικάς και άλλοι, 2003).

#### Δορυφορικό σύστημα TerraSAR-X

Ο συγκεκριμένος δορυφόρος τέθηκε από του Γερμανούς σε τροχιά στις 15 Ιουνίου 2007. Σημαντικό χαρακτηριστικό είναι τα προϊόντα υψηλής χωρικής διακριτικής

ικανότητας 18m με συνεχής συλλογή εικόνων (ημέρα και νύχτα) και προσπέλασης της νεφοκάλυψης. Ενώ τα υψηλής ποιότητας όργανα που φέρει στην πλατφόρμα του αποδίσουν υψηλής ποιότητας παραγόμενα προϊόντα όπως DEM, συμβολογραφήματα κτλπ.(<u>http://www.dlr.de/eo/en/desktopdefault.aspx/tabid-5725/9296\_read-15979/</u>, 22/3/12).

#### Δορυφορικό σύστημα Cosmo-Skymed

(COnstellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation) (Αστερισμός μικρών δορυφόρων για τη Παρατήρηση της Μεσογειακής λεκάνης) είναι ένα σύστημα παρατήρησης της Γης μέσω δορυφόρου που χρηματοδοτούνται από το ιταλικό Υπουργείο Έρευνας και το Υπουργείο Άμυνας και διαχειρίζονται από την Ιταλική Υπηρεσία. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα περιλαμβάνει τέσσερις μεσαίου μεγέθους δορυφόρους και είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες ραντάρ, με αυτό τον τρόπο μπορούν να καλύψουν σε μικρό χρόνο μεγάλες εκτάσεις παρατήρησης. Ο πρώτος δορυφόρος ξεκίνησε στις 22:34 GMT, στις 8 Ιουνίου 2007, ο COSMO-2 στις 2:31:42 GMT στις 9 Δεκεμβρίου 2007, ο COSMO-3 ξεκίνησε στις 2:38 GMT στις 25 Οκτωβρίου 2008 0 COSMO-4 στις 5 Νοεμβρίου 2010 και του (http://www.telespazio.it/cosmo.html, 22/3/12).

Δορυφόρος	Αισθητήρας	Φασματικό κανάλι	Επαναληψι- μότητα (ημέρες)	'91	, <mark>92</mark>	, <mark>93</mark>	,94	' <mark>95</mark>	96,	<u>76'</u>	86,	66,	00,	<sup>,</sup> 01	'02	,03	,04	'05	,06	20,	<mark>,08</mark>	60,
ERS-1	AMI	С	35																			
JERS-1	SAR	L	44																			
RADARSAT-1	SAR	С	24																			
ERS-2	AMI	С	35																			
ENVISAT	ASAR	С	35																			
ALOS	PALSA	L	46																			
RADARSAT-2	SAR	С	24																			
TerraSAR-X	SAR	X	11																			
Cosmo-SkyMed	SAR	Х	16																			

Πίνακας 3 Χρονικές περίοδοι λειτουργίας των δορυφορικών συστημάτων SAR και τεχνικά χαρακτηριστικά τους (Stevens & Wadge, 2004)

## 2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ RADAR

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση του τρόπου λειτουργίας των RADAR και των κύριων λειτουργικών χαρακτηριστικών τους. Όπως η γεωμετρία στην εικονοληψία και η χωρική ανάλυση με την χωρική διακριτική ικανότητα του συστήματος. Ενώ στο τέλος αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά της απεικόνισης των εικόνων RADAR.

## 2.1 Γεωμετρία εικονοληψίας του συστήματος RADAR

Η γεωμετρία της εικονοληψίας ενός συστήματος radar έχει μία βασική ιδιαιτερότητα που την κάνει να διαφέρει από την αντίστοιχη των σαρωτών των οπτικών συστημάτων που συλλέγουν την ανακλώμενη ακτινοβολία. Όπως αναφέρθηκε και στην παραπάνω ενότητα το σύστημα radar δεν κοιτάζει κατευθείαν προς τα κάτω (ναδίρ), αλλά κάνει μία πλάγια προς τα δεξιά στο τροχιακό επίπεδο εικονοληψία (Εικόνα 4). Αυτή η δέσμη της πλάγιας εικονοληψίας μεταδίδεται υπό γωνία και προς τα δεξιά της δορυφορικής πλατφόρμας, είτε αυτή εκτελεί ανερχόμενη (ascending) είτε κατερχόμενη (descending) τροχιά (Εικόνα 4).

Η γεωγραφική περιοχή που «σαρώνει» η συγκεκριμένη δέσμη αποτυπώνει μία λωρίδα συγκεκριμένου πλάτους (swath). Και η οποία εντοπίζεται εκτός του σημείου ναδίρ μεταξύ της "εγγύς περιοχή" (near range) που βρίσκεται κοντά στο ναδίρ και την "άπω περιοχή" (far range) που εντοπίζεται μακριά από το σημείο ναδίρ. Ενώ η διεύθυνση της απόστασης (range) της λωρίδας αυτής είναι κάθετη στη διεύθυνση τροχιάς της πλατφόρμας ενώ η διεύθυνση του αζιμούθιου (azimuth) είναι παράλληλη (Μερτίκας, 1999).

Η εδαφική απόσταση (ground range distance) είναι η οριζόντια απόσταση κατά μήκος του εδάφους μεταξύ του σημείου ναδίρ και το αντικείμενο-στόχο. Ενώ η κεκλιμένη απόσταση (slant range distance), που αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εικονοληψίας των radar, ερμηνεύεται ως η (Line of Sight -LOS) απόσταση της πλατφόρμας από τον στόχο στην γήινη επιφάνεια (Εικόνα 4). Η οποία κυμαίνεται ανάλογα με τη θέση του αντικειμένου-στόχου μέσα στην περιοχή σάρωσης (swath) (Εικόνα 4). Τέλος σε όλη αυτή την σύνθετη γεωμετρία σχηματίζονται δύο σημαντικές γωνίες. Η μία είναι γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της δέσμης και του εδάφους και ονομάζεται γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) ενώ η δεύτερη είναι η γωνία με την οποία βλέπει το radar την γήινη επιφάνεια και καλείται γωνία παρατήρησης (look angle). (Μερτίκας, 1999; Fletcher,2007 PartA)



Εικόνα 4 Γεωμετρία εικονοληπτικού συστήματος SAR

#### 2.2 Χωρική Ανάλυση του συστήματος Radar

Στα δορυφορικά συστήματα radar εντοπίζονται δύο χωρικές διακριτικές ικανότητες, της απόστασης (range or across-track resolution) και του αζιμούθιου (azimuth or along-track resolution), οι οποίες πηγάζουν από την γεωμετρία της εικονοληψίας και τη μικροκυματική ακτινοβολία. Η διακριτική ικανότητα της απόστασης εξαρτάται από το μήκος του παλμού (P) ενώ η διακριτική ικανότητα του αζιμούθιο καθορίζεται από την δέσμη (A) που δημιουργείται από το γωνιακό πλάτος του σήματος και τη κεκλιμένη απόσταση (slant range distance) (Εικόνα 5).



Εικόνα 5 Χωρική ανάλυση εικονοληπτικού συστήματος SAR. (Δεξιά - range or across-track resolution) και (Αριστερά- azimuth or along-track resolution)

Στην εγκάρσια διάσταση δύο στόχοι γίνονται διακριτοί μόνο όταν τα ανακλώμενα σήματα τους φθάνουν στον αισθητήρα με διαφορετικό χρόνο χρόνους. Η ελάχιστη διακριτή απόσταση δυο στόχων είναι το μισό μήκος του παλμού (P/2) «πχ. (Εικόνα 5) Οι στόχοι 1 και 2 δεν θα είναι διακριτοί αντιθέτως με τους 3 και 4 που θα παρουσιάσουν διαφορετικούς χρόνους». Από την άλλη πλευρά στη διακριτική ικανότητα του αζιμούθιου όσο η δέσμη μεταδίδεται σε μακρύτερες αποστάσεις από τον αισθητήρα η αζιμουθιακή ανάλυση μεγαλώνει και γίνεται ασθενέστερη «πχ. (Εικόνα 5) Οι στόχοι 1 και 2 θα είναι διακριτοί σε σχέση με τον 3 και 4». Η πρώτη διακριτική ικανότητα βελτιώνεται με την χρησιμοποίηση μικρότερης μήκους κύματος δέσμης. Ενώ η αζιμουθιακή διακριτική ικανότητα βελτιώνεται με την εισαγωγή μεγαλύτερης κεραίας στο σύστημα διότι μικραίνει το πλάτος της δέσμης και η ανάλυση του αζιμούθιου είναι λεπτομερέστερη. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι το μέγεθος της κεραίας είναι περιορισμένο στα 10-15m για τους δορυφόρους (Μερτίκας, 1999; Καρτάλης, 2006).

Αυτός ο περιορισμός και η ανάγκη καλής ποιότητας δεδομένων σε διακριτικής ικανότητας δημιούργησε την τεχνολογίας SAR (Synthetic Aperture Radar) (Εικόνα 6). Συγκριμένα δημιουργείται μια «νοητή» κεραία που προκύπτει από την τροχιά του συστήματος και την διάρκεια που ένα αντικείμενο-στόχος βρίσκεται μέσα στις δέσμες παρατήρησης του. Δηλαδή η «συντεθειμένη κεραία» ξεκινάει από το σημείο όπου το αντικείμενο-στόχος εμφανίζεται στην δέσμη και τελειώνει στο σημείο όπου χαθεί από την επόμενη δέσμη (Καρτάλης, 2006).



Radar)

## 2.3 Επανασκέδαση σήματος Radar

Όπως είδαμε και παραπάνω η διαστημική πλατφόρμα των Radar στέλνει ένα παλμό και αναμένει την «χρονική» επιστροφή του. Η εικόνα Radar αποτυπώνει την ισχύ του σήματος που επανασκεδάζεται (backscatter) από ένα αντικείμενο-στόχο(Εικόνα 7). Το μέγεθος της ισχύος εξαρτάται από δύο παραμέτρους τις γήινες επιφανειακές παραμέτρους (όπως ανάγλυφο, τραχύτητα, γεωμετρικό σχήμα και διηλεκτρικές ιδιότητες των αντικειμένων-στόχων) και τις παραμέτρους παρατήρησης του εκάστοτε συστήματος radar (όπως μήκος κύματος, συχνότητα, πόλωση, προσπίπτουσα γωνία του εκπεμπόμενου κύματος) (Fletcher,2007 PartA/PartB).



Εικόνα 7 Επανασκέδαση σήματος Radar με διάφορες γεωμετρίες της επιφάνειας της Γής και η απόδοση τους ως εικόνα Radar (http://southport.jpl.nasa.gov/cdrom/sirced03/cdrom/ROADMAP/IMAGERAD/IMGRADV3.HTM)

Όπως είναι φυσικό τα αντικείμενα-στόχοι επανασκεδάζουν σε διαφορετικό βαθμό το σήμα του Radar (Εικόνα 7). Ο τρόπος μέτρησης της ισχύς του ανακλώμενου σήματος γίνεται με τον συντελεστή επανασκέδασης (σ°) (backscatter index). Το ποσό της ανακαλούμενης ισχύς καθορίζει την απόχρωση της απεικονιζόμενης γεωγραφικής περιοχής, στην κλίμακα του γκρι, σε μία εικόνα Radar (Καρτάλης, 2006).

#### 2.4 Παραμορφώσεις εικόνων Radar

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας των radar και των παραπάνω ενοτήτων οι παραμορφώσεις στην εικόνα είναι ένα αναμενόμενο χαρακτηριστικό. Η εικονοληψία των radar και η γεωμετρία πλάγια λήψης (sidelooking), η «δισδιάστατη» χωρική διακριτική ικανότητα, καθώς και η ιδιότητα των συστημάτων να μετρούν αποστάσεις (μέσο χρόνου) συντελούν στην παραμόρφωση του προϊόντος του radar. Ο κύριος παράγοντας εμφάνισης της παραμόρφωσης είναι ότι τα radar μετρούν τις αποστάσεις με το βασικό γεωμετρικό χαρακτηριστικό της εικονοληψίας που είναι η κεκλιμένη απόσταση (slant range distance) μεταξύ radar και στόχου και όχι με την εδαφική απόσταση (ground range distance). Επομένως αν σε αυτό το κύριο χαρακτηριστικό προστεθεί και το ανάγλυφο της επιφάνειας, προκύπτει μία σειρά διαφορετικών τύπων παραμορφώσεων με διαφορετική κλίμακα στην εγγύς περιοχή και την άπω περιοχή. Παρακάτω ακολουθούν παραδείγματα διαφορετικών τύπων παραμόρφωση και γιανοταριός εικόνες radar (Fletcher,2007 PartA).

<u>Το φαινόμενο της σμίκρυνσης (foreshortening)</u>, προκαλεί τη συμπίεση της εικόνας σε διεύθυνση κάθετη στο ίχνος της τροχιάς του δορυφόρου και έχει ως αποτέλεσμα να παρατηρείται ότι ίσες επιφάνειες απεικονίζονται ως άνισες κατά την αποτύπωση τους στην κεκλιμένη απόσταση.









<u>Το φαινόμενο της αναστροφής (layover)</u>, αποτελεί μια ακραία περίπτωση του φαινομένου της σμίκρυνσης (foreshortening). Λόγο μεγάλων και απότομών κλίσεων το σήμα θα φθάσει πρώτα στην κορυφή ή στην κορυφογραμμή, επομένως θα επανασκεδαστεί πρώτο πίσω στον αισθητήρα. Αντιθέτως οι πρόποδες του βουνού θα φτάσουν αργότερα.



<u>Το φαινόμενο της σκίασης</u>, παρατηρείται στις πλαγιές των βουνών με μεγάλες κλίσεις οι οποίες δεν είναι ορατές στο δορυφόρο και έχουν αντίθετο προσανατολισμό. Με λίγα λόγια είναι οι στόχοι που δεν μπορεί να «σημαδέψει» η κεκλιμένη απόσταση (slant range) λόγο ανάγλυφου.



## **3. ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ RADAR**

Σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνικές γεωδαιτικές μεθόδους (πχ. στερεοσκοπικών), η ικανότητα των ραντάρ να μετρούν αποστάσεις μέσο χρόνου και υπό γωνία από μεγάλες αποστάσεις αποτέλεσε μία νέα τεχνική, την συμβολομετρία (Interferometry).

Ένα απλό παράδειγμα για την κατανόηση αυτής της τεχνικής είναι το ανθρώπινο μάτι. Το οποίο είναι ουσιαστικά «τυφλό» στο να εντοπίσει την διαφορά σε απόσταση από ένα αντικείμενα που είναι στην ίδια σειρά. Επομένως ούτε ένα ραντάρ ή SAR μπορεί να διακρίνει δύο αντικείμενα-στόχους στην ίδια σειρά, αυτό μπορεί να γίνει μόνο από διαφορετικές οπτικές γωνίες και την χρησιμοποίηση δύο ή και παραπάνω συστημάτων ραντάρ.

Αυτή η ιδέα, και η χρήση των πληροφοριών της φάση του εκπεμπόμενου και σκεδασμένου σήματος, άνοιξαν τον δρόμο για την τεχνική της συμβολομετρίας. Χρησιμοποιώντας δύο εικόνες SAR, είτε από δύο διαφορετικά συστήματα ή με επαναλαμβανόμενες λήψεις του ίδιου συστήματος, είναι δυνατό να υπολογιστεί η απόσταση (Fletcher,2007 PartA).

Τα πρώτα αποτέλεσμα της συμβολομετρίας εντοπίζονται το 1986 από τους (Zebker and Goldstein 1986), όπου χρησιμοποίησαν δύο εικόνες και πολλαπλασιάζοντας τα εύρη τους διαχώρισαν την φάση της εικόνας με αποτέλεσμα να παράγουν ένα συμβολογράφημα (*interferogram*). Το όποιο στην συνέχεια απέδωσε ένα τοπογραφικό χάρτη της περιοχής με ανάλυση 10 – 30 μέτρων. Έτσι το κύριο βάρος για τις πρώτες εφαρμογές έπεσε στην εκτίμηση της τοπογραφίας αποδίδοντας μεγάλης ακρίβειας αποτελέσματα (Ferretti et al., 1997). Στο πέρας του χρόνου και με την ανάπτυξη της τεχνολογίας δημιουργήθηκαν περισσότερα και εξελιγμένα δορυφορικά συστήματα με αποτέλεσμα τα «συνεχής λήψης» (repeat-pass) δεδομένα όπου κατέδειξαν νέες εφαρμογές με την παρακολούθηση παραμορφώσεων πάνω στην γήινη επιφάνεια (Διαφορική Συμβολομετρία (DInSAR), Συμβολομετρία των σταθερών σκεδαστών (Permanent Scatters Interferometry), κτλπ).

Τέλος πρέπει να τονιστεί ότι η αξιοπιστία, η ορθότητα και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων των παραπάνω εφαρμογών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την συνέπεια με την οποία ακολουθούνται τα βήματα της εκάστοτε μεθοδολογίας. Καθώς και της ποιότητας των πρωτογενών δεδομένων. Η πιο βασική δικλίδα της επιτυχίας των αποτελεσμάτων σε αξιοπιστία, ορθότητα και ακρίβεια είναι η χρήση όσο τον δυνατόν περισσότερων ζευγών εικόνων SAR. Με σκοπό την αντιμετώπιση σφαλμάτων διάφορων παραμέτρων που θα αναλυθούν και στην συνέχεια.

#### 3.1 Γεωμετρία Συμβολομετρίας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ένα σύστημα radar – SAR μπορεί να παρατηρήσει μία περιοχή με διαφορετική γωνία, είτε από δύο διαφορετικά συστήματα ή με επαναλαμβανόμενες λήψεις του ίδιου συστήματος. Από αυτή την γεωμετρία της εικονοληψίας δημιουργούνται δύο χαρακτηριστικά που είναι θεμελιώδη για την τεχνική της Συμβολομετρίας.

Η απόσταση μεταξύ των δύο δορυφόρων (ή τροχιών) προς την τροχιά ονομάζεται βασική συμβολομετρική γραμμή ενώ η κάθετη προβολή της στην κεκλιμένη απόσταση (slant range) είναι η κάθετη συμβολομετρική γραμμή (Εικόνα 8). Έστω ότι μεταξύ των δύο δορυφόρων θέσουμε ένα καρτεσιανό δυσδιάστατο σύστημα, οι δύο δορυφόροι έχουν μεταξύ τους μια κάθετη και μία οριζόντια απόσταση. Η κάθετη βασική γραμμή (Bp) είναι κάθετη στην μετάδοση του σήματος ενώ η παράλληλη βασική γραμμή (Bn) είναι παράλληλη στην μετάδοση του σήματος. Οι δύο αυτές διαστάσεις συνθέτουν το διάνυσμα της βασικής συμβολομετρικής γραμμής (baseline) (Εικόνα 8) (GAMMA Documentation, 2006).



Εικόνα 8 Γεωμετρία ενός συμβολομετρικού συστήματος SAR (Τροποποιημένο Fletcher,2007).

Όπως γίνεται αντιληπτό η διαφορά φάσης που προκύπτει μεταξύ των δύο εικόνων είναι ίση με την παράλληλη συμβολομετρική γραμμή (Bp). Αντίστοιχα αυτή η διαφορά φάσης της συμβολομετρίας μπορεί να σχετιστεί και με το άλλο διάνυσμα της κάθετης συμβολομετρικής γραμμής (Bn). Ιδιαίτερα η κάθετη συμβολομετρική γραμμή παίζει σημαντικό ρόλο στην τεχνική της συμβολομετρίας, χαρακτηριστικό που θα αποδοθεί στην συνέχεια της θεωρίας. Τέλος, σημαντικό είναι να τονιστεί ότι η βασική συμβολομετρική γραμμή έχει ένα ανώτερο όριο απόστασης μεταξύ των δύο δορυφόρων. Ένα συμβολομετρικό ζευγάρι και ανάλογα με το δορυφορικό σύστημα έχει μια κρίσιμη τιμής απόσταση μεταξύ τους, την κρίσιμη τιμή της βασικής γραμμής (Fletcher,2007 PartA).

Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν δύο τεχνικές για την απόκτηση συμβολομετρικών ζευγαριών: η διαφορετική πτήσης-λήψης συμβολομετρία (repeat pass interferometry) και η ίδια πτήσης-λήψης συμβολομετρία (single-pass interferometry). Στην repeat pass interferometry ένα σύστημα ραντάρ (π.χ.,ERS1/2, RADARSAT, ή Envisat) παρατηρεί την ίδια περιοχή από διαφορετικές τροχιές. Στη single-pass interferometry, μια διαστημική πλατφόρμα (π.χ., το ShuttleRadar Topography Mission (SRTM) είναι εξοπλισμένη με δύο κεραίες που εκπέμπουν και λαμβάνουν το σήμα με ένα πέρασμα.

## 3.2 Περιγραφή των Βασικών Αρχών της Συμβολομετρίας

Σε αυτή την ενότητα αποτυπώνονται οι βασικές αρχές λειτουργίας της τεχνικής της συμβολομετρίας και ταυτόχρονα γίνεται μια επεξήγηση των βασικών όρων της που θα χρησιμοποιηθούν και στο στάδιο της μεθοδολογίας και επεξεργασίας.

## 3.2.1 Συμβολομετρική Φάση και Συμβολογράφημα

Έστω ότι έχουμε ένα συμβολομετρικό ζευγάρι SAR που παρατηρούν ένα συγκεκριμένο τμήμα της επιφάνειας της γης. Κάθε σύστημα SAR αποτυπώνει την περιοχή αυτή μέσα από εικονοστοιχεία που εμπεριέχουν τόσο το εύρος όσο και την φάση του ανακλώμενου σήματος. Ιδιαίτερα όμως η φάση του σήματος και η ανάλυση της συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην τεχνικής της συμβολομετρίας.

Η ακτινοβολία που μεταδίδεται από το ραντάρ φθάνει στην επιφάνεια, ανακλάται και στη συνέχεια επιστρέφει στον αισθητήρα του ραντάρ, επομένως υπάρχει ένα

26

αμφίδρομο ταξίδι σήματος (Εικόνα 9). Το εν λόγω σήμα είναι ημιτονοειδής φύσης και η καθυστέρηση (t) ισοδυναμεί με αλλαγή φάσης (φ) μεταξύ μετάδοσης και λήψης του σήματος. Επομένως η διαφορά φάσης είναι ίση με το αμφίδρομο ταξίδι του σήματος με απόσταση 2R διαιρούμενο με το μεταδιδόμενο (λ) μήκος κύματος. Η διαφορά φάσης παίρνει τιμές από 0 έως 2π. Ο τύπος που προκύπτει είναι (Hanssen, 2001):

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2R \quad \dot{\eta} \quad \frac{4\pi}{\lambda}R$$

Εικόνα 9 Αναπαράσταση Διαδικασίας Συμβολομετρικής Φάσης (Τροποποιημένο Fletcher,2007)

Εκ των πραγμάτων στα συμβολομετρικά ζεύγη, η απόσταση που μεσολαβεί μεταξύ του δορυφορικού συστήματος και του αντικειμένου-στόχου στην επιφάνεια της γης μπορεί να μετρηθεί μέσω της τιμής της διαφοράς της φάσης των δύο συστημάτων SAR. Αυτή η διαφορά της φάσης μεταξύ των δύο εικόνων ονομάζεται συμβολομετρική φάση (interferometric phase). Επομένως ο τύπος που θα προκύψει από την διαφορά φάσης των δύο συστημάτων που στοχεύουν με διαφορετική κλίση την επιφάνεια και επομένως με διαφορετική κεκλιμένη απόσταση (slant-range) (R) είναι η εξής.

$$\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} (R_1 - R_2)$$

Σε συνδυασμό με την πληροφορία της γεωμετρίας και την διαφορετική θέση του αισθητήρα επέτρεψαν την παρατήρηση των γωνιακών διαφορών, που απαιτούνται για την τοπογραφική αποτύπωση.

Πρακτικά η «ένωση» των δύο εικόνων πραγματοποιείται με τον πολλαπλασιασμό της μιας εικόνας με την συζυγή μιγαδική της άλλης. Συγκεκριμένα γίνεται ένας διαγώνιος πολλαπλασιασμός φατνίο επί φατνίο της πρώτης με την δεύτερη εικόνα, δηλαδή το εύρος της πρώτης επί της δεύτερης. Ενώ η φάση της προκύπτει από τη συμβολομετρική φάση (interferometric phase). Αυτή η «νέα» σύσταση της εικόνας ονομάζετε συμβολογράφημα (interferogram) και η μορφή της αποτελείται από μια συνεχόμενη επιφάνεια ίσης φάσης καμπυλών που ονομάζονται και κροσσοί (fringes) (Fletcher, 2007 PartA/PartB).

## 3.2.2 Εξομάλυνση του Συμβολογραφήματος

Σύμφωνα με τη γεωμετρία της απεικόνισης των SAR και της εικονοληψίας από το slant-range, το συμβολογράφημα (interferogram) δεν μπορεί να αποφύγει την ισοπέδωση της επιφάνειας της Γής κατά την αποτύπωση της (Εικόνα 10). Έτσι τα αντικείμενα με το ίδιο υψόμετρο στην επιφάνεια έχουν την ίδια συμβολομετρική φάση (interferometric phase). Η εξομάλυνση του συμβολογράφηματος (interferogram flattering) ως εκ τούτου, δημιουργεί ένα χάρτη φάσης που ακολουθεί το σχετικό υψόμετρο του εδάφους. Στο εξομαλυμένο συμβολογράφημα οι ίσης φάσης καμπύλες - κροσσοί (fringes) ακολουθούν την χωρική κατανομή των ισοϋψών καμπυλών της περιοχής (Εικόνα 10) (Fletcher, 2007 PartA).



Εικόνα 10 Αριστερά: ένα συμβολογράφημα ERS ενός μέρους των ιταλικών Άλπεων και Δεξιά: το interferogram flattering - οι ασυνέχειες φάσης μοιάζουν με τις ισοϋψείς καμπύλες - (Fletcher,2007 PartA)

Το μέγεθος μεταξύ δύο συνεχόμενων γειτονικών κροσσών ονομάζεται **το υψόμετρο της ασάφειας ή υψομετρική ασάφεια (altitude of ambiguity- ha)** και μπορεί να υπολογιστεί από μια σειρά συμβολομετρικών παραμέτρων. Συγκεκριμένα το υψόμετρο της ασάφειας ορίζεται ως η διαφορά ύψους που δημιουργεί μια αλλαγή συμβολομετρική φάσης του 2π μετά την εξομάλυνση του συμβολογράφηματος (interferogram flattering). Το υψόμετρο της ασάφειας είναι αντιστρόφως ανάλογο με το διάνυσμα της κάθετης συμβολομετρικής γραμμής (Bn) και μεταβάλεται ανάλογα με

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

#### 3.2.3 Συμβολομετρική Συνοχή

Η ποιότητα της διαφοράς φάσης ενός συμβολογράφηματος (interferogram) υπολογίζεται από τον βαθμό συσχέτισης μεταξύ του συμβολομετρικού ζεύγους. Ουσιαστικά η συμβολομετρική συνάφεια (interferometric coherence) (γ) είναι η μονάδα μέτρησης του θορύβου της φάσης και η ικανότητα διάκρισης των κροσσών στο συμβολογράφημα (Touzi et al., 1999). Ο ορισμός της συνοχής (Born et al., 1980; Hanssen, 2001)

$$\gamma = \frac{E\{\alpha * \beta\}}{\sqrt{E\{\alpha^2\} * E\{\beta^2\}}}$$

[α και β είναι η δύο σύνθετες εικόνες και Ε{} είναι οι αναμενόμενες τιμές]

Το εύρος των τιμών της συμβολομετρικής συνάφειας είναι μεταξύ 0 και 1. Το συγκεκριμένο εύρος προσδιορίζει την σταθερότητα του σήματος που σκεδάζεται στον αισθητήρα του SAR για μία περιοχή μελέτης. Οι τιμές πολύ κοντά στο 0 εμφανίζουν μία μη συσχετιζόμενη εικόνα. Από την άλλη, οι τιμές που είναι κοντά στο 1 ανταποκρίνονται σε ένα σταθερό σήμα που σκεδάζετε από την περιοχή (Touzi et al., 1999).

Όπως γίνεται αντιληπτό η ποιότητα της συμβολομετρικής συνάφειας συνδέεται άμεσα με το θόρυβο της συμβολομετρικής φάσης. Θορυβώδης περιοχές συνδέονται με χαμηλή συμβολομετρική συνάφεια και το αντίστροφο. Επομένως και ο υπολογισμός της συμβολομετρικής συνάφειας θα περιέχει μια σειρά από παραμέτρους που μέσα θα είναι και οι πηγές θορύβου της συμβολομετρικής φάσης. Οι παράγοντες που πλαισιώνουν την τελική τιμή της συμβολομετρικής συνάφειας αποτυπώνουν και ένα λόγο/αιτία μη- αποσυσχέτισης (decorellation) της συμβολομετρικής φάσης και είναι οι εξής (Hanssen, 2001):

## $\gamma_{total} = \gamma_{temporal}$ . $\gamma_{geometric}$ . $\gamma_{volume}$ . $\gamma_{thermal}$ . $\gamma_{processor}$ . $\gamma_{DC}$

Περιληπτικά οι παραπάνω παράγοντες αφορούν τα εξής:

γ<sub>temporal</sub> —Χρονική αποσυσχέτιση που προκαλείται από φυσικές αλλαγές στο έδαφος, οι οποίες επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας των σκεδαστών.

γ<sub>geometric</sub> — Γεωμετρικά μη συσχετιζόμενη συνάφεια είναι η διαφορά στις γωνίες εικονοληψίας των δύο συστημάτων για την ίδια γεωγραφική περιοχή.

 $\gamma_{volume}$  — Αποσυσχέτιση όγκου (volume decorrelation), όταν τα αντικείμενα καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο στην επίπεδη επιφάνεια του συμβολογραφήματος.  $\gamma_{thermal}$  — Θερμικός θόρυβος (thermal noise) που προκαλείται από τα χαρακτηριστικά του συστήματος, συμπεριλαμβανομένου τα χαρακτηριστικά της κεραίας.  $\gamma_{processor}$  — Αποσυσχέτιση επεξεργασίας από τον επεξεργαστή που απορρέει από την επιλογή των αλγορίθμων για μια σειρά επεξεργασιών πχ. Coregistration, interpolation, κτλπ.

 $\gamma_{DC}$  —Doppler Centroid decorrelation που προκαλούνται από τα διαφορετικά Doppler κεντροειδή.

#### 3.2.4 Πηγές Αποσυσχέτισης Συμβολομετρικής Φάσης

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι σε μια μονάδα χωρικής ανάλυσης (resolution cell) ενός συμβολογραφήματος περιέχετε πληροφορία όχι μόνο ενός αλλά πολλών σκεδαστών (distributed scatterers). Καθένα από τα οποία μπορεί να αλλάξει στο χρονικό διάστημα μεταξύ δύο SAR εικονοληψιών. Η κύρια επίδραση της παρουσίας πολλών σκεδαστών ανά μονάδα χωρικής ανάλυσης στο πέρας του χρόνου είναι η εισαγωγή του θορύβου φάσης (phase noise) (Hanssen, 2001).

#### 3.2.4.1 Ατμοσφαιρικές Επιδράσεις

Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις αποτελούν την μεγαλύτερη πηγή σφάλματος της συμβολομετρίας. Ο συγκεκριμένος θόρυβος προκύπτει από την ατμοσφαιρική καθυστέρηση του μήκους κύματος του σήματος από ομοιογενούς χαρακτηριστικά ατμοσφαιρικά φαινόμενα. Ιδιαίτερα όταν το συμβολομερτρικό ζεύγος έχει προέλθει από δύο εικόνες SAR διαφορετικής χρονικής εικονοληψίας, το εκάστοτε σήμα μπορεί να επηρεαστεί με διαφορετικό τρόπο από την ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένα η διαφορετική ατμοσφαιρική υγρασία, η θερμοκρασία και η ατμοσφαιρική πίεση μεταξύ των δύο εικόνων συμβάλουν σε ένα ορατό αποτέλεσμα της συμβολομετρικής φάσης. Αυτοί οι παράγοντες προκαλούν στο συμβολογράφημα μια αλλαγή φάσης κατά μήκος της εικόνας με μια πιο ομαλή χωρική μεταβλητότητα (από μερικές εκατοντάδες μέτρα σε λίγα χιλιόμετρα) (Goldstein, 1995; Zebker and Rosen, 1997).

#### 3.2.4.2 Χρονική Αποσυσχέτιση

Συγκεκριμένα η χρονική αποσυσχέτιση (temporal decorrelation) εμφανίζεται σε περιοχές που έχουν κοντά υδάτινες μάζες και πυκνή βλάστηση. Σε τέτοιες περιοχές οι σκεδαστές μπορούν να αλλάξουν από λεπτό προς λεπτό ενώ βραχώδης και αστικές περιοχές παρουσιάζουν μια χρονική σταθερότητα. Περιοριστικός παράγοντας για την χρονική αποσυσχέτιση είναι η επιλογή απεικονίσεων με μικρό χρονικό εύρος.

#### 3.2.4.3 Χωρική Αποσυσχέτιση

Ο συγκεκριμένος όρος διαχωρίζεται σε δύο συνιστώσες. Η πρώτη είναι από το σύστημα SAR με τον θόρυβο του συστήματος και την γεωμετρική αποσυσχέτιση (geometric decorrelation) και η άλλη από την ποσότητα «όγκο της σκέδασης» (volume decorrelation). Η αποσυσχέτιση όγκου (volume decorrelation) παρουσιάζεται όταν αντικείμενα σκεδαστές καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο στην επίπεδη επιφάνεια του συμβολογραφήματος (π.χ. το άνοιγμα των κλαδιών ενός δέντρου). Ενώ η γεωμετρική αποσυσχέτιση όγκου στην επίπεδη επιφάνεια του συμβολογραφήματος (π.χ. το άνοιγμα των κλαδιών ενός δέντρου). Ενώ η γεωμετρική αποσυσχέτιση άκου χέτιση άλου απώλειας συνάφειας εξαιτίας διαφορών στην γεωμετρία λήψης των εικόνων. Σημαντική παράμετρος σε αυτό τον παράγοντα αποσυσχέτισης είναι η βασική συμβολομετρική γραμμή η οποία έχει ένα ανώτερο όριο απόστασης μεταξύ των δύο δορυφόρων, την κρίσιμη συμβολομετρική γραμμή

(critical baseline). Συμβολομετρικά ζεύγη με μεγαλύτερη απόσταση από την κρίσιμη συμβολομετρική γραμμή παράγουν συμβολομετρική φάση που είναι καθαρός θόρυβος. Η κρίσιμη συμβολομετρική γραμμή εξαρτάται από την μορφολογία της περιοχής με κύριο χαρακτηριστικό την κλίση του εδάφους και την απόσταση αισθητήρα-στόχου (Zebker et al., 1992).

#### 3.3 Από το Συμβολογράφημα στην Τοπογραφική πληροφορία.

Αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά σημεία της τεχνικής της συμβολομετρίας και αποτελεί την μετατροπή της συμβολομετρικής φάσης σε τοπογραφική πληροφορία. Ουσιαστικά έχει να κάνει με την αποκρυπτογράφηση της φάσης που αποτελείται από την κυκλική φύση του 2π του σήματος και την μετατροπή του σε υψομετρική πληροφορία. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία ονομάζεται «εκτύλιξη-ξεδίπλωμα της φάσης» (phase unwrapping). Η διαφορά φάσης μεταξύ δύο σημείων του εξομαλυμένου συμβολογράφηματος, παρέχει εικόνα της μεταβολής του υψομέτρου με το υψόμετρα της ασάφειας. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι μία επίπονη διαδικασία και αποτυπώνετε αναλυτικά στην ενότητα της επεξεργασίας-μεθοδολογίας των δεδομένων. Η γενική ιδέα που βασίζεται η εκτύλιξη της φάσης είναι διαγραφή κάθε ακέραιου αριθμού του υψόμετρου της ασάφειας (ισοδύναμο με ακέραιο αριθμό κύκλων φάσης 2π). Η διαδικασία της προσθήκης των ακέραιων πολλαπλάσιων του 2π στο στους συμβολομετρικούς κρροσούς ονομάζεται εκτύλιξη της φάσης.

#### 3.4 Διαφορική Συμβολομετρία

Η διαφορική συμβολομετρία αποτελεί μια εξελεγμένη τεχνική της απλής συμβολομετρίας. Η ανάπτυξη αυτής της τεχνικής είχε ως σκοπό τον εντοπισμό μετακινήσεων της επιφάνειας λόγο γεωφυσικών φαινομένων ή των ανθρώπινων παρεμβάσεων. Ως συμβατική «απλή» συμβολομετρία, ονομάζεται η διαδικασία της δημιουργίας της τοπογραφίας και των σχετικών υψομέτρων δύο συμβολομετρικών ζευγών SAR για μία περιοχή. Η παραπάνω διαδικασία συμβολίζετε ως InSAR SAR interferometry. Η ιδέα για την εξέλιξη της διαφορικής συμβολομετρίας πηγάζει στην παραδοχή ότι αν η τοπογραφία είναι γνωστή, η αντίστοιχη φάση που διαμορφώνει την τοπογραφία στην InSAR μπορεί να αφαιρείται από την συμβολομετρική φάση «διαφορική» τεχνική της InSAR ονομάζετε διαφορική συμβολομετρία (Differential InSAR technique (DInSAR)).

#### 3.4.1 Περιγραφή Λειτουργίας της Διαφορικής Συμβολομετρίας

Διάκριση μεταξύ διαφορικής συμβολομετρίας (differential InSAR technique (DInSAR και συμβατικής «απλής» συμβολομετρίας InSAR είναι καθαρά για τεχνικούς λόγους και εφαρμογών. Διότι η «υπόσταση» της συμβολομετρία αποτελεί εγγενώς διαφορική τεχνική. Επομένως η τεχνική DInSAR κληρονομεί, ως εξέλιξη της InSAR, όλα τα πλεονεκτήματα αλλά και όλα τα μειονεκτήματα όπως ο θόρυβος, οι παράγοντες αποσυσχέτισης, κτλπ. (Fletcher,2007 PartA/PartB).

Η περιγραφή της λειτουργίας αυτής της τεχνικής γίνεται άμεσα αντιληπτή με την ανάλυση ενός παραδείγματος μέτρησης της παραμόρφωσης (Crosetto et al., 2005). Κάνοντας μία αρχική παραδοχή ότι δύο συστήματα SAR εντοπίζουν μια περιοχή πριν και μετά την παραμόρφωση, το συγκριμένο στιγμιότυπο απεικονίζεται στην (Εικόνα 11).



Εικόνα 11 Γεωμετρία Διαφορικής Συμβολομετρίας (Crosetto et al., 2005)

Ο αισθητήρας Μ αποκτά μια πρώτη εικόνα SAR κατά τη χρονική στιγμή t<sub>0</sub>. Ο πρώτος δορυφόρος και η αντίστοιχη εικόνα καλούνται ως κύριες – master προϊόντα. Έτσι έχουμε την πρώτη μέτρηση της φάσης με την κύρια εικόνα και την αντίστοιχη φάση Φ<sub>M</sub>. Η κύρια εικόνα «σημαδεύει» ένα αντικείμενο στόχο P. Στην συνέχεια μετά από ένα χρονικό διάστημα εμφανίζεται μια παραμόρφωση, η οποία έχει μια συγκεκριμένη χρονική εξέλιξη D(t), και το P αντικείμενο υποχωρεί στο προς P<sup>1</sup>. Ο αισθητήρα S αποκτά μια δεύτερη εικόνα SAR κατά τη χρονική στιγμή t. Τα επόμενα προϊόντα μετά την κύρια ονομάζονται ως «δευτερεύοντα» Slave. Επομένως μετριέται φάση Φ<sub>s</sub>.

Παρατηρώντας το συγκεκριμένο στιγμιότυπο με την σκοπιά της απλής συμβολομετρίας. Βέβαια υποθέτουμε ότι δεν υπάρχει παραμόρφωση δηλαδή το έδαφος είναι σταθερό και Ρ συμπίπτει με P<sup>1</sup>. Η InSAR παράγει την συμβολομετρική φάση ΔΦ<sub>InSAR</sub> που είναι η διαφορά φάσης Φ<sub>M</sub> και Φ<sub>s</sub>. Η πληροφορία της συμβολομετρική φάση Δφ<sub>InSAR</sub> είναι το βασικό στοιχείο για την παραγωγή DEM.

$$\Delta \Phi_{\text{InSAR}} = \Phi_{\text{M}} + \Phi_{\text{s}} + \Phi_{\text{NOISE}} + \Phi_{\text{ATMOSPHER}}$$

Έτσι όταν το σημείο μετακινείται από το P στο P<sup>1</sup>, εκτός από το τοπογραφική φάση Φ<sub>ΤΟΡΟGRAPHY</sub> = Φ<sub>M</sub> + Φ<sub>s</sub>, προστίθεται και μία ακόμα φάση λόγο της παραμόρφωσης και της μετακίνησης του στόχου Φ<sub>MOVEMENT</sub>. Επομένως ο τύπος και η διαφορική συμβολομετρική φάση για την τεχνική DInSAR.

#### $\Delta \Phi_{\text{DInSAR}} = \Phi_{\text{TOPOGRAPHY}} + \Phi_{\text{NOISE}} + \varphi_{\text{ATMOSPHER}} + \Phi_{\text{MOVEMENT}}$

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, η ιδέα για την εξέλιξη της διαφορικής συμβολομετρίας πηγάζει στην προϋπόθεση ότι η τοπογραφία είναι γνωστή. Έτσι στον τύπος της διαφορικής συμβολομετρικής φάσης η «γνωστή» τοπογραφική πληροφορία επομένως και φάση Φ<sub>KNOWN TOPOGRAPHY</sub> αφαιρείται από τις υπόλοιπες συνεισφέρουσες φάσεις.

#### $\Delta \Phi_{\text{DInSAR}} = \Phi_{\text{NOISE}} + \phi_{\text{ATMOSPHER}} + \Phi_{\text{MOVEMENT}} - \Phi_{\text{KNOWN TOPOGRAPHY}}$

Ενώ τέλος για ένα δεδομένο pixel, στην περίπτωσή μας το αντικείμενο P, δίνεται η δυνατότητα του υπολογισμού της φάσης του τοπογραφικού σφάλματος Φ<sub>ΤΟΡΟGRAPHY-</sub> RESUDALS σε συνάρτηση με ένα DEM και της κύριας συμβολομετρικής γραμμής.

34

#### $\Delta \Phi_{\text{DInSAR}} = \Phi_{\text{NOISE}} + \phi_{\text{ATMOSPHER}} + \Phi_{\text{MOVEMENT}} + \Phi_{\text{TOPOGRAPHY-RESUDALS}}$

Για να γίνει γνωστή η τοπογραφική πληροφορία και κατ' επέκταση η φάση Φ<sub>κνοwν</sub> τοροgraphy υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι που χρησιμοποιούν διαφορετικό τρόπο προσδιορισμού της.

Η πρώτη είναι η απλή διαφορική συμβολομετρία ή απλή συμβολομετρία, η (two-pass) μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί μια εξωτερική πηγή τοπογραφίας, όπως το υψομετρικό μοντέλο επιφάνειας (Digital Elevation Model), που μετατρέπεται σε συντεταγμένες ραντάρ με την βοήθεια της κύριας συμβολομετρικής γραμμής. Δεδομένου ότι για πολλές περιοχές του κόσμου υπάρχουν διαθέσιμα DEM, αποτελεί μία από τις πιο εφικτές προσεγγίσεις. Βέβαια σε αυτή την μέθοδο γίνεται μια προσπάθεια προσδιορισμού των λαθών που έχει το εκάστοτε DEM (Massonnet et al.1993).

Μια δεύτερη μέθοδος είναι η λεγόμενη (three-pass) μέθοδος. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται ένα άλλο συμβολομετρικό ζευγάρι που εντοπίζει την ίδια περιοχή και παράγει την τοπογραφική πληροφορία με τις μεθόδους απλής συμβολομετρίας. Το συγκεκριμένο συμβολομετρικό ζεύγος ονομάζετε και τοπογραφικό ζευγάρι. Αυτό το ζεύγος θεωρείται ότι δεν έχει καμία παραμόρφωση και η βασική συμβολομετρική γραμμή του είναι κατάλληλη έτσι ώστε να αποδώσει ευαισθησία στην τοπογραφία και μια επαρκής συνοχή. Έτσι αφαιρείτε από το συμβολομετρικό ζευγάρι που έχει υποστεί παραμόρφωση και παράγει το διαφορικό συμβολογράφημα (differential interferogram). Βασική προϋπόθεση αυτής της μεθοδολογίας είναι ότι μεταξύ των δύο ζευγαριών πρέπει να υπάρχει μια κοινή εικόνα (Zebker et al., 1994b). Στην περίπτωση που τα δύο ζεύγη δεν μπορούν να βρουν μία κοινή εικόνα λόγο μεγάλης απόστασης της βασικής συμβολομετρικής γραμμής και κατ επέκταση μειωμένης συνάφειας.

Υπάρχει και η (four-pass) μέθοδος που το τοπογραφικό ζευγάρι είναι ανεξάρτητο του ζευγαριού που παράγει την παραμόρφωση. Βασικό συστατικό αυτής της μεθόδου είναι η καλή συμπροσαρμογή co-registration των εικόνων για να υπερθεθεί καλά η μία πάνω στην άλλη.

35

#### 3.4.2 Τεχνικές Διαφορικής Συμβολομετρίας

Τα τελευταία χρόνια έχουν δημιουργηθεί μια σειρά από τεχνικές που έχουν αναπτύξει τις δυνατότης των DInSAR σε πάρα πολλές τεχνικές . Οι τεχνικές DInSAR μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

A)DInSAR με ένα μόνο συμβολομετρικό ζεύγος (Conventional).

B)DInSAR με σώρευση εικόνων (Stacking).

Γ)DInSAR που βασίζεται στους σταθερούς σκεδαστές που έχουν επιλεγεί από πολλαπλές εικόνες (Permanent Scatters).

Η κάθε τεχνική πλαισιώνεται με μία σειρά από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που τις κάνουν να διαφέρουν μεταξύ τους και να έχουν ένα συγκεκριμένο φάσμα εφαρμογών. Το πρώτο χαρακτηριστικό είναι ο αριθμός των απαιτούμενων εικόνων SAR. Η πρώτη κατηγορία (A) αποτελεί την παραδοσιακή προσέγγιση DInSAR, που απαιτεί ένα συμβολομετρικό ζευγάρι. Οι άλλες δύο τεχνικές χρησιμοποιούν χρονοσειρές με συμπροσαρμοσμένες εικόνες (co-registration) SAR. Η συγκεκριμένη δομή ονομάζεται σώρευση (stacking) και αποτελεί μια στοίβα δεδομένων με μια συγκεκριμένη χρονοσειρά εικόνων. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό της στοίβας των δεδομένων αποτελεί και το παράγοντα για τον εντοπισμό της παραμόρφωσης. Άλλο ένα χαρακτηριστικό είναι η επιλογή του κατάλληλου εικονοστοιχείου (pixe)Ι που θα υποδείξει την μετατόπιση της επιφάνειας. Οι δύο πρώτες τεχνικές (A και B), χρησιμοποιούν την πληροφορία την συνοχής για την επιλογή του σημείου. Από την άλλη η κατηγορία (Γ), βασίζεται στις στοίβες των εικόνων και χρησιμοποιώντας ως κριτήριο τη σταθερότητα του πλάτους SAR στο pixel (Ferretti et al. 2000).

Παρόλα αυτά η τεχνική της διαφορικής συμβολομετρίας Σώρευσης Stacking παρουσιάζει κάποιους σημαντικούς περιορισμούς (Parcharidis et al., 2009):

- Η χαμηλή συνάφεια λόγω του μεγάλου χρονικού διαστήματος μεταξύ των λήψεων
  των απεικονίσεων.
- Τα μεγάλα ανύσματα βάσης τα οποία οδηγούν σε χαμηλή συσχέτιση λόγω της φασματικής μετατόπισης των στόχων.
- Προβλήματα στην εκτύλιξη (unwrapping) των συμβολογραφημάτων με μεγάλα ανύσματα βάσης
Ατμοσφαιρικές επιδράσεις λόγω των υδρατμών και της πυκνότητας των ηλεκτρονίων που υπάρχουν στην ιονόσφαιρα

## 3.4.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση - Εφαρμογές Διαφορικής Συμβολομετρίας

Η τεχνική αυτή έχει αποδώσει μία σειρά από πολλές εφαρμογές και μελέτες που εντοπίστηκαν από διάφορα αίτια (γεωφυσικά και τεχνικά) παραμορφώσεις της επιφάνειας. Στην συνέχεια παρατίθεται ένας πίνακας (Πίνακας 4) με τις εφαρμογές της Διαφορικής Συμβολομετρίας κατανεμημένες με την αιτία παραμόρφωσης της επιφάνειας.

Location	Study Area and Events	Research and Publications
		Seismology
California	Landers earthquake	Massonnet et al. 1993, Massonnet et al. 1994, Massonnet et al. 1996, Zebker et al. 1994b, Peltzer et al. 1994, Peltzer and Rosen 1995, Feigl et al. 1995, Hernandez et al. 1997, Price and Sandwell 1998, Miche et al. 1999
	Eureka valley earthquakes	Massonnet and Feigl 1995, Peltzer and Rosen 1995
	Northridge earthquake	Massonnet et al. 1994, Murakami et al. 1996, Kawiami and Shimada 1994
	Hector erthquake	Sandwell et al. 2000
	San Anfreas fault and earthquake	Rossen et al. 1998, Burgmann et al. 2000
	Fermont and San Jose	Colesanti et al. 2003
Japan	Kode earthquake	Ozawa et al. 1997
	Kagoshima - Kenhokuseibu earthquake	Fujiwara et al. 1998
Italy	Califorito, Umbria- Marche	Stramondo et al. 1999
	L ' Aquila	Papanikolaou, 2010
Crease		Mayor at al. 1000. Clarks at al. 1000
Greece	Grevena earthquake	Kontoes et al. 2000 Douustance 2009
Turkey	Izmit earthquake	Barnieri et al. 1999, Hanssen et al. 2000, Reilinger et al 2000
	North Antolian Fault	Wright et al. 2001

China	Tohoku	Fukushima et al., 2011

	V	olcaniology
Italy	Etna	Massonnet et al. 1995, Briole et al. 1997, Delacourt et al.1997, Lanari et al. 1998, Williams and Wadge 1998
	Campi Flegrei	Usai et al. 1999, Avallone et al. 1999
	Colli Albani	Salvi et al. 2004
Japan	lwo Jima	Ohkura 1998
	Izu peninsula	Fuliwara et al. 1998
	Unzen	Fujii et al. 1994
Iceland	Krafla spreading segment	Sigmundsoon et al. 1997
	Vatnajokull	Roth et al. 1997, Thiel et al.1997
Alaska	Katmai	Lut et al. 1997, Lu and Freymueller 1999
	Okmok	Lut et al. 2000
Hawaii	Kilauea	Mouginis-Mark 1995, Rossen et al. 1996, Zebker et al. 1997
Galabangos		Mouginis-Mark 1995, Jonnson et al. 1999, Amelung et al. 2000

Landslides							
France	Saint Etiene	Carnec et al. 1996, Fruneau et al. 1996,					
	Fench Alps and Pyreneus	Delacourt et al. 2004					
California	Fermont and San Jose	Colesanti et al. 2003					
	El Ninio Envent	Hilley et al. 2004					

Ground Subsidences and Uplifts						
California	Imperial Valey	Gabriel et al. 1989				
	Antelope Valey	Galloway et al. 1998				
	Pamona	Ferreti et al. 2000				
France	Gardanne	Carnec et al. 1996				
	Paris	Fruneau et al. 1998				
Nevada	Las Vegas	Amelung et al. 1999, Hoffman et al. 2001				

Italy	Naples	Tessauro et al. 2000				
	Campania	Lanari et al. 2004				
	Geothermal Fields	Massonnet et al. 1996, Hanssen et al. 1998, Jonnson et al. 1998, Carnec and Fabriol 1999, Fialko and Simsons 2000				
		Glaciology				
Gree	<b>nland</b> Kwok a	nd Fahnestock 1996,Rignot et al. 1997, Joughin et al. 1999,				
	Mohr et al. 1998, Hoen and Zebker 2000					
Anta	rctica Goldste	in et al. 1993, Rott et al. 1998, Joughin et al. 1999				

Πίνακας 4 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση - Εφαρμογές Διαφορικής Συμβολομετρίας

Οι παραπάνω εφαρμογές αποδεικνύουν ότι η τεχνική της DInSAR είναι μία νέα τεχνολογία με σημαντικές εφαρμογές. Τα τελευταία 20 χρόνια έχει καταγραφεί μια πληθώρα μελετών πάνω σε ένα μεγάλο φάσμα επισήμων με ποιοτικά αποτελέσματα. Η τεχνική της συμβολομετρίας και της DInSAR ερευνά μια σειρά φαινομένων (φυσικών και τεχνικών) που προκαλούν μια παραμόρφωση στην γήινη επιφάνεια.

Όπως είναι φυσικό ένα μεγάλο φάσμα μελετών εστιάζει στην σεισμική και κατ΄ επέκταση τεκτονική δραστηριότητα. Ανάλογα με την χρονική σειρά των δεδομένων που έχουμε για το εκάστοτε σεισμικό φαινόμενο υπάρχουν τρείς κατηγορίες μετρήσεων preseismic, coseismic και postseismic παραμόρφωση. Η μέτρηση preseismic είναι η παραμόρφωση που προηγείται ενός σεισμικού γεγονότος (δύο εικόνες πριν). Από την άλλη η μέτρηση coseismic αποτελεί τον προσδιορισμό της έκτασης σε ένα σεισμικό γεγονός (μια εικόνα πριν και μία μετά). Ενώ η μέτρηση postseismic είναι για τις παραμορφώσεις μετά από το σεισμικό γεγονός (δύο εικόνες μετά), αντίστοιχα. Χαρακτηριστικό των μετρήσεων είναι η ακρίβεια και η πρωτοφανής ανάλυση σε σχέση με τις άλλες συμβατικές και επίγειες τεχνικές. Αντίστοιχες μετρήσεις γίνονται και στην παρατήρηση των ηφαιστείων με μεγαλύτερη έμφαση στην περίοδο πριν την έκρηξη ή εκτόνωση του.

Η παρούσα εργασία ανήκει στην παραπάνω ερευνητική ενότητα. Συγκεκριμένα χρησιμοποίει την τεχνική της σώρευσης των διαφορικών συμβολογραφημάτων για να μελετήσει την παραμόρφωση του σεισμικού φαινομένου της σμηνοσειράς του Απριλίου του 2007 στην περιοχή της λίμνης της Τριχωνίδας.

Το φαινόμενο των κατολισθήσεων αποτελεί ένα παράγοντα παραμόρφωσης του εδάφους. Βασικό εργαλείο προσδιορισμού αυτού του φαινομένου είναι η εικόνα της συνοχής και πιο συγκεκριμένα η έλλειψη συνοχής σε μια περιοχή. Ενώ παρατηρείται και μία σειρά μελετών να χρησιμοποιεί την τεχνική των σταθερών σκεδαστών (Permanent Scatters) με πολύ καλά αποτελέσματα προσδιορισμού των μετατοπίσεων.

Μια ακόμα χαρακτηριστική εφαρμογή της τεχνικής DInSAR είναι η παρατήρηση των παγετώνων. Περιοχές «δύσβατες» προς μετρήσεις, όπως αυτές των παγετώνων, με την τεχνική αυτή αποδίδουν ακριβείς μετρήσεις τοπογραφίας και μετακίνησης τους. Πληροφορίες πολύ σημαντικές για τις επιστημονικές ενότητες όπως η υπερθέρμανση του πλανήτη και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας.

Τέλος εκτός από τα φυσικά αίτια, υπάρχουν και τα τεχνικά αίτια που παράγονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Συγκεκριμένα οι εξορυκτικές δραστηριότητες όπως του νερού, του φυσικού αερίου, του πετρελαίου, του άλατος, ή άλλων ορυκτών πόρων προκαλούν καθιζήσεις ή και ανατάσεις της επιφάνειας της γης. Επιπλέον, τα τεχνικά έργα, ανάλογα με το μέγεθος τους προκαλούν αντίστοιχες παραμορφώσεις.

Περιοχή Μελέτης

### 4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η γεωγραφική περιοχή που εστιάζει η συγκεκριμένη μελέτη είναι η λίμνη Τριχωνίδα και οι γύρο περιοχές της. Η περιοχή είναι στο δυτικό τμήμα της Στερεάς Ελλάδας στον νομό Αιτωλοακαρνανίας, νότια του Παναιτωλικού όρους και βόρεια του Αρακύνθου, μεταξύ των πόλεων Μεσολογγίου και Τριχωνίδας.

#### 4.1 Ανθρωπογεωγραφία

Γύρο από την έκταση της λίμνης, έχει αναπτυχτεί ένα μεγάλο οικιστικό δίκτυο με μία σειρά από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Συγκεκριμένα στην περιοχή μελέτης μας, που είναι οι παραλίμνιες περιοχές, εντοπίζονται πέντε δημοτικά διαμερίσματα οι Δήμοι Αρακύνθου, Θέρμου, Θεστιέων, Μακρυνείας και Παραβόλας. Το διοικητικό, εμπορικό, συγκοινωνιακό και πολιτιστικό κέντρο της περιοχής αποτελεί το δημοτικό διαμέρισμα του Θέρμου ανατολικά της λίμνης. Στον δήμο αυτό εδρεύουν ο οικισμός της Μυρτιάς, γνωστό για τα λουτρά και τους πορτοκαλεώνες του, της Αγίας Σοφίας και του Πετροωρίου. Στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης εντοπίζεταλι ο δήμος Θεστιέων με αξιοσημείωτους οικισμούς το Παναιτώλιο, το Καινούργιο και τη Νέα Αβώρανη. Ενώ ο δήμος Παραβόλας περιλαμβάνει τους σημαντικούς οικισμούς της Παντάνασσας και του Ντουγρίου. Στην νότιο τμήμα της περιοχή είναι ο δήμος Μακρυνείας, με τους οικισμούς του Γαβαλού, του Τριχωνίου, του Άγιου Ανδρέας και της Δαφνιάς. Ενώ τέλος στο δυτικό τμήμα είναι ο δήμος Αρακύνθου με τους οικισμούς της Ματαράγκας, τις Παπαδάτες και του Γραμματικού.

Η κύρια δραστηριότητα των κατοίκων είναι η πρωτογενής αλιεία, η αγροτική και η κτηνοτροφική παραγωγή. Η άρδευσή των κτημάτων πραγματοποιείται με απευθείας άντληση υδάτων από τις λίμνες. Οι αρδευόμενες καλλιέργειες της περιοχής αποτελούνται από ελιές, εσπεριδοειδή, καπνά, ψυχανθή, βαμβάκι και οπωροκηπευτικά. Η κτηνοτροφική παραγωγή, εμφανίζεται τόσο σε μονάδες παραγωγής (χοιροτροφεία, βουστάσια, αιγοπροβατοτροφεία), όσο και σε ελεύθερη μορφή. Ενώ σε μικρότερη κλίμακα κάνει την εμφάνιση του και ο δευτερογενής τομέας με μικρές ομάδες τυροκομίας, ελαιοτριβείων και ιχθυοκαλλιέργειας. Οι χρήσεις γης και το οικιστικό δίκτυο της περιοχής φαίνονται στο παρακάτω χάρτη (Εικόνα 12).



Εικόνα 12 Χάρτης Χρήσεις Γής Περιοχής Μελέτης Τριχωνίδας

# 4.2 Γεωμορφολογία

Η περιοχή μελέτης επικεντρώνετε στην λίμνη και τις παραλίμνιες περιοχές. Η Τριχωνίδα εντοπίζεται στο χαμηλότερο τμήμα της τάφρου της πεδιάδας του Αγρινίου που εκτίνεται δυτικά από την λίμνη και μεταξύ των δύο ορεινών όγκων Παναιτωλικού στα βορειοανατολικά και Αράκυνθου στα δυτικά. Το σχήμα της είναι νεφροειδές με την κοίλη όχθης του προς τα νότια (Εικόνα 13).

Η Τριχωνίδα είναι η μεγαλύτερη λίμνη της Ελλάδας έχει επιφάνεια 98,6 τ.χλμ, μέγιστο μήκος 19 χιλιόμετρα και μέγιστο βάθος 58 μέτρα ενώ ο όγκος νερού ανέρχεται στα 142 εκ.κυβικά.. Τα 58 μέτρα βάθους της λίμνης είναι κάτω από τη μέση στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας και εμφανίζουν το φαινόμενο του κρυπτοβύθισματος. Ενώ ο πυθμένας της παρουσιάζει ασυμμετρία με τα μεγαλύτερα βάθη να εκτοπίζονται ανατολικά με κλίση βυθίσματος από Β/ΒΔ προς Ν/ΝΑ.

Ανατολικά η μορφολογική κλίση των βουνών είναι μεγάλη κάτι που αποτυπώνεται και στις ανατολικές ακτές της λίμνης ενώ το υπόλοιπο τμήμα της η μορφολογία είναι ομαλή. Η λίμνη τροφοδοτείται από τις γύρω λεκάνες απορροής, κυρίως υπόγεια αλλά και επιφανειακά δίκτυα, τα οποία ξεκινούν από το Παναιτωλικό και το Αράκυνθο όρος και καταλήγουν στη λίμνη. Επίσης η λίμνη Τριχωνίδα συνδέεται με τεχνική διώρυγα στα δυτικά με την λίμνη Λυσιμαχία που και την τροφοδοτεί με το πλεονάζων νερό της (Ψιλοβίκος και άλλοι, 1998).



Εικόνα 13 Γεωμορφολογικός Χάρτης Περιοχής Μελέτης Τριχωνίδας

Περιοχή Μελέτης

#### 4.3 Γεωλογία – Τεκτονισμός

Οι βασικοί γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή προέρχονται από δύο γεωτεκτονικές ενότητες των ελληνίδων, την ενότητα της Πίνδου και του Γαβρόβου. Τα βασικά είδη των πετρωμάτων που διακρίνονται είναι ανθρακικά (κυρίως λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθοι) και φλύσχης. Συγκεκριμένα οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εντοπίζονται είναι ασβεστόλιθοι του Σενωνίου, Παλαιοκαίνου και Ηωκαίνου υπόλευκοι και συνήθως πλακώδης. Ενώ οι φλύσχης που εντοπίζοντε πάνω από τους ασβεστόλιθους, παρουσιάζουν στρωμματικές εναλλαγές αργιλομαργαϊκών με ψαμμίτες, κυρίως στους ανώτερους ορίζοντες (Doutsos et al.,1987).

Στην Τριχωνίδα υπάρχουν δύο μεγάλα ρήγματα, το ένα βρίσκεται βόρεια και το άλλο νότια της λίμνης. Αυτοί οι δύο σχηματισμοί συντελούν σε ένα βύθισμα με διεύθυνση από βορειοδυτικά προς νοτιοανατολικά με μήκος 32Km και πλάτος 10Km (Doutsos et al.,1987). Το βύθισμα της Τριχωνίδας είναι περίπου παράλληλο με τον Πατραϊκό και Αμβρακικό κόλπο ενώ στα ανατολικά έρχεται και τέμνει τις δομές της γεωτεκτονικής ενότητες της Πίνδου. Το επόμενο χαρακτηριστικό του βυθίσματος αυτού είναι, ότι είναι «north-dipping» δηλαδή κλίνει προς τον βορά όπου το νότιο τμήμα του είναι επικαλυμμένο από αλλουβιακά ριπίδια (Doutsos et al.,1987). Παρόλα τα τεκτονικά χαρακτηριστικά του βυθίσματος, δεν έχουν αποδείξει κάποια σχέση με την παρουσία μεγάλων και συνεχόμενων σεισμικών δραστηριοτήτων στην περιοχή (Goldsworthy et al., 2002) (Εικόνα 14).

Τέλος να σημειωθεί ότι η λίμνη Τριχωνίδα είναι υπόλειμμα παλαιότερης και μεγαλύτερης λίμνης που καταλάμβανε παλαιότερα ολόκληρη τη λεκάνη της γεωγραφικής περιοχής του Αγρινίου. Η λίμνη θεωρείται ότι είναι τεκτονικής προέλευσης. Ο σημερινός σχηματισμός προέκυψε από την παρουσία των δύο ρηγμάτων και της παλαιάς λεκάνης της Αιτωλοακαρνανίας, η οποία κάλυπτε την περιοχή την περίοδο του Πλειοκαίνου.



Εικόνα 14 Γεωλογικός και Τεκτονικός Χάρτης Περιοχής Μελέτης Τριχωνίδας

### 4.4 Γεωδυναμικός Χαρακτήρας της Περιοχής.

Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η παρατήρηση της «κινητικότητας» και κατά βάση των τεκτονικών κινήσεων της περιοχής βάσει γεωδαιτικών μεθόδων. Το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS) το οποίο βασίζεται στις αρχές λειτουργίας των παθητικών συστημάτων μπορεί να αποδώσει έμμεσα μέτρηση μηκών, με τον υπολογισμό του χρονικού διαστήματος που χρειάζεται να επιστρέψει το σήμα από ένα σημείο στο άλλο έχοντας γνωστή την σταθερά που είναι η ταχύτητα του φωτός. Ενώ προσδιορίζοντας ένα σημείο αναφοράς γνωστών συντεταγμένων δίνεται η δυνατότητα του προσδιορισμού, βάσει κάποιον μεθόδων, της σχετικής θέσης όηλαδή του διαφορικού εντοπισμού της θέσης (Differential GPS Positioning). Επομένως έχοντας ένα δίκτυο σταθερών GPS σταθμών (Γεωδαιτικού Δικτύου) σε μία περιοχή με την συνεχή καταγραφή της θέσης τους δίνεται η δυνατότητα αποτύπωσης του γεωδυναμικού χαρακτήρα της περιοχής.

Για την περιοχή μελέτης της αντλήθηκαν δεδομένα καταγραφών GPS παλαιότερων εργασιών πεδίου των Hollenstein et al, 2008 (Πίνακας 5). Βασικό χαρακτηριστικό είναι ότι, για την ευρύτερη περιοχή της Τριχωνίδας, δεν υπάρχει μεγάλος αριθμός γεωδαιτικών παρατηρήσεων. Γεγονός που αποδίδεται πιθανά στο περιορισμένο ενδιαφέρων της επιστημονικής κοινότητας για την περιοχή, μέχρι το σεισμικό γεγονός της σμηνοσειράς τους Απριλίου του 2007. Ο πλησιέστερος σταθμός από το δίκτυο εντοπίστηκε στα βόρειοανατολικά του Αγρινίου σε απόσταση περίοχή μελέτης στα νότιοδυτικα και τον οικισμό Ευπάλιο, βόριο δυτικά στο δέλτα του Μόρνου σε απόσταση 50,5km. Ο σταθμός αυτός (Σταθμός-ΙΟΟΟ) δεν έχει τόσο πολύ μεγάλη σημασία για την περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας αλλά αποτυπώνει το γενικότερο γεωδυναμικό χαρακτήρας της περιοχής.

Long. deg.	Lat. deg.	Ve mm/y	Vn mm/y	dVe mm/y	dVn mm/y	Cova/nce	First Occ/tion	Last Occ/tion	Duration yrs	Ν	Station
							yrs	yrs			
21.486	38.655	-6.4	-6.6	0.6	0.6	-0.08	1998.80	2004.82	6.02	4	PRSL
21.903	38.445	-11.4	-7.8	1.2	1.3	-0.03	1991.69	2001.74	10.05	7	1000

Πίνακας 5 Δεδομένα GPS Πηγή Hollenstein et al, 2008

Στο πίνακα (Πίνακας 5) αποτυπώνονται τα χαρακτηριστικά των δύο σταθμών. Αρχικά καταγράφεται η ακριβής γεωγραφική θέση του σταθμού με τις συντεταγμένες (φ,λ). Στην συνέχεια αποτυπώνονται οι ταχύτητες (mm/yrs) στον άξονα Ανατολή - Δύση (Ve) και στον άξονα Βορρά – Νότου (Vn). Τα dVe και dVn είναι τα σφάλματα ταχυτήτων στις επιμέρους συντεταγμένες. Επίσης αποτυπώνετε η συνδιακύμανση (covariance) των τιμών καθώς και οι ημερομηνίες των πρώτων και τελευταίων μετρήσεων με την συνολική περίοδο τους. Τέλος εμφανίζεται ο αριθμός των μετρήσεων για κάθε σταθμό καθώς και η κωδική ονομασία τους.



Εικόνα 15 Γεωδυναμικός χαρακτήρας της περιοχής μελέτης. Μετρήσεις GPS/ Σταθμοί PRSL και ΙΟΟΟ/ Πηγή Hollenstein et al, 2008

Στον χάρτη (Εικόνα 15) αποτυπώνεται ο γεωδυναμικός χαρακτήρας της περιοχής με της ταχύτητες να αποδίδουν μία νοτιοδυτική κίνηση για την περιοχή. Ο σταθμός (Σταθμός-PRSL) με διάρκεια 6 περίπου χρόνων από το 1998 μέχρι το 2004 που εντοπίζεται στα βορειοδυτικά της πόλις του Αγρινίου σε απόσταση 6,5 km. αποτυπώνει ταχύτητες -6,4 mm/yrs στον άξονα Ανατολή - Δύση (Ve) και -6,6 mm/yrs στον άξονα Βορρά – Νότου (Vn). Η «κινητικότητα» των τεκτονικών κινήσεων της περιοχής είναι πριν το σεισμικό γεγονός της σμηνοσειράς τους Απριλίου του 2007, χαρακτηριστικό που φανερώνει την γεωδυναμική δραστηριότητα της περιοχής και πριν το σεισμό. Τα ίδια μοτίβα (patterns) κίνησης αποτυπώνει και ο άλλος σταθμός (Σταθμός-Ι000), χαρακτηριστικό που αναδεικνύει το ευρύτερο τεκτονικό και γεωδυναμικό καθεστώς της Δυτικής Ελλάδας

## 4.5 Σεισμικότητα

Η σεισμική δραστηριότητα της περιοχής έχει καταγραφεί από πάρα πολύ παλιά. Η μεγαλύτερη χωρική κατανομή των σεισμικών φαινομένων εντοπίζεται στην νοτιοανατολική έκταση της λίμνης. Υπάρχουν καταγραφές από το 1841 για την περιοχή, που αποτύπωναν ότι κατά μέσο όρο ετήσιος μέχρι το 1959 γινόταν ένας σεισμός του μεγέθους 5 βαθμών της κλίμακας Mercalli-Sieberg<sup>1</sup>. Επίσης έχουν καταγραφεί μία σειρά από σεισμικά γεγονότα πού είναι άξιας αναφοράς στο παρελθόν.

- Στις 31 Φεβρουαρίου 1885, στην γεωγραφική περιοχή 38° ½ .6 N, 23° ¾ Ε. ένας
  ισχυρός σεισμός προκάλεσε μεγάλες καταστροφές στην πόλη του Αγρινίου.
- Στις 4 Οκτωβρίου 1949 στην περιοχή Αετολιά 38° ½ .6 N, 21° 8 E , M=5.1 με μετασεισμό M=5 ¼ , προκάλεσε τεράστιες ζημίες στον οικισμό Θέρμον.
- Στις 30 Νοεμβρίου 1953, στις 13:20:58, 38°.5 N, 21°.4E, Βαθμού VIII, στο νότιο τμήμα της λίμνης Τριχωνίδας.
- Στις 21 Δεκεμβρίου 1955, στις 21:40:24, 38° .6 N, 21° .4E, M=5 ¼, στο Νοτιοδυτικό τμήμα της λίμνης Τριχωνίδας.
- Στις 5 Μαΐου 1960, στις 08:17:32, 38° ½ .6 N, 21° ½ Ε, Μ=5 ¼ , στο Νότιο τμήμα της λίμνης Τριχωνίδας.
- Ενώ το 1975 από το Ιούνιο μέχρι το Δεκέμβριο υπήρξε μια ακολουθία σεισμών στο νότιο τμήμα της λίμνης. Με αποκορύφωμα την υψηλή σεισμική δραστηριότητα στις 30 Ιουνίου με 6 σεισμούς με M>5 και άλλους δύο αντίστοιχους τις 21 και 31 Δεκεμβρίου (Papazachos et al., 1997; Evangelidis et al., 2008; Kiratzi et al., 2008).

## 4.5.1 Η Σμεινοσηρά σεισμών (earthquake swarm) τον Απρίλιο του 2007

## Τι είναι η σμεινοσηρά σεισμών (earthquake swarm);

Είναι συνεχή σεισμικά γεγονότα που εντοπίζονται σε μία μικρή γεωγραφική περιοχή (τοπικά) σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Το χρονικό διάστημα που χρησιμοποιείται για να καθορίσει το πλήθος των σεισμών ποικίλλει, αλλά ο

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Η ένταση ενός σεισμού εκφράζεται με εμπειρικό τρόπο είτε σε βαθμούς της αναθεωρημένης κλίμακας Mercalli (MM) ή σε βαθμούς της κλίμακας Mercalli-Sieberg (MKS) και είναι η φυσική ποσότητα που δίνει το μέτρο των αποτελεσμάτων ενός σεισμού στους ανθρώπους και στις ανθρώπινες κατασκευές.

Περιοχή Μελέτης

οργανισμός των United States Geological Survey (Γεωλογικός Οργανισμός Ηνωμένων Πολιτείων) επισημαίνει ότι ένα γεγονός μπορεί να είναι της τάξης των ημερών, των εβδομάδων ή ακόμη και μηνών. Διαφοροποιείται από το φαινόμενο του σεισμού και την μετασεισμική ακολουθία, με την παρατήρηση ότι κανένας από τους σεισμός στην ακολουθία δεν είναι ο κύριος. Συνήθως το σεισμικό φαινόμενα της σμηνοσειράς παρατηρείται σε περιοχές ηφαιστείων πριν την εκδήλωση ενός φαινομένου σεισμικής δραστηριότητας (USGS, 2008).

Στην περιοχή μελέτης το πιο πρόσφατο και αξιοσημείωτο σεισμικό φαινόμενο, που αποτέλεσε και ως άξονας για στην παρούσα μελέτη, είναι μια σειρά ισχυρών σεισμών στο νοτιοανατολικό τμήμα της λίμνης τον Απρίλιο του 2007. Το συγκεκριμένο φαινόμενο επειδή είχε πολύ μικρή σε έκταση χωρική κατανομή σε συνδυασμό με την ακολουθία του χαρακτηρίζεται ως σμήνος ή σμηνοσειρά σεισμών (earthquake swarm). Η σμηνοσειρά άρχισε με μικρές εκδηλώσεις, στις 9 Απριλίου και δύο μέρες αργότερα εκδηλώθηκαν τα τρία ισχυρότερα συμβάντα της όλης ακολουθίας (10 Απριλίου στις 3:17, 07:15 και 10:41 GMT), με μεγέθη που κυμαίνονται από 5,0Mw έως 5.2Mw (Πίνακας 6). Η σεισμική δραστηριότητα συνεχίστηκε για περισσότερο από ένα μήνα με μικρότερα μεγέθους συμβάντα (Εικόνα 16) (Evangelidis et al., 2008) (Kiratzi et al., 2008).

Η συγκεκριμένη σεισμική δραστηριότητα έγινε αντιληπτή στις γύρω περιοχές. Με τις πιο σοβαρές ζημίες να αναφέρονται στο Θέρμο 5 χλμ BA των επικέντρων των σεισμών. Σημαντικό βαθμό σε αυτό έπαιξε, εκτός από το μέγεθος η επιφανειακή εκδήλωση της σμηνοσειράς που εντοπίστηκε σε βάθη μικρότερα των 27km έως και 2km. Εκτός όμως από την καταγραφή της σμηνοσειράς μελέτες κατέληξαν ότι η συγκεκριμένη σεισμική δραστηριότητα δεν συσχετίζετε με τα δύο μεγάλα ρήγματα της λίμνης Τριχωνίδας στο βόριο και το νότιο τμήμα της. Αλλά στην παρουσία δύο ενεργών ρηγμάτων στην ανατολική όχθη της λίμνης με διεύθυνση Βόρειο – Βορειοδυτική και το άλλο Ανατολική – Νοτιοανατολική (Evangelidis et al., 2008) (Kiratzi et al., 2008) (Sokos et al., 2007).

Επίσης με κατάλληλες μεθόδους κατάφεραν να αποδείξουν ότι και η σεισμική δραστηριότητα του 1975 συσχετιζόταν με αυτά τα ρήγματα. Ενώ τέλος έχει

παρατηρηθεί μία αριστερή πλάγια συνιστώσα του διανύσματος της ολίσθησης. Που πιθανόν να οφείλετε στην κάθετη περιστροφής στον άξονα του φλοιού και του αριστερού ρήγματος που συνδέει με τις ρηξιγενείς ζώνες, της Τριχωνίδας και του Κόρινθιακού κόλπου (Kiratzi et al., 2008).

No	Year	Month	Day	h:min:s	Lat °N	Lon °E	Depth km	Mw
1	2007	4	9	23:27:15.71	38,539	21,626	15,6	4,4
2	2007	4	10	00:54:56.35	38,529	21,629	14,9	3,4
3	2007	4	10	03:17:56.09	38,551	21,626	14,2	5,0
4	2007	4	10	03:27:38.33	38,534	21,612	5,2	3,9
5	2007	4	10	03:32:34.20	38,524	21,619	14,1	3,7
6	2007	4	10	03:39:18.86	38,549	21,663	12,4	3,3
7	2007	4	10	04:16:15.65	38,550	21,605	2,9	3,1
8	2007	4	10	04:29:58.11	38,535	21,607	10,9	3,7
9	2007	4	10	04:47:17.99	38,535	21,622	12,9	3,3
10	2007	4	10	05:55:12.15	38,531	21,602	9,7	3,1
11	2007	4	10	06:03:39.12	38,570	21,638	8,5	3,7
12	2007	4	10	07:13:03.67	38,532	21,651	14,6	4,7
13	2007	4	10	07:14:12.39	38,567	21,624	12,4	4,4
14	2007	4	10	07:15:40.44	38,555	21,584	5,06	5,1
15	2007	4	10	08:13:45.40	38,526	21,614	14,5	3,8
16	2007	4	10	09:59:01.51	38,560	21,618	11,6	3,5
17	2007	4	10	10:34:47.97	38,550	21,606	13,6	3,3
18	2007	4	10	10:41:00.14	38,525	21,647	22,4	5,2
19	2007	4	10	12:55:17.70	38,539	21,615	12,9	3,3
20	2007	4	10	13:51:00.93	38,564	21,610	17,8	3,6
21	2007	4	13	12:58:14.45	38,526	21,616	9,4	3,1
22	2007	4	15	02:16:32.58	38,574	21,576	17,9	4,1
23	2007	6	5	11:50:20.46	38,535	21,639	16,6	4,8

Πίνακας 6 Καταγραφή σεισμικών φαινομένων της σμηνοσειράς του Απριλίου του 2007 (Kiratzi et al., 2008).



Εικόνα 16 Χάρτης Απεικόνιση Σμηνοσειράς του Απριλίου του 2007 καθώς και αποτύπωση του σεισμικού φαινομένου της 31 Δεκεμβρίου του 1975 (Kiratzi et al., 2008)

Στην βιβλιογραφική επισκόπηση η παρατήρηση του φαινομένου της σμηνοσειράς σεισμών έχει μελετηθεί τις περισσότερες φορές με την παράλληλη μελέτη παρουσίας μίας ηφαιστειακής δραστηριότητας. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις είναι οι εξής.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες υπήρχε η λεγόμενη «ακολουθία σεισμών Μογγόλων (Mogul earthquake sequence)», που ξεκίνησε το Φεβρουάριο του 2008 κοντά στην οικισμό Ρενό, Νεβάδα και συνεχίστηκε για αρκετούς μήνες έως τον Νοέμβριο του 2008. Μεταξύ Φεβρουαρίου και Απριλίου, εντοπίστηκε μεγάλο πλήθος σεισμών μεγαλύτερο από 1.000 μικρού μέγεθος, με μεγαλύτερη μέτρηση ένα σεισμό της τάξης του 4,7 (Smith et al., 2008)

Στο ισπανικό νησί Ελ Ιέρο (El Hierro) στον Ανατολικό Ατλαντικό από τον Ιούλιο 2011 μέχρι τον Οκτώβριο του 2011, εκατοντάδες μικρό-σεισμοί μετρήθηκαν. Το σμήνος

οφείλεται στην κίνηση του μάγματος κάτω από το νησί, και μίας υποθαλάσσιας ηφαιστειακής έκρηξης στις 9 Οκτωβρίου.

Το 2011 στην περιοχή Canterbury στο νότιο τμήμα της περιοχής της Νέας Ζηλανδίας. Μεταξύ του Φεβρουαρίου 2011 και Δεκέμβριου του 2011 πάνω από 500 σεισμοί σημειώθηκαν κατά τη διάρκεια του σεισμού στην πόλη Christchurch το 2011, με 31 από αυτούς μέγεθος μεγαλύτερο από 5 (Marriott, 2011).

Κοντά στον οικισμό Mexicali στο San Diego, κατά μήκος του ρήγματος Cerro Prieto, εκτοπίστηκαν πάνω από 500 σεισμούς κατά τη διάρκεια μιας περιόδου δύο εβδομάδων τον Φεβρουάριο του 2008. (Dibble, 2008)

#### 4.6 Βιβλιογραφική-Μελετιτική Ανασκόπηση Περιοχής Μελέτης

Όπως είναι φυσικό οι μελέτες που εμφανίζονται στην περιοχή κατά κύριο λόγο είναι για την σεισμική δραστηριότητα της περιοχής. Συγκεκριμένα εντοπίζονται μελέτες για την ιστορική κατανομή των σεισμών καθώς και την συσχέτιση τους με τα ρήγματα και τον τεκτονισμό της. Οι πιο αξιοσημείωτες εντοπίζονται στο σεισμικό γεγονός του Απριλίου του 2007 με τον εντοπισμό των σεισμικών σμηνοσειρών και της ανάλυσης τους (Evangelidis et al., 2008) (Kiratzi et al., 2008) (Sokos et al., 2007).

Ακόμα μία μελετητική-επιστημονική ενότητα που εντοπίζεται αφορά την ενότητα της παραλίμνιας γεωμορφολογίας και γεωλογίας. Με χαρακτηριστικά όπως την διερεύνηση των διεργασιών των γύρω γεωμορφολογικών και γεωλογικών επιφανειών της λίμνης. Καθώς και υδρολογικές μελέτες με την ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου και των λεκανών απορροής (Zacharias and Ferentinos, 1997; Tafas and Economou, 1997)

Τέλος μία μελετητική ενότητα που παρουσιάζεται αφορά περιβαλλοντολογικές μελέτες για την περιοχή της λίμνης. Χαρακτηριστικά καταγράφονται μελέτες για το φυτοπλαγκτόν της περιοχής, την παρατήρηση διάφορων ειδών ζώων όπως πτηνών και ψαριών. Ενώ υπάρχει και μία σειρά ερευνών για την υποβάθμιση του περιβάλλοντος από τις ανθρώπινες δραστηριότητες (Zotos et al., 2006; Doulka, 2008).

## 5. ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Για της ανάγκες και τις απαιτήσεις της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν μία σειρά διαφορετικών τύπων γεωγραφικών δεδομένων. Η βασική ομάδα δεδομένων για την συγκεκριμένη μελέτη είναι οι δορυφορικές εικόνες Ραντάρ που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της διαφορικής συμβολομετρίας. Επίσης δημιουργήθηκε και μια χωρική βάση δεδομένων, μέσα σε ένα περιβάλλον ΣΓΠ (Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών) με τα απαραίτητα γεωγραφικά δεδομένα για την περιοχή μελέτης μας.

Αναλυτικά για την επεξεργασία και την ανάλυση της διαφορικής συμβολομετρίας χρησιμοποιήθηκαν ASAR δεδομένα του δορυφορικού συστήματος ENVISAT. Η επιλογή των εικόνων έγινε με την στρατηγική της μελέτης του φαινομένου της σμηνοσειράς του Απριλίου του 2007 στην λίμνη Τριχωνίδα. Επομένως επιλέχτηκαν όλες οι κατάλληλες απεικονίσεις που περιείχαν μία σειρά κριτηρίων. Βασικό κριτήριο ήταν οι εικόνες να αποτυπώνουν όλη την περιοχή μελέτης, δηλαδή τις παραλίμνιες περιοχές της Τριχωνίδας. Ενώ ακόμα ένα χαρακτηριστικό κριτήριο ήταν η βέλτιστη χρονική κατανομή των εικόνων με βασικό άξονα τον Απριλίου του 2007 (Πίνακας 7).

A/A	HM/NAI	ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ	ΤΡΟΧΙΑ	ΠΛΑΙΣΙΟ	ΠΟΛΩΣΗ	ΦΩΡΑ
1	11/2/2002		270	<b>2025</b>	107	ΛΗΨΗΣ
1	11/2/2005	ENVISAT	279	2035	V V	
2	5/8/2003	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοοικη
3	14/10/2003	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
4	23/12/2003	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
5	6/4/2004	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
6	11/5/2004	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
7	20/7/2004	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
8	24/8/2004	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
9	28/9/2004	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
10	2/11/2004	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
11	11/1/2005	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
12	26/4/2005	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
13	31/5/2005	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
14	20/6/2006	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
15	25/7/2006	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
16	3/10/2006	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
17	16/1/2007	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
18	20/2/2007	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
19	11/3/2008	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
20	15/4/2008	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
21	29/7/2008	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
22	2/9/2008	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική

23	7/10/2008	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
24	11/11/2008	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
25	20/1/2009	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
26	24/2/2009	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
27	5/5/2009	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική
28	9/2/2010	ENVISAT	279	2835	VV	Ανοδική

Πίνακας 7 Δεδομένα του δορυφόρου ENVISAT

Τα δεδομένα ήταν ανοδικής τροχιάς, πρωϊνής λήψης (περίπου στις 10:00 π.μ.), κάθετης VV πόλωσης και πλάτους κάλυψης 100 km (Εικόνα 17). Επιπλέον, 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).



Εικόνα 17 Μέση εικόνα multi-look (1x5) της περιοχής μελέτης του δορυφόρου ENVISAT

Επιπρόσθετα για την συμβολομετρική επεξεργασία χρησιμοποιήθηκαν και τα τροχιακά δεδομένα ακρίβειας για τον δορυφόρο ENVISAT. Τα συγκεκριμένα συμβολομετρικά προϊόντα αποτελούν ακριβείς καταγραφές της τροχιάς του δορυφόρου από ένα συγκεκριμένο όργανο καταγραφής DORIS το οποίο φέρει ο ίδιος ο δορυφόρος. Με τα τροχιακά δεδομένα ακρίβειας μπορούμε να παράγουμε σαφώς υψηλότερα επίπεδα ακρίβειας και κατ επέκταση αποτελεσμάτων. Η πηγή των συγκεκριμένων δεδομένων διατίθεται στο DEOS (Department of Earth Observation and Space Systems) <u>http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs</u>, από το πανεπιστήμιο του Delft για να υποστηρίξει αλτιμετρικές και συμβολομετρικές εφαρμογές. Αυτά τα τροχιακά δεδομένα διατίθενται με ακρίβειες της τάξεως των 5-6 cm (Scharoo & Visser, 1998).

Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό για την συμβολμετρική επεξεργασία αποτελεί η γεωγραφική πληροφορία του υψομέτρου για την περιοχή μελέτης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση αποκτήθηκε ΨΜΕ (ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας) –DEM από τα δεδομένα της αποστολής SRTM τα οποία είναι ελεύθερα στον διαδικτυακό τόπο του International Center of Tropical Agriculture (CIAT) (<u>http://srtm.csi.cgiar.org/</u>). Το συγκεκριμένο ΨΜΕ έχει χωρική ανάλυση 90m και αποτελεί την τρίτη κατά σειρά έκδοση του SRTM V3.

Τέλος η χωρική βάση δεδομένων, η οποία δημιουργήθηκε μέσα σε ένα περιβάλλον ΣΓΠ (Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών) περιείχε όλα γεωγραφικά τα χαρακτηριστικά που ήταν σημαντικά για την ανάλυση και ερμηνεία της μελέτη μας (Πίνακας 8). Συγκεκριμένα ψηφιοποιήθηκαν από χάρτες της ΓΥΣ ή αποκτήθηκαν από τον ελεύθερο ελληνικό γεωχωρικό εναπόθετηρα (geodata.gov) όλες

Δεδομένα	Τοπολογία	Πηγή		
Δορυφορικές Εικόνες	Radar	ESA & Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο		
Τροχιακή Πληροφορία	Ανύσματα Θέσης	DEOS		
ΨME/DEM	Raster	CIAT		
Όρια δήμων	Πολυγωνική	Geodata		
Οικισμοί	Σημειακή	Geodata		
Δομημένες Περιοχές	Πολυγωνική	Geodata		
Υδρογραφικό Δίκτυο	Γραμμική	Geodata		
Υδρογεωλογία	Πολυγωνική	Geodata		
Χρήσεις Γης	Πολυγωνική	Geodata		
Σεισμοί	Σημειακή	EMSC/ IRIS		
GPS	Σημειακή	NOA		

οι Πίνακας 8 Πηγές και Τοπολογία Δεδομένων

γεωγραφικές οντότητες της περιοχής όπως (τα όρια των δήμων, οι οικισμοί, οι δομημένες περιοχές, το οδικό δίκτυο, το υδρογραφικό δίκτυο, η υδρο-γεωλογία και οι χρήσεις γης (corine)). Επίσης μέσα στην χωρική βάση δεδομένων εισάχθηκαν τα σεισμολογικά δεδομένα για την περίοδο της σμηνοσειράς του Απριλίου του 2007. Τα συγκεκριμένα σεισμολογικά δεδομένα παρέχονται μέσα από ηλεκτρονικές χαρτογραφικές εφαρμογές, από μεγάλους σεισμολογικούς οργανισμούς όπως το EMSC (European Mediterranean Seismological Centre) και το IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology).

## 6. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η ανάλυση των ενεργειών που εκπονήθηκαν για την παραγωγή των αποτελεσμάτων των χαρτών παραμόρφωσης. Ουσιαστικά καταγράφονται οι μεθοδολογίες που εφαρμόστηκαν για την επίτευξη του ερευνητικού στόχου (Εικόνα 18). Αρχικά αποτυπώνονται τα στάδια επεξεργασίας και ανάλυσης της Διαφορικής Συμβολομετρίας, ενώ στην συνέχεια αναλύονται οι μεθοδολογίες της σώρευσης διαφορικών συμβολογραφημάτων (stacking) και η τεχνική γραμμικού συνδυασμού συμβολογραφημάτων (stacking) αποτυπώνονται οι ρυθμοί ταχύτητας της

Εικόνα 18 Στάδια Επεξεργασίας – Μεθοδολογίας Διαφορικής Συμβολομετρίας Radar



ετήσιας επιφανειακής παραμόρφωσης πριν και μετά το σεισμικό γεγονός της σμηνοσειράς. Ενώ με την τεχνική του γραμμικού συνδυασμού συμβολογραφημάτων αποτυπώνεται η συμπεριφορά της επιφανειακής παραμόρφωσης κατά την περίοδο της σμηνοσειράς του Απριλίου 2007.

Η επεξεργασία των δεδομένων SAR και η παραγωγή των αποτελεσμάτων παραμόρφωσης εκπονήθηκαν μέσα από το λογισμικό GAMMA (Wegmuller et al, 1998) σε λειτουργικό περιβάλλον Linux. Ενώ η ανάλυση και η χαρτογραφική απεικόνιση τους έγινε μέσα από ένα περιβάλλον GIS (ArcGis & Quantum Gis).

#### 6.1 Μεθοδολογία Επεξεργασίας & Ανάλυσης Διαφορικής Συμβολομετρίας

Στο συγκεκριμένο στάδιο της μεθοδολογίας επεξεργασίας και ανάλυσης της διαφορικής συμβολομετρίας περιγράφονται όλες οι απαραίτητες ενέργειες για την παραγωγή διαφορικών συμβολογραφημάτων.

#### 6.1.1 Μετατροπή των Raw Data (Τροχιακών Δεδομένων) σε SLC

Το πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας αποτελεί την μετατροπή των τροχιακών δεδομένων σε μία μορφή δεδομένων που είναι πιο διαχειρίσιμη από το εκάστοτε γεωπληροφοριακό σύστημα για την συμβολομετρική επεξεργασία. Η μορφή αυτών των δεδομένων ονομάζετε Single-Look Complex (SLC) και αποτελεί την πιο διαδεδομένη μορφή δεδομένων στην μεθοδολογία για την παραγωγή και την επεξεργασία ενός συμβολομετρικού αποτελέσματος.

Οι SLC εικόνες μπορούν να έχουν διαφορετικές μορφές. Η πρώτη εστιάζει στο αριθμό των bytes του πραγματικού και του φανταστικού τμήματος της εικόνας με τις αντίστοιχές μορφές των SLC να είναι (single data) και η άλλη (float data). Στη δεύτερη μορφή η εικόνα συνοδεύεται και από ένα άλλο αρχείο με τα μεταδεδομένα της εικόνας που περιγράφουν τις ιδιότητες της, αυτή η μορφή αποτελεί και τον πιο διαδεδομένο τρόπο μετατροπής των τροχιακών δεδομένων σε SLC (Hanssen, 2001). Με την εκάστοτε εικόνα SLC να αποτελείται από δύο αρχεία το ένα με την γεωμετρία και τη χωρική πληροφορία της εικόνας και το άλλο με τις παραμέτρους της πχ (τροχιακή πληροφορία, προβολικό σύστημα, κτλπ.). Παρ' όλα αυτά, τα τροχιακά

δεδομένα ως πρωτογενή δεδομένα προτιμούνται από τα SLC και ο λόγος είναι η φθηνότερη και η πιο γρήγορη μεταφορά τους (Gamma Remote Sensing, 2007).

#### 6.1.2 Διακρίβωση Τροχιάς Δεδομένων

Το επόμενο στάδιο της μεθοδολογίας αποτελεί το επαναπροσδιορισμό της τροχιακής πληροφορίας του δορυφορικού συστήματος. Στα δορυφορικά συστήματα η κίνηση εκφράζεται μέσω της τροχιάς του. Η ακριβής θέση του δορυφόρου και η ταχύτητα του μια δεδομένη χρονική στιγμή (t) περιγράφεται από το άνυσμα της θέσης (orbit state vector) (Massmann et al, 1997).

Οι αβεβαιότητες στα τροχιακά δεδομένα οδηγούν σε σφάλματα όχι μόνο στο ανασυγκρότηση του ΨΜΕ και της γεωκωδικοποίησης των δεδομένων αλλά και στις τεχνικές της συμβολομετρίας όπως η διαφορική συμβολομετρία που οι μικρές μετατοπίσεις της επιφάνειας πρέπει να ανιχνεύονται και να παρακολουθούνται. Για την πραγματική θέση του δορυφορικού συστήματος είναι απαραίτητη η γνώση των βαρυτικών και μη δυνάμεων που ασκούνται στην πλατφόρμα κατά μήκος της τροχιάς του. Για τον προσδιορισμό της θέσης τις περισσότερες φόρες χρησιμοποιούνται μετρήσεις αλτιμετρίας και (SLR) με την εγκυρότητα των μετρήσεων να εντοπίζεται μόνο στην εμβέλεια των επίγειων σταθμών (Fletcher, 2007/PartB).

Αντίστοιχες πληροφορίες για τις τροχιές ακρίβειας και τα ανύσματα της θέσης (orbit state vector) για των δορυφόρο ENVISAT παρέχονται από διάφορες διαστημικές υπηρεσίες όπως το DEOS (Department of Earth Observation and Space Systems) από το πανεπιστήμιο του Delft. Τα παραπάνω δεδομένα παρέχονται για να υποστηρίξουν αλτιμετρικές και συμβολομετρικές εφαρμογές. Αυτά τα τροχιακά δεδομένα διατίθενται με καθυστέρηση μερικών εβδομάδων από την λήψη και παρέχουν διορθώσεις με ακρίβεια της τάξεως των 5-6 cm.

Στον δορυφόρο ENVISAT χρησιμοποιούνται μετρήσεις για τον επαναπροσδιορισμό της τροχιάς μέσο του συστήματος DORIS. Το συγκεκριμένο όργανο παρέχει τροχιακές πληροφορίες, σε καθημερινή βάση, για το επαναπροσδιορισμό της ώρας λήψης UTC & UTC1, την θέση και την ταχύτητα του συστήματος καθώς και για την ποιότητα των δεδομένων. Αυτές οι τροχιακές πληροφορίες διατίθενται από την ESA (European Space

Μεθοδολογία

Agency) μέσο ενός ftp-server και ενημερώνονται τέσσερεις με έξι εβδομάδες από την ημέρα λήψης της εικόνας (Fletcher, 2007/PartB).

Επομένως γνωρίζοντας την ακριβή ημερομηνία λήψης της εικόνας και εντοπίζοντας τα αντίστοιχα επαναπροσδιορισμένα τροχιακά δεδομένα για την συγκεκριμένη πτήση του δορυφορικού συστήματος. Δίνεται η δυνατότητα ενημέρωσης των εικόνων SLC και συγκεκριμένα των παραμετρικών τους αρχείων με τα «νέα» ανύσματα θέσης (orbit state vector) (Gamma Remote Sensing, 2007).

#### 6.1.3 Συμπροσαρμογή (CO-REGISTRATION)

Η διαδικασία της συμπροσαρμογής των εικόνων αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό βήμα της μεθοδολογίας για την τεχνική της συμβολομετρίας. Η ακρίβεια της εφαρμογής της επηρεάζει όλα τα στάδια της μεθοδολογίας και κατ΄ επέκταση τα αποτελέσματα της. Ουσιαστικά η διαδικασία της συμπροσαρμογής αποτελεί την ακριβή επίθεση των συμβολογραφημάτων έτσι ώστε να υπάρξει πλήρη ταύτιση του ενός εικονοστοιχείου της μια εικόνας με το αντίστοιχο εικονοστοιχείο των άλλων (Εικόνα 19). Συγκεκριμένα η μεθοδολογία της συμπροσαρμογής στις SAR τεχνικές έχει να κάνει με την επιλογή μία κύριας εικόνας (master) ως πρωτεύων «πρότυπη» εικόνα και την προσαρμογή των άλλων δευτερευόντων εικόνων (slaves) πάνω στην κύρια. (Fletcher, 2007/PartB and PartC)

Η διαδικασία αποτελείτε από δύο στάδια, αρχικά γίνεται ο προσδιορισμός της θέσης κάθε εικονοστοιχείου (pixel) σύμφωνα με την αρχική εικόνα. Σε αυτό το στάδιο περιέχονται δύο επιμέρους βήματα, αρχικά γίνεται η διαδικασία της συμπροσαρμογής κατά προσέγγιση (coarse co-registration) μίας ομάδας pixel μεταξύ της master εικόνας και των slave εικόνων. Η διαδικασία της κατά προσέγγισης συμπροσαρμογής χρησιμοποιεί τα τροχιακά δεδομένα και τις ίδιες τις εικόνες για την επίλυση του. Ενώ στην συνέχεια γίνεται μία πιο ακριβής συμπροσαρμογή (fine co-registration) σε επίπεδο υπο-εικονοστοιχειών (sub-pixels) μεταξύ της master εικόνας και των slave (sub-pixels) μεταξύ της master εικόνας και των slave (sub-pixels) μεταξύ της master εικόνας και των slave εικόνων. Σε αυτή την διαδικασία λαμβάνονται υπόψη άλλα χαρακτηριστικά όπως η συνάφεια, οι τοπικές διακύμανσης της φάσης και ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal Noise Ratio - SNR).

Τέλος στο δεύτερο στάδιο της συμπροσαρμογής γίνεται ο υπολογισμός του πλάτους και της φάσης του σήματος για το σύνολο των pixel με τον αλγόριθμο της παρεμβολής. Η ακρίβεια και η ποιότητα της παραγόμενης συμπροσαρμογής εξαρτάται με το αναμενόμενο σφάλμα στις τιμές των φάσεων, λόγω της λανθασμένης επίθεσης των slave εικόνων στην master εικόνα. Χαρακτηριστικές μελέτες έχουν αποδείξει ότι ακρίβειες μεγαλύτερες του 1/8 - 1/6 του pixel είναι πολύ ικανοποιητικές για την παραγωγή αποτελεσμάτων. (Samson, 1996; Massonnet and Feigl 1998; Gens, 1998)

Στα συγκεκριμένα δεδομένα η συμπροσαρμογή του συνόλου των απεικονίσεων κάθε τροχιάς έγινε με την επιλογή της πρωτεύουσας εικόνας (master) περίπου στο μέσο της χρονοσειράς των απεικονίσεων. Η απεικόνιση που επιλέχτηκε ως (master image) ήταν η ημερομηνία λήψης 31/5/2005 και τα αποτελέσματα της ακρίβειας που αποδόθηκαν ήταν πολύ ικανοποιητικά, της τάξεως μεγαλύτερης του 1/6 του pixel. Τέλος σε αυτό το στάδιο εστιάζουμε στην περιοχή μελέτης, επικεντρώνοντας στην περιοχή ενδιαφέροντος (Area of Interest – AOI) και κόβοντας (crop) την από το αρχικό πρωτογενή εύρος της εικόνας.



Εικόνα 19 Διαδικασία συμπροσαρμογής των εικόνων (Fletcher, 2007/PartB)

# 6.1.4 Υπολογισμός της βασικής συμβολομετρικής γραμμής

Ο υπολογισμός της βασικής συμβολομετρικής γραμμής προκύπτει από την παράλληλη απόσταση των ανυσμάτων θέσης της κάθε πλατφόρμας (orbit state vector). Η μέτρηση της απόστασης μεταξύ των δύο κεραιών SAR που εστιάζουν σε μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή είναι πάρα πολύ δύσκολη διότι απαιτεί πολύ καλή γνώση της θέσης του δορυφόρου και του ύψους. Συγκεκριμένα η βασική συμβολομετρική γραμμή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ένα πολύπλοκο μοντέλο που ποικίλει ανάλογα με την προσέγγιση και την ακρίβεια της εφαρμογής. Τα βασικά χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν την βασική συμβολομετρική γραμμή είναι η τροχιακή πληροφορία, το ποσοστό των κροσσών στο συμβολογράφημα και τα σημεία εδαφικού έλεγχου (Gamma Remote Sensing, 2007).

Στο συγκεκριμένο στάδιο υπολογίζονται βάση της βασικής συμβολομετρικής γραμμής όλα τα πιθανά ζευγάρια που μπορούν να αποδώσουν ένα συμβολογράφημα και έχουν ως όριο την συγκεκριμένη απόσταση. Η επιλογή της βασικής συμβολομετρικής γραμμής ποικίλει ανάλογα με την ακρίβεια της εφαρμογής αλλά κατά κύριο λόγο με την τοπογραφία της περιοχής μελέτης. Γενικά περιοχές με έντονο ανάγλυφο μελετούνται με μικρές αποστάσεις στην συμβολομετρική γραμμή, μέχρι 150m. Ενώ περιοχές με ήπιο ανάγλυφο μελετούνται με μεγαλύτερες αποστάσεις. Στην παρούσα μελέτη στην οποία η περιοχή ενδιαφέροντος παρουσιάζει στις ευρύτερες περιοχές έντονο ανάγλυφο επιλέχτηκε ως ανώτερο όριο η απόσταση των 150m στην βασική συμβολομετρική γραμμή. Ο υπολογισμός των 150m απέδωσε 68 συμβολογραφήματα δηλαδή 68 ζευγάρια απεικονίσεων με την αντίστοιχη χρονική τους απόσταση σε ημέρες καθώς και το μέγεθος σε μέτρα της βασικής συμβολομετρικής γραμμής (Πίνακας 9).

A/A	Πρωτεύουσα εικόνα (ημ/νια)	Δευτερεύουσα εικόνα (ημ/νια)	Άνυσμα βάσης (m)	Χρονικό διάστημα (days)					
1	20030805	20040720	-116,4	350	35	20040824	20080415	-31,5	1329
2	20030805	20070220	-99,0	1294	36	20040824	20080902	70,7	1469
3	20030805	20080729	-42,0	1819	37	20040928	20041102	131,8	35
4	20030805	20081007	-104,3	1889	38	20040928	20060620	26,9	630
5	20030805	20090224	-72,4	2029	39	20040928	20061003	96,3	735
6	20031014	20040406	-106,8	175	40	20041102	20050111	57,3	69,99
7	20031014	20040511	-19,6	210	41	20041102	20060620	-104,9	595
8	20031014	20050531	-37,6	595	42	20041102	20061003	-35,5	700
9	20031014	20080311	-2,6	1609	43	20041102	20090505	88,2	1644
10	20031014	20081111	118,2	1854	44	20050111	20061003	-92,9	630
11	20031014	20090120	82,1	1924	45	20050111	20090505	30,9	1574
12	20031014	20100209	100,3	2309	46	20050426	20060725	-105,5	455
13	20031223	20040720	95,9	210	47	20050531	20080311	35,0	1014
14	20031223	20041102	-111,9	315	48	20050531	20090120	119,7	1329
15	20031223	20050111	-54,6	384,9	49	20050531	20100209	137,9	1714
16	20031223	20061003	-147,4	1015	50	20060620	20061003	69,4	105

17	20031223	20070220	113,4	1154	51	20061003	20090505	123,7	944,9
18	20031223	20081007	108,1	1749	52	20070116	20080415	-67,1	455
19	20031223	20090224	139,9	1889	53	20070116	20080902	35,2	594,9
20	20031223	20090505	-23,7	1959	54	20070220	20080729	56,9	525
21	20040406	20040511	87,1	35	55	20070220	20081007	-5,3	594,9
22	20040406	20050531	69,2	420	56	20070220	20090224	26,6	734,9
23	20040406	20080311	104,2	1434	57	20070220	20090505	-137,1	804,9
24	20040511	20050531	-18,0	385	58	20080311	20081111	120,7	244,9
25	20040511	20080311	17,0	1399	59	20080311	20090120	84,7	314,9
26	20040511	20081111	137,8	1644	60	20080311	20100209	102,9	699,9
27	20040511	20090120	101,7	1714	61	20080415	20080902	102,2	140
28	20040511	20100209	120,0	2099	62	20080729	20081007	-62,3	70
29	20040720	20070220	17,4	944,9	63	20080729	20090224	-30,4	210
30	20040720	20080729	74,4	1469	64	20081007	20090224	31,9	140
31	20040720	20081007	12,1	1539	65	20081007	20090505	-131,8	210
32	20040720	20090224	44,0	1679	66	20081111	20090120	-36,0	70
33	20040720	20090505	-119,6	1749	67	20081111	20100209	-17,8	455
34	20040824	20070116	35,5	874,9	68	20090120	20100209	18,2	385

Πίνακας 9 Συνδυασμός Ζευγών Συμβολοφραφημάτων με βασική συμβολομετρική γραμμή μικρότερη των 150μ.

#### 6.1.5 Παραγωγή Απλού Συμβολογραφήματος

Η παραγωγή του συμβολογραφήματος προκύπτει από το μιγαδικό πολλαπλασιασμό της φάσης κάθε εικονοστοιχείου της πρωτεύουσας εικόνας (master image) με το αντίστοιχο εικονοστοιχείο της δευτερεύουσας (slave image). Η διαδικασία αυτή εκπονείται για όλα τα ζευγάρια που έχουν προκύψει από τον υπολογισμό της εκάστοτε προσδιορισμένης βασικής συμβολομετρικής γραμμής. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η δημιουργία του συμβολογραφήματος που περιέχει την βασική πληροφορία της συμβολομετρικής φάσης, όπου ουσιαστικά είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο εικόνων (L.C.Graham, 1974; A.Gabriel and R. Goldstein, 1988; Fletcher, 2007/PartB and PartC). Επίσης σε αυτό το στάδιο της επεξεργασίας αφαιρείται και ο όρος της «επίπεδης Γης» (flattened Earth), η οποία οφείλεται στην διαφορά φάσης που παράγεται λόγο της καμπυλότητας της Γής, με παραγόμενο αποτέλεσμα την εξομαλυμένη συμβολομετρική φάση και κατ' επέκταση το εξομαλυμένο συμβολογράφημα (Geudtner, 1996). Τέλος από αυτή την διαδικασία προκύπτει και το συμβολομετρικό επίπεδο της συνάφειας για τα συμβολογραφήματα (Εικόνα 20)



Εικόνα 20 Μέσος Όρος Επιπέδων Συνοχής των Συμβολογραφημάτων

#### 6.1.6 Παραγωγή Διαφορικού Συμβολογραφήματος

Το διαφορικό συμβολογράφημα είναι το αποτέλεσμα μίας αφαίρεσης της τοπογραφικής φάσης, που περιλαμβάνετε μέσα στο συμβολογράφημα, από το εξομαλυμένο συμβολογράφημα. Έτσι προκύπτει η διαφορική φάση που ορίζει τις μεταβολές της απόστασης δορυφόρου – στόχου μεταξύ της κύριας εικόνας και της δευτερεύουσας. Η γεωγραφική πληροφορία της τοπογραφικής φάσης προσομοιώνετε βάσει του διαθέσιμου ΨΜΕ και της εκάστοτε συμβολομετρικής γεωμετρίας. Πρέπει όμως σε αυτό το στάδιο να επισημανθεί ότι σε αυτή την παραγόμενη φάση συμμετέχουν και άλλοι παράγοντες που πιθανά αποσυσχετίζουν το τελικό αποτέλεσμα όπως είναι οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις, η χρονική αποσυσχέτιση, η χωρική αποσυσχέτιση και η ποιότητα των τροχιακών δεδομένων. Για αυτό τον λόγο στο διαφορικό συμβολογράφημα εφαρμόζεται μία διαδικασία φιλτραρίσματος για την απαλοιφή αυτού του θορύβου.

# 6.1.7 Εφαρμογή Φίλτρου Διαφορικού Συμβολογραφήματος

συγκεκριμένο στάδιο γίνεται η εφαρμογή φίλτρων στο Στο διαφορικό συμβολογράφημα με σκοπό την μείωση του θορύβου που προαναφέρθηκε. Αντικειμενικός σκοπός της διαδικασίας είναι να διευκολυνθεί το επόμενο στάδιο της μεθοδολογίας που αποτελεί την εκτύλιξη της φάσης (phase unwrapping) ένα από τα πιο σημαντικά και δύσκολα στάδια της επεξεργασίας. Στην βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί μία σειρά τεχνικών για φίλτρα. Η πιο διαδεδομένη είναι τα αποκαλούμενα προσαρμοσμένα (adaptive) φίλτρα όπου η τεχνική του φιλτραρίσματος είναι κατά την συχνότητα σε χωρική βάση. Συγκεκριμένα τα φίλτρα αυτά μεγιστοποιούν την ισχύ του σήματος σε σχέση με το θόρυβο ενώ εφαρμόζονται στην τοπική βαθμίδα της φάσης που αποτρέπει την γενικευμένη ομαλοποίηση της στο χώρο. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά δίνουν στα φίλτρα προσαρμοστικότητας (adaptive) σημαντικό πλεονέκτημα διότι αρχικά εφαρμόζονται ανεξάρτητα της μορφής του σήματος ενώ διατηρούν αναλλοίωτη την φάση της περιοχής παρά την εφαρμογή φίλτρου λόγο της μη εκτεταμένης χωρικής λειτουργικότητας τους (Goldstein and Werner, 1998; Φουμέλης, 2009). Τέλος να σημειωθεί ότι, όπως όλα τα χωρικά φίλτρα λειτουργούν βάση ενός παραθύρου, και σε αυτή την διαδικασία ορίζετε ένα συγκεκριμένο μέγεθος παραθύρου.

Στην συγκεκριμένη διαφορική συμβολομετρική επεξεργασία χρησιμοποιήθηκε ένα φίλτρο κατά συχνότητα και σε χωρική βάση με το μέγεθος του παραθύρου να είναι 64 x 64 pixel.

#### 6.1.8 Εκτύλιξη Συμβολομετρικής Φάσης (Phase Unwrapping)

Η πρωταρχική φάση του σήματος Ραντάρ στο εξομαλυμένο συμβολογράφημα δεν είναι συνεχής λόγο της κυκλικής φύσης [0,2π) της φάσης. Η διαφορά φάσης μεταξύ δύο σημείων στο εξομαλυμένο συμβολογράφημα αποτυπώνει μετρήσεις ρεαλιστικής μεταβολής του υψομέτρου, το χαρακτηριστικό αυτό ονομάζετε και υψόμετρο της ασάφειας (altitude of ambiguity- ha). Για να εξομαλυνθούν οι τιμές και να υπάρξει μια αλληλουχία των τιμών στο σύνολο του συμβολογραφήματος προστίθεται ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του 2π έτσι ώστε να εκτυλιχτεί (unwrap) η πραγματική τιμή της φάσης. Βασική παράμετρος για την εκτύλιξη της φάσης και βασικό χαρακτηριστικό των

Μεθοδολογία

περισσοτέρων αλγορίθμων εκτύλιξης φάσης (Phase Unwrap algorithms –PU A) είναι η παραδοχή ότι η διαφορά φάσης μεταξύ δύο γειτονικών εικονοστοιχείων δεν πρέπει να υπερβαίνει το μισό κύκλο [ $\phi_n - \phi_{n-1}$ ]<π (Fletcher, 2007/PartB and PartC). Περιοχές όπου δεν ανταποκρίνονται στην παραπάνω παράμετρο και αποτυπώνουν φάση μεγαλύτερη του π, λόγω των φαινομένων της σκίασης και της αναστροφής, εμφανίζουν άλματα φάσης και αποτελούν την ονομαζόμενη υπολειμματική φάση.

Σημαντικό χαρακτηριστικό για την καλύτερη λειτουργία του αλγορίθμου εκτύλιξης της φάσης είναι η σωστή επιλογή του σημείου εκκίνησης της εκτύλιξης. Το συγκεκριμένο σημείο είναι το σημείο έναρξης του αλγορίθμου εκτύλιξης και κατά κανόνα τοποθετείται σε περιοχές με μεγάλη συνάφεια για να μπορέσει να ξεκινήσει ιδανικότερα η διαδικασία εκτύλιξης (Werner et al., 2002).

Η διαδικασία αυτή αποτελεί το πλέον απαιτητικό και δύσκολο στάδιο της μεθοδολογίας παραγωγής συμβολογραφημάτων. Επίσης χαρακτηριστικό της δυσκολίας του συγκεκριμένου σταδίου είναι ότι αναλόγως με την περιοχή εφαρμογής, με έντονες ή όχι γεωμετρικές παραμορφώσεις, η διαδικασία της εκτύλιξης είναι αρκετά αναποτελεσματική έως και αβέβαιη ως προς την επιτυχία της. Όπως είναι φυσικό με δεδομένες τις ιδιαιτερότητες του σταδίου αυτού υπάρχουν διάφορές μεθοδολογίες για την βέλτιστη εκτύλιξη της συμβολομετρικής φάσης. Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση προκύπτει ότι υπάρχουν δύο κατηγορίες PU Algorithms. Η πρώτη είναι η κατηγορία path-following methods η οποία χρησιμοποιεί μια τοπική προσέγγιση για την εκτύλιξη. Και η άλλη κατηγορία είναι η minimum-norm methods που βασίζεται σε μία γενικευμένη προσέγγιση εκτύλιξης φάσης. Στην πρώτη ανήκουν οι τεχνικές Goldstein's branch cut algorithm (Goldstein et al., 1988), minimumdiscontinuity algoritm (Flynn, 1997), minimum cost network algorithm (Costantini, 1998) και minimum spanning tree algoritm (Chen and Zeblecker, 2000). Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι αλγόριθμοι, last-squares method (Pritt, 1997), Fast Fourier Transform FFT (Pritt and Shipman, 1994)  $\kappa \alpha i$  o minimum L<sup>P</sup>-norm phase unwrapping (Chen and Zeblecker, 2000). Αξιοσημείωτος δε είναι ο συνδυασμός των πλεονεκτημάτων κάποιον από τις παραπάνω μεθόδους σε μία.

Μεθοδολογία

Στην παρούσα μεθοδολογία και στο στάδιο εκτύλιξης της φάσης αρχικά επιλέχτηκε το καταλληλότερο σημείο εκκίνησης του (PU Algorithm). Το σημείο αυτό εντοπίστηκε στην περιοχή της πόλης του Αγρινίου και συγκεκριμένα στο βόρειο κεντρικό τμήμα της πόλης με εικονοσυντεταγμένες c:184 l:1412. Το σημείο αυτό παρουσίαζε διαχρονικά υψηλά επίπεδα συνάφειας. Επίσης για την επίλυση των ασαφειών φάσης κατά την διαδικασία της εκτύλιξης, επιλέχτηκε η παράμετρος της συνάφειας των εικονοστοιχειών να ίση ή μεγαλύτερη του  $\geq$  0.4 με την μέθοδο προγραμματισμού δικτύου (minimum cost network algorithm) (Costantini, 1998).

## 6.1.9 Επαναπροσδιορισμός της βασικής συμβολομετρικής γραμμής

Ο επαναπροσδιορισμός των τροχιακών δεδομένων γίνεται με σκοπό την επανεκτίμηση της βασικής συμβολομετρικής γραμμής και την βελτίωση των αρχικών εκτιμήσεων της εκτυλιγμένης φάσης. Οι μεθοδολογίες βελτίωσης της ακρίβειας προσδιορισμού του ανύσματος της βάσης (baseline refinement) έχουν αναλυθεί με διάφορες προσεγγίσεις. Ένα εύρος αυτών αναφέρει και ο Small et al., (1996). Επομένως μετά τον επαναπροσδιορισμό των τροχιακών δεδομένων κάθε συμβολομετρικού ζευγαριού, ακολουθεί η επανάληψη της συμβολομετρικής διαδικασίας από την παραγωγή των απλών συμβολογραφημάτων έως την εκτύλιξη των διαφορικών. Με στόχο την καλύτερη ποιότητα και αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Επομένως σε αυτό το στάδιο έγινε η βελτίωση της αρχικής εκτίμησης της βασικής συμβολομετρικής γραμμής από της εκτυλιγμένες διαφορικές φάσεις και εν συνεχεία επαναπροσδιορισμός της γεωμετρίας κάθε συμβολομετρικού ζεύγους. Στην συνέχεια ακολούθησε η επανάληψη της διαδικασίας από την παραγωγή των απλών συμβολογραφημάτων.

## 6.1.10 Μετατροπή της Συμβολομετρικής Φάσης σε Μήκος

Η συμβολομετρική φάση λόγο της κυκλικής φύσης [0,2π) εκφράζει την μετακίνηση κατά την διεύθυνση LOS σε ακτίνια (radian). Η μετατροπή αυτών των τιμών της φάσης σε μήκος αποτελεί μία πολύ δύσκολή διαδικασία διότι έχει να κάνει με την εικονοληψία των εικόνων και των γεωμετρικών παραμορφώσεων της (Fletcher, 2007/PartB and PartC).

#### 6.1.11 Γεωκωδικοποίηση

Συσχετισμός των συντεταγμένων των ραντάρ (SAR) εικόνων σε πραγματικές συντεταγμένες του ΨΜΕ (DEM). Η παρακάτω διαδικασία συσχετίζει τις ραντάρ συντεταγμένες με την βοήθεια κατάλληλης γεωγραφικής πληροφορίας σε πραγματικές συντεταγμένες. Στο στάδιο αυτό υπάρχουν δύο τεχνικές και διαχωρίζονται ανάλογα με την ύπαρξη ΨΜΕ για την περιοχή. Όταν για την περιοχή μελέτης υπάρχει κατάλληλης ακρίβειας ΨΜΕ ο προσδιορισμός του εκάστοτε εικονοστοιχείου προσδιορίζεται βάσει των Range Doppler Coordinates (RDC) και των κεκλιμένων αποστάσεων. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει ΨΜΕ για την περιοχή γίνετε μια επίλυση ενός συστήματος με βάση των δεδομένων θέσεων των δορυφόρων και την εκάστοτε θέση (αζιμούθιου και κεκλιμένης απόστασης) του εικονοστοιχείου

Στο συγκεκριμένο στάδιο χρησιμοποιείται η γεωγραφική πληροφορία των συντεταγμένων της πραγματικής επιφάνειας από ένα ΨΜΕ. Συγκεκριμένα γίνετε ο μετασχηματισμός της γεωμετρίας ραντάρ σε ένα γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς προσομοιώνοντας ένα ενδιάμεσο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς μεταξύ Range Doppler Coordinates (RDC) και του ΨΜΕ. Στην περιοχή μελέτης επιλέχτηκε ο μετασχηματισμός με Μερκατορική Προβολή UTM στη Ζώνη 34 Βόρειο.

#### 6.2 Μεθοδολογία Σώρευση Διαφορικών Συμβολογραφημάτων (Stacking)

Η τεχνική Σώρευσης (Stacking) Διαφορικών Συμβολογραφημάτων βασίζετε στον υπολογισμό του μέσου όρου της φάσης ενός συνόλου συμβολογραφημάτων στο χρονικό εύρος που καλύπτουν με σκοπό να περιορίσουν τους παράγοντες αποσυσχέτισης των διακυμάνσεων της φάσης. Ουσιαστικά η τεχνική της Σώρευσης (Stacking) έρχεται να καλύψει τα συγκεκριμένα όρια εφαρμογής της συμβατικής (conventional) διαφορικής συμβολομετρίας που πηγάζουν από την αρνητική συμβολή αποσυσχέτισης των παραγόντων (χρονική αποσυσχέτιση, ατμοσφαιρική αποσυσχέτιση, θόρυβος κλπ). Παραδείγματος χάρη σε περιοχές όπου οι ρυθμοί παραμόρφωσης είναι χαμηλοί, ένα συμβολομετρικό ζεύγος πρέπει να έχει μεγάλη χρονική απόσταση μεταξύ του για να μπορέσει να ανιχνεύσει την πιθανή παραμόρφωση. Η παράμετρος αύτη όμως δεν αποδίδει πάντα καλά αποτελέσματα

Μεθοδολογία

λόγο του φαινομένου της χρονικής αποσυσχέτισης στο συμβολογράφημα (Sandwell, and Price, 1998 ; Burgman et al., 2000, Adam et al., 2008).

Συγκεκριμένα η τεχνική της εφαρμογής του βασίζεται στην υψηλή συσχέτιση της φάσης που σχετίζεται με την συνεχή παραμόρφωση της εκάστοτε περιοχής μελέτης εξαλείφοντας ένα μεγάλο βαθμό από τους παράγοντες αποσυσχέτισης που υπάρχουν στα επιμέρους συμβολογραφήματα. Δεδομένο του ασυσχέτιστου χαρακτήρα των παραγόντων αποσυσχέτισης τα σφάλματα εμφανίζονται με χαμηλότερους ρυθμούς σε σχέση με τη σταθερή συσχετιζόμενη φάση. Επομένως το παραγόμενο Σωρευμένο Διαφορικό Συμβολογράφημα περιέχει αυξημένη την φάση που συσχετίζεται με τα παραμορφωτικά φαινόμενα και μειωμένη αυτή που πηγάζει από τους παράγοντες αποσυσχέτισης. Σημαντικό όμως είναι να σημειωθεί ότι οι ατμοσφαιρικές επιρροές αποτελούν και σε αυτή την τεχνική περιοριστικό παράγοντα. Η αντιμετώπιση τους προκύπτει μόνο από την απόρριψη του συγκεκριμένου συμβολογραφήματος από την τεχνική (Zebker and Rosen, 1997; Tosi et al., 2002, Parcharidis et al., 2006)

Τέλος στην τεχνική ορίζεται ένα κοινό σημείο αναφοράς (Reference Point) για την αποτύπωση των σχετικών παρατηρήσεων φάσης. Η επιλογή του σημείου αναφοράς ακλουθεί δύο βασικά κριτήρια τον ένα ποιοτικού χαρακτήρα και το άλλο τοπικών συνθηκών και παραγόντων. Το πρώτο κριτήριο έχει να κάνει με την τοποθέτηση του σημείου σε περιοχές με υψηλά επίπεδα συνάφειας. Ενώ το άλλο κριτήριο έχει να κάνει με τον γεωδυναμικό χαρακτήρα της περιοχής και την τοποθέτηση του σημείου σε σχετικά σταθερές περιοχές. Η τοποθέτηση του σημείου βέβαια ορίζεται και με τις απαιτούμενες ακρίβειες της εκάστοτε εφαρμογής. Στο επιλεγμένο σημείο μηδενίζεται η φάση και σύμφωνα με αυτή προκύπτει ο σχετικός ρυθμός μεταβολής διαφορικής φάσης για όλο το εύρος της εικόνας (Φουμέλης, 2009).

Οι θεμελιώδης αρχές της Σώρευσης (Stacking) Διαφορικών Συμβολογραφημάτων αποτυπώνουν τον μέσο γραμμικό ρυθμό μεταβολής διαφορικής φάσης (phase rate). Ο τύπος που αποτυπώνει τον ρυθμό μεταβολής διαφορικής φάσης και κατ επέκταση την ταχύτητα μετακίνησης στο σύνολο των συμβολογραφημάτων για ένα pixel είναι ως εξής:

$$\dot{\varphi}_{\rho\upsilon\theta\mu.\ \mu\varepsilon\tau\alpha\beta\circ\lambda\eta\varsigma\ \varphi\dot{\alpha}\sigma\eta\varsigma} = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\sum W_i \varphi_{\sigma\upsilon\beta\circ\lambda\circ\gamma\rho\alpha\varphi\dot{\eta}\mu\alpha\tau\circ\varsigma}}{\sum W_i} \qquad (\sigma\varepsilon \ rad/yr)$$

Το W<sub>i</sub> αποτελεί το συντελεστή βαρύτητας στην διαδικασία της τεχνικής στάθμισης και προκύπτει από τα αντίστοιχά χρονικά διαστήματα των συμβολογραφημάτων w<sub>i</sub>=ΔT<sub>i</sub><sup>2</sup>. Το φ΄ αποτελεί την ρυθμό μεταβολή της φάσης και φ η τιμή της εκτυλιγμένης φάσης στο διαφορικό συμβολογράφημα (Hanssen, 2001).

Τα στάδια της μεθοδολογίας Σώρευσης (Stacking) Διαφορικών Συμβολογραφημάτων που απαιτούνται για την παραγωγή του ρυθμού διαχρονικής παραμόρφωσης για την περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας είναι τα παρακάτω.

- Ο Αρχικά τα πρωτογενή δεδομένα που εισάγονται στην τεχνική του (Stacking) αποτελούν τις εκτυλιγμένες διαφορικές φάσεις των συμβολογραφημάτων. Γεγονός που επέβαλε την εκ των προτέρων αξιολόγηση τους, έτσι δεν λήφθηκαν υπ' όψιν τα συμβολογραφήματα που παρουσίαζαν υπολειμματικές φάσεις και θόρυβο από αντίστοιχους παράγοντες αποσυσχέτισης. Η επιλογή των συμβολογραφημάτων και κατ' επέκταση το χρονικό εύρος προσδιορισμού της επιφανειακής παραμόρφωσης αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό και στρατηγική για την μελέτη του εκάστοτε φαινομένου. Στην συγκεκριμένη μελέτη επιλέχτηκαν δύο συγκεκριμένες χρονικές περίοδοι πριν και μετά τον σεισμικό γεγονός, γίνετε εκτενέστερη ανάλυση της στρατηγικής στο επόμενα υποκεφάλαια.
- Το επόμενο στάδιο αποτέλεσε την επιλογή του σημείου αναφοράς. Η τοποθέτηση του σημείου αναφοράς ορίστηκε (ίδια) με το σημείο επιλογής έναρξης εκτύλιξης της συμβολομετρικής φάσης (περιοχή της πόλης του Αγρινίου και συγκεκριμένα στο βόρειο κεντρικό τμήμα της πόλης) με εικονοσυντεταγμένες c:184 l:1412 και γεωγραφικές συντεταγμένες x:274336,381 ψ:4278146,438. Το σημείο αυτό πληρούσε όλα τα κριτήρια χωροθέτησης για το σημείο αναφοράς. Αρχικά από τον υπολογισμό του μέσου όρου της συνάφειας όλων των συμβολογραφημάτων προέκυψε ότι το σημείο αναφοράς είχε τιμή >0.4, δηλαδή αποτελούσε ένα εικονοστοιχείο με σχετικά σταθερή παρουσία σήματος. Επίσης στην συγκεκριμένη περιοχή δεν υπήρχαν καταγραφές γενικότερου καθεστώτος κατακόρυφων κινήσεων από τεκτονισμό, επομένως και αυτό αποτέλεσε σημαντικό χαρακτηριστικό «σταθερότητας» για την επιλογή του σημείου.

- Μετά την επιλογή σημείου αναφοράς, το οποίο αποτελεί και το σημαντικότερο στάδιο της εκτίμησης της διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης, εφαρμόζεται το στατιστικό θεμελιώδες υπόβαθρο της τεχνικής (Stacking). Το αποτέλεσμα που παράγεται είναι ένα προϊόν με τις σωρευμένες φάσεις που αποτυπώνουν τον μέσο ρυθμό μεταβολής των φάσεων ανά χρόνο (rad/yrs).
  Σημαντική παράμετρος στην μεθοδολογία σώρευσης είναι ο ελάχιστος αριθμός ζευγαριών από το σύνολο τους στα οποία οφείλουν να υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες (τιμές διαφορικής φάσης) έτσι ώστε να γίνει η εκτίμηση του ρυθμού παραμόρφωσης. Με αυτό τον τρόπο και με την ιδανική εφαρμογή του ( στο 100%) εξασφαλίζουμε υψηλά επίπεδα συνάφειας ≥ 0.4 αλλά ουσιαστικά περιορίζεται η επιφανειακή κάλυψη στο αστικό περιβάλλον. Για αυτό τον λόγο θέτουμε αυτή την παράμετρο στο 80% του συνόλου των διαφορικών συμβολογραφημάτων προκειμένου να συνεκτιμηθούν και τα επίπεδα συνάφειας αλλά και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.
- Τέλος γίνετε η μετατροπή των τιμών σε μέτρα και στην συνέχεια ο μετασχηματισμός της γεωμετρίας ραντάρ σε ένα γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, στην προκειμένη περίπτωση UTM. (Gamma S/W Documentation, 2007)

# 6.2.1 Προσδιορισμός Επιφανειακής Παραμόρφωσης Πριν το Σεισμικό Γεγονός της Σμηνοσειράς του Απριλίου 2007 [Χρονική Περίοδος: 14/10/2003 – 03/10/2006]

Στο συγκεκριμένα στάδιο της μεθοδολογίας ανιχνεύεται η προσεισμική παραμόρφωση της περιοχής μελέτης. Ουσιαστικά από τα συνολικά 68 συμβολογραφήματα γίνετε η επιλογή των κατάλληλων ημερομηνιών πριν την σμηνοσειρά καθώς και η απόρριψη των συμβολογραφημάτων που παρουσιάζουν υπολειμματική φάση και θόρυβο. Επίσης σημαντικό είναι να τονιστεί ότι η βασική συμβολομετρική γραμμή είναι Β≤150m. Από τα παραπάνω κριτήρια έγινε η επιλογή 17 συμβολογραφημάτων από τα 24 συνολικά πριν το σεισμικό γεγονός (Πίνακας 10).

A/A	Master-slave	Вр	time_s
1	<del>20030805 20040720</del>	<del>-116,417</del>	<del>350</del>
2	<del>20030805 20070220</del>	<del>-98,9777</del>	<del>1295</del>
3	<del>20031014 20040406</del>	<del>-106,752</del>	<del>175</del>
4	20031014 20040511	-19,6101	210
5	20031014 20050531	-37,5644	595
6	<del>20031223 20040720</del>	<del>95,9294</del>	<del>210</del>
7	20031223 20041102	-111,89	315

8	20031223 20050111	-54,5661	384,9
9	<del>20031223 20061003</del>	<del>-147,432</del>	<del>1015</del>
10	<del>20031223 20070220</del>	<del>113,3682</del>	<del>1155</del>
11	20040406 20040511	87,1414	35
12	20040406 20050531	69,1871	420
13	20040511 20050531	-17,9543	385
14	20040720 20070220	17,4388	944,9
15	20040824 20070116	35,5318	874,9
16	20040928 20041102	131,8167	35
17	20040928 20060620	26,8756	630
18	20040928 20061003	96,2746	735
19	20041102 20050111	57,3236	69,9
20	<del>20041102 20060620</del>	<del>-104,941</del>	<del>595</del>
21	20041102 20061003	-35,5421	700
22	20050111 20061003	-92,8657	630
23	20050426 20060725	-105,452	455
24	20060620 20061003	69,399	105

Πίνακας 10 Χαρακτηριστικά Επιλεγμένων Προσεισμικών Διαφορικών Συμβολογραφημάτων (Διαγραμμένα αυτά που παρουσίασαν υπολειμματική φάση και θόρυβο)

Στην συνέχεια τα συμβολογραφήματα αυτά ακολούθησαν τα στάδια της μεθοδολογίας Σώρευσης (Stacking) Διαφορικών Συμβολογραφημάτων και παρήγαγαν τον σχετικό ρυθμού παραμόρφωσης (rad/yrs) για την χρονική περίοδο 14/10/2003 – 03/10/2006. Στην συνέχεια με την βοήθεια του ΨΜΕ της περιοχής έγινε η μετατροπή της τιμή των ακτινίων σε μέτρα και η ο μετασχηματισμός στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς UTM.

# 6.2.2 Προσδιορισμός Επιφανειακής Παραμόρφωσης Μετά το Σεισμικό Γεγονός της Σμηνοσειράς του Απριλίου 2007 [Χρονική Περίοδος: 11/03/2008 – 09/02/2010]

Αντίστοιχα μελετάτε και η περίοδος της μετασεισμικής παραμόρφωσης της περιοχής μελέτης. Και σε αυτή την περίοδο γίνετε η επιλογή των κατάλληλων ημερομηνιών μετά το σεισμικό γεγονός καθώς και η απόρριψη των συμβολογραφημάτων που παρουσιάζουν υπολειμματική φάση και θόρυβο. Με τα αντίστοιχα κριτήρια έγινε η επιλογή 9 συμβολογραφημάτων από τα 11 συνολικά μετά την περίοδο της σμηνοσειράς (Πίνακας 11).

A/A	Master-slave	Вр	time_s
1	20080311 20081111	120,7419	244,9
2	20080311 20090120	84,7235	314,9
3	20080311 20100209	102,9292	699,9
4	20080415 20080902	102,24	140
5	20080729 20081007	-62,2518	70
6	20080729 20090224	-30,3774	210
7	20081007 20090224	31,8744	140

8	<del>20081007 20090505</del>	<del>-131,7747</del>	<del>210</del>
9	20081111 20090120	-36,0184	70
10	<del>20081111 20100209</del>	<del>-17,8127</del>	455
11	20090120 20100209	18,2057	385

Πίνακας 11 Χαρακτηριστικά Επιλεγμένων Μετασεισμικών Διαφορικών Συμβολογραφημάτων (Διαγραμμένα αυτά που παρουσίασαν υπολειμματική φάση και θόρυβο)

Εν συνεχεία, τα συμβολογραφήματα αυτά ακολούθησαν τα στάδια της μεθοδολογίας Σώρευσης (Stacking) Διαφορικών Συμβολογραφημάτων και παρήγαγαν τον σχετικό ρυθμού παραμόρφωσης (rad/yrs) για την χρονική περίοδο 11/03/2008 – 09/02/2010. Στην συνέχεια με την βοήθεια του ΨΜΕ της περιοχής έγινε η μετατροπή της τιμή των ακτινίων σε μέτρα και ο μετασχηματισμός στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς UTM.

# 6.3 Μεθοδολογία Γραμμικού Συνδυασμού Συμβολογραφημάτων (Linear Combination)

Η τεχνική του Γραμμικού Συνδυασμού Συμβολογραφημάτων εφαρμόζετε είτε για την βελτίωση της παρατηρούμενης φάσης σε τοπογραφικές μεταβολές όπου λόγο έλλειψης ή ποιότητας συμβολομετρικών ζευγαριών δεν αποτυπώνετε, είτε ως μια εναλλακτική προσέγγιση της διαφορικής τεχνικής (Massonnet D. & H. Vadon,1996). Ουσιαστικά τα χαμηλά επίπεδα της συνάφειας λόγω παραγόντων αποσυσχέτισης καθώς και της έλλειψης διαθεσιμότητας των δεδομένων, δίδετε η δυνατότητα συνδυασμού χρονικά συνεχόμενων (σε ιδανικές περιπτώσεις) συμβολογραφημάτων για την παραγωγή ψευδο-συμβολογραφημάτων (pseudo-interferogram). Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την αποτύπωση χαμηλού μεγέθους παραμόρφωσης σε μεγαλύτερες χρονικές περιόδους, όπου δεν υπήρχαν εκ των προτέρων ενιαία και συνεκτικά συμβολογραφήματα. Σε περίπτωση μιας μη στιγμιαίας για παράδειγμα γραμμικής παραμόρφωση, αθροίζοντας τα συμβολογραφήματα σε ισοδύναμες περιόδους (περίπου ίδιες ημερομηνίες έναρξης και λήξης). Επιτυγχάνετε έτσι η μείωση της επίδρασης της ατμοσφαιρικής παραμόρφωσης και το παραγόμενο ψευδοσυμβολογράφημα έχει αυξημένη ακρίβεια όσο των αρχικών συμβολογραφημάτων (Parcharidis et al, 2006).

Ο γραμμικός συνδυασμός συμβολογραφημάτων περιγράφεται από την εξίσωση (Gamma Documentation):

$$\Delta_{\varphi} = A_0 + a\varphi_1 + \beta\varphi_2 + \cdots$$
Μεθοδολογία

Οι τιμές της φάσης των συμβολογραφημάτων είναι  $\varphi_1, \varphi_2, ...$  και α,β,... είναι τα ακέραια βάρη που απατούνται για την στάθμιση των συμβολογραφημάτων. Ενώ το  $A_0$  είναι ο σταθερός τελεστής της εξίσωσης  $\Delta_{\phi}$ .

Στην παρούσα εργασία υπήρξε το πρόβλημα έλλειψης κατάλληλων συμβολογραφημάτων για την αποτύπωση και την συμπεριφορά της περιοχής μελέτης κατά την περίοδο εμφάνισης της σμηνοσειράς από της 1 έως της 30 Απριλίου. Επομένως εφαρμόστηκε η τεχνική γραμμικού συνδυασμού συμβολογραφημάτων, με την επιλογή κατάλληλων συμβολομετρικών ζευγαριών, για την παραγωγή ενός ψευδο-συμβολογραφήματος. Βασικό κριτήριο για την επιλογή των ζευγαριών ήταν αρχικά το χρονικός εύρος κάλυψης με σημείο αναφοράς τον Απρίλιο του 2007 και με την τεχνική παράμετρο της επιλογής περίπου ίδιων ημερομηνιών έναρξης και λήξης. Επίσης τα επίπεδα συνάφειας των εικόνων (≥0.4 ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές) αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα. Συγκεκριμένα εφαρμόζοντας γραμμικό συνδυασμό (στην περίπτωση μας πρόσθεση) τριών συμβολογραφημάτων καλύπτοντας την περίοδο 1)2007-01-16/2008-04-1 2)2008-04-15/2008-09-02 3)2008-11-11/2009-01-20 (Πίνακας 12) δημιουργήθηκε ένα ψεύδο-συμβολογράφημα που κάλυπτε την περίοδο από το 2007 έως το 2009. Το ψεύδο-συμβολογράφημα ήταν ικανό να μας αποδώσει την συμπεριφορά της παραμόρφωσης στο χρονικό διάστημα του σεισμού συνδυαζόμενο με τις μετέπιπτα ημερομηνίες.

Πρωτεύουσα εικόνα (ημ/νια)	Δευτερεύουσα εικόνα (ημ/νια)	Άνυσμα βάσης (m)	Χρονικό διάστημα (days)
20070116	20080415	-67,1	455
20080415	20080902	102,2	140
20081111	20090120	-36,0	70

Πίνακας 12 Επιλεγμένα Συμβολογραφήματα Γραμμικού Συνδυασμού Συνσεισμικής Περιόδου

### 7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται τα τελικά αποτελέσματα των τεχνικών σώρευσης (stacking) πριν και μετά το σεισμικό γεγονός καθώς και το παραγόμενο αποτέλεσμα του γραμμικού συνδυασμού (συνσεισμικής περιόδου). Αφού πρώτα, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα δεδομένα μετατράπηκαν από την γεωμετρία του Ραντάρ σε γεωγραφικες συντεταγμένες, έπειτα τα εισήχθησαν σε ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ). Με αυτό τον τρόπο, ήταν πιο εύκολος και πιο ευκρινής ο εντοπισμός και η ανάλυση της εκάστοτε παραμόρφωσης.

Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να τονιστεί ότι, το σημείο αναφοράς θεωρείτε ότι βρίσκεται σε σταθερή περιοχή, παρόλα αυτά η ακριβείς γνώση ότι το σημείο αυτό είναι απολύτως σταθερό ή όχι υπεισέρχεται σε έρευνα πεδίου με gps για την περιοχή. Αυτό συνεπάγεται, ότι οι αρνητικές ταχύτητες παραμόρφωσης δεν σημαίνει ότι αντιπροσωπεύουν καθίζηση αλλά μία πιθανόν μικρότερη ανύψωση του εκάστοτε σημείου σε σχέση πάντα με το σημείο αναφοράς. Συνεπώς, όταν από εδώ και στο εξής χρησιμοποιείται ο όρος καθίζηση ή ανύψωση, αναφέρεται πάντα σε σχετικές τιμές ανάλογα με το σημείο αναφοράς.



Εικόνα 21 Χάρτης Υπο-περιοχών μελέτης (sub-AOI). Βόριο Τμήμα της Λίμνης – Πορτοκαλί / Νότιο Τμήμα της Λίμνης – Πράσινο / Νοτιοανατολικό Τμήμα της Λίμνης «το οποίο εξετάζεται ξεχωριστά λόγο των δύο ρηγμάτων» – Μπλε

Αποτελέσματα

Επίσης για την καλύτερη ερμηνεία και ανάλυση των αποτελεσμάτων η περιοχή μελέτης χωρίζετε σε υπο-περιοχές μελέτης (sub-AOI) (Εικόνα 21). Χρησιμοποιώντας ως κριτήριο τον τεκτονισμό της περιοχής καθώς και την παρουσία μεγάλης συμβολομετρικής συνάφειας και κατ΄ επέκτασης σταθερού συμβολομετρικού σήματος *«που εμφανίζετε κυρίως στον βασικό δομημένο ιστό του εκάστοτε οικισμού»* η περιοχή μελέτης χωρίζετε ως εξής. Το βόριο τμήμα της λίμνης με τους οικισμούς του Παναιτολίου, του Καινούργιου, των Παραβόλων και της Παντάνασσα να είναι σε αυτή. Το νότιο τμήμα της λίμνης με τους οικισμούς των Γραμματικού, της Γκαβαλούς, του Τριχώνιου και του Άγιου Αντρέα. Ενώ η ανάλυση εστιάζει ξεχωριστά και στο νοτιοανατολικό τμήμα της λίμνης που εξετάζετε ξεχωριστά λόγο των δύο ρηγμάτων της περιοχής με τους οικισμού του Παλαιοχωρίου, της Κάτω Μακρινούς και των Σιταραλώνων. Ενώ συμπεριλαμβάνετε και η περιοχή της πόλις του Αγρινίου λόγο προσδιορισμού του σημείου αναφοράς.

# 7.1 Διαχρονική Επιφανειακή Παραμόρφωση Πριν το Σεισμικό Γεγονός της Σμηνοσειράς του Απριλίου του 2007 [Χρονική Περίοδος: 14/10/2003 – 03/10/2006]

Βασικός στόχος της παρούσας ανάλυσης ήταν ο προσδιορισμός της διαχρονικής επιφανειακής παραμόρφωσης πριν το σεισμικό γεγονός. Επικεντρώνοντας στις συγκεκριμένες γεωγραφικές υπό-περιοχές και χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα εργαλεία εντοπισμού στο περιβάλλον των ΣΓΠ έγινε καταγραφή της διαχρονικής μέσης επιφανειακής παραμόρφωσης (mm/yrs).

Κάνοντας μία πρώτη ανάγνωση στον συγκεκριμένο χάρτη παραμόρφωσης για την περιοχή μελέτης παρατηρούνται σταθερές προς καθοδικά μικρές τάσεις της τάξεως των mm/year. Ειδικότερα για τις υπό-περιοχές μελέτης παρατηρούνται τα εξής. Στο Βόριο Τμήμα της Λίμνης ο οικισμός Παναιτόλιο παρουσιάζει μία σταθερότητα με το νότιο τμήμα να υποχωρεί έως -5 mm/year. Το Καινούργιο εμφανίζει καθίζηση περίπου -3 έως -7 mm/year. Αντίστοιχα μοτίβα καθίζησης παρουσιάζουν και οι οικισμοί των Παραβόλων και της Παντάνασσας με ρυθμούς περίπου -3 έως -7 mm/year. Τέλος το Αγρίνιο εμφανίζει σταθερό σήμα με μια μικρή άνοδο στα Νοτιοδυτικά.

Στο Νότιο Τμήμα της Λίμνης ο οικισμός Παπαδάτες παρουσιάζει βύθιση περίπου -4 έως -7 mm/year. Το χωρίο Ματαράγκα εμφανίζει μια σταθερότητα με μικρή βύθιση περίπου -1 έως -3 mm/year, το ίδιο περίπου μοτίβο ακολουθεί και το Γραμματικό. Ο οικισμός Γκαβαλού παρουσιάζει βύθιση περίπου -3 έως -7 mm/year . Ενώ το Τριχώνιο βύθιση περίπου -3 έως -6 mm/year. Τέλος για το νότιο τμήμα ο Άγιος Αντρέας παρουσιάζει καθίζηση περίπου -3 έως -6 mm/year.



Εικόνα 22 Χάρτης Διαχρονικής Συνιστώσας Επιφανειακών Παραμορφώσεων στην Διεύθυνση LOS, για την περίοδο 2003/10/14 – 2006/10/03, βάσει Σώρευσης Διαφορικών Συμβολογραφημάτων εγκάρσιου ανύσματος βάσης <150μ. Δίνεται η θέση του Επιλεγμένου Σημείου Αναφοράς (κόκκινο αστέρι)

Το Νοτιοανατολικό Τμήμα της Λίμνης το οποίο εξετάζετε ξεχωριστά λόγο των δύο ρηγμάτων της περιοχής εμφανίζει και αυτό γενικά καθοδικές τάσεις. Ο οικισμός του Παλαιοχώριου υποχωρεί περίπου -4 έως -8 mm/year. Ενώ πιο νότια στην Κάτω

Μακρινού εμφανίζετε βύθιση περίπου -1 έως -5 mm/year. Τέλος στο οικισμό των Σιταράλωνων η βύθιση εντοπίζετε περίπου -1 έως -5 mm/year.

Κάνοντας μία ειδικότερη στατιστική ανάλυση για τις περιοχές ενδιαφέροντος, που εντοπίζονται στο βασικό τμήμα κάθε οικισμού. Εφαρμόστηκε μέσα από το περιβάλλον GIS ένα εργαλείο στατιστικών ζωνών (zonal statistic) χρησιμοποιώντας ως μετρικό υπόβαθρο το ρυθμό επιφανειακής παραμόρφωσης (mm/yrs) και ως πρότυπες δειγματοληπτικές ζώνες την πολυγωνική οντότητα των δομημένων περιοχών των οικισμών.

Βόριο Τμήμα της Λίμνης				
	Μέγιστο(m)	Ελάχιστο(m)	Μέσος(m)	Τ.Αποκλ
Παραβόλα	-0,0070	-0,0015	-0,0044	0,001
Καινούργιον	-0,0074	-0,0012	-0,0043	0,001
Παντάνασσα	-0,0056	0,0000	-0,0027	0,001
Παναιτώλιον	-0,0052	0,0018	-0,0011	0,001

Νότιο Τμήμα της Λίμνης				
Μέγιστο(m) Ελάχιστο(m) Μέσος(m) Τ.Αποκ				
Τριχώνιον	-0,0060	-0,0006	-0,0038	0,001
Παππαδάται	-0,0074	-0,0007	-0,0046	0,001
Αγιος Ανδρέας	-0,0069	0,0003	-0,0037	0,001
Γαβαλού	-0,0074	-0,0003	-0,0038	0,001
Ματαράγκα	-0,0036	0,0010	-0,0021	0,001
Γραμματικού	-0,0049	0,0014	-0,0016	0,001

Νοτιοανατολικό Τμήμα της Λίμνης				
Μέγιστο(m) Ελάχιστο(m) Μέσος(m) Τ.Αποκ				
Σιταράλωνα	-0,0053	-0,0002	-0,0024	0,001
Παλαιοχώριον	-0,0087	-0,0020	-0,0043	0,001
Κάτω Μακρινού	-0,0057	0,0010	-0,0021	0,001

Πίνακας 13 Βασικά Στατιστικά Επιφανειακών Παραμορφώσεων Διεύθυνση LOS για τους Οικισμούς της Περιοχής Μελέτης , την περίοδο 2003/10/14 – 2006/10/03

Εστιάζοντας στους πίνακες (Πίνακας 13) με τα βασικά στατιστικά μπορεί αμέσως να γίνει αντιληπτό ότι το σύνολο των οικισμών παρουσιάζουν καθίζηση. Χαρακτηριστικό είναι ότι ο μέσος όρος των ρυθμών παραμόρφωσης έκαστου οικισμού εμφανίζει αρνητικής τιμές από -4 έως -1 mm/year. Επίσης πάνω από το 50% των οικισμών παρουσιάζουν αρνητικό πρόσημο και στο μέγιστο και στο ελάχιστο των ρυθμών



Διάγραμμα 1 Μέσος Όρος Επιφανειακών Παραμορφώσεων Διεύθυνση LOS για τους Οικισμούς της Περιοχής Μελέτης, την περίοδο 2003/10/14 – 2006/10/03. Βόριο Τμήμα της Λίμνης – Πορτοκαλί / Νότιο Τμήμα της Λίμνης – Πράσινο / Νοτιοανατολικό Τμήμα της Λίμνης «το οποίο εξετάζετε ξεχωριστά λόγο των δύο ρηγμάτων» – Μπλε

Παρατηρώντας το διάγραμμα (Διάγραμμα 1) μέσης παραμόρφωσης επαληθεύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ερμηνεία του χάρτη παραμόρφωσης για την περιοχή μελέτης πριν το σεισμικό γεγονός. Στο διάγραμμα είναι εμφανές ότι το βόριο τμήμα (πορτοκαλί ράβδοι), το νότιο τμήμα (πράσινοι ράβδοι) και το νοτιοανατολικό τμήμα της λίμνης (μπλέ ράβδοι) απαρτίζουν σταθερές προς καθοδικά μικρές τάσεις της τάξεως των mm/year.

## 7.2 Διαχρονική Επιφανειακή Παραμόρφωση Μετά το Σεισμικό Γεγονός της Σμηνοσειράς του Απριλίου του 2007 [Χρονική Περίοδος: 11/03/2008 – 09/02/2010]

Ακλουθώντας το ίδιο σκεπτικό με την παραπάνω ανάλυση εξετάστηκε η επιφανειακή παραμόρφωση μετά το σεισμικό γεγονός της σμηνοσειράς του Απριλίου του 2007. Κάνοντας μία πρώτη ανάγνωση στον συγκεκριμένο χάρτη παραμόρφωσης για την περιοχή μελέτης παρατηρείτε ότι οι καθοδικοί ρυθμοί παραμόρφωσης έχουν αυξηθεί σε σχέση με τον χάρτη πριν το σεισμικό γεγονός.



Εικόνα 23 Χάρτης Διαχρονικής Συνιστώσας Επιφανειακών Παραμορφώσεων στην Διεύθυνση LOS, για την περίοδο 2008/03/11 – 2010/02/09, βάσει Σώρευσης Διαφορικών Συμβολογραφημάτων εγκάρσιου ανύσματος βάσης <150μ. Δίνεται η θέση του Επιλεγμένου Σημείου Αναφοράς (κόκκινο αστέρι)

Ειδικότερα για τις υπό-περιοχές μελέτης παρατηρούνται τα εξής. Στο Βόριο Τμήμα της Λίμνης ο οικισμός Παναιτόλιο παρουσιάζει μία σταθερότητα με το νότιο τμήμα να υποχωρεί έως -1cm/year. Το Καινούργιο εμφανίζει καθίζηση περίπου -3 έως -9mm/year. Αντίστοιχα οι οικισμός των Παραβόλων και της Παντάνασσας με ρυθμούς καθίζησης έως -1,1cm/year και -4mm/year έως -1cm/year. Τέλος το Αγρίνιο εμφανίζει σταθερό σήμα με μια μικρή καθίζηση στα Νοτιοανατολικά και μικρή άνοδο στα Βόρεια και Νοτιοδυτικά.

Στο Νότιο Τμήμα της Λίμνης ο οικισμός Παπαδάτες παρουσιάζει βύθιση έως -1cm/year. Το χωρίο Ματαράγκα εμφανίζει μια σταθερή προς μικρή βύθιση περίπου -8mm/year, το ίδιο περίπου μοτίβο ακολουθεί και το Γραμματικό με ρυθμούς -7mm/year. Στην περίπτωση του Γραμματικού η περιοχή προς το πρανές είναι σταθερή και προς την λεκάνη περίπου -7mm/year. Ο οικισμός Γκαβαλού παρουσιάζει βύθιση έως -9mm/year . Ενώ το Τριχώνιο παρουσιάζει μία πολύ μικρή βύθιση έως -2mm/year. Τέλος για το νότιο τμήμα ο Άγιος Αντρέας παρουσιάζει καθίζηση έως -1cm/year.

Το Νοτιοανατολικό Τμήμα της Λίμνης το οποίο εξετάζετε ξεχωριστά λόγο των δύο ρηγμάτων της περιοχής εμφανίζει και αυτό γενικά καθοδικές τάσεις. Ο οικισμός του Παλαιοχώριου υποχωρεί έως -1cm/year. Ενώ πιο νότια στην Κάτω Μακρινού εμφανίζετε βύθιση έως -8mm/year. Τέλος στο οικισμό των Σιταράλωνων η βύθιση εντοπίζετε μικτή με τιμές από +5mm/year έως -5mm/year με μία ιδιαίτερη περίπτωση και άξιας αναφοράς μιας εγγύς περιοχής με ένα πιθανό πρανές που ολισθάνει.

Αντίστοιχα εφαρμόστηκε το ίδιο χωρικό-στατιστικό εργαλείο με τις δομημένες περιοχές των οικισμών και το υπόβαθρο των ρυθμών παραμόρφωσης για την περιοχή.

Βόριο Τμήμα της Λίμνης				
Μέγιστο(m) Ελάχιστο(m) Μέσος(m) Τ.Αποκ				
Παραβόλα	-0,0113	0,0019	-0,0051	0,002
Καινούργιον	-0,0091	0,0040	-0,0020	0,001
Παντάνασσα	-0,0107	0,0026	-0,0050	0,002
Παναιτώλιον	-0,0108	0,0031	-0,0045	0,002

Νότιο Τμήμα Λίμνης					
Μέγιστο(m) Ελάχιστο(m) Μέσος(m) Τ.Αποκί					
Τριχώνιον	-0,0087	0,0072	-0,0003	0,003	
Παππαδάται	-0,0113	0,0040	-0,0036	0,002	
Αγιος Ανδρέας	-0,0119	0,0050	-0,0059	0,003	
Γαβαλού	-0,0094	0,0019	-0,0032	0,002	
Ματαράγκα	-0,0085	0,0059	0,0000	0,002	
Γραμματικού	-0,0071	0,0045	-0,0006	0,002	

Νοτιοανατολικό Τμήμα της Λίμνης			
Μέγιστο(m)	Ελάχιστο(m)	Μέσος(m)	Τ.Αποκλ

Σιταράλωνα	-0,0058	0,0057	0,0008	0,002
Παλαιοχώριον	-0,0102	0,0021	-0,0032	0,002
Κάτω Μακρινού	-0,0081	0,0052	-0,0013	0,002

Πίνακας 14 Βασικά Στατιστικά Επιφανειακών Παραμορφώσεων Διεύθυνση LOS για τους Οικισμούς της Περιοχής Μελέτης , την περίοδο 2008/03/11 – 2010/02/09.



Διάγραμμα 2 Μέσος Όρος Επιφανειακών Παραμορφώσεων Διεύθυνση LOS για τους Οικισμούς της Περιοχής Μελέτης, την περίοδο 2008/03/11 – 2010/02/09. Βόριο Τμήμα της Λίμνης – Πορτοκαλί / Νότιο Τμήμα της Λίμνης – Πράσινο / Νοτιοανατολικό Τμήμα της Λίμνης «το οποίο εξετάζετε ξεχωριστά λόγο των δύο ρηγμάτων» – Μπλε

Εστιάζοντας στους πίνακες (Πίνακας 14) και τα διαγράμματα (Διάγραμμα 2 και 3) με τα βασικά στατιστικά μπορεί αμέσως να γίνει αντιληπτό ότι το σύνολο των οικισμών και σε αυτή την περίπτωση καθιζάνουν, εκτός των Σιταραλώνων. Στις περισσότερες περιπτώσεις με μεγαλύτερους ρυθμούς σε σύγκριση με τον χάρτη πριν την σμηνοσειρά. Χαρακτηριστικό είναι ότι ο μέσος όρος των ρυθμών παραμόρφωσης έκαστου οικισμού εμφανίζει αρνητικής τιμές από -1cm/year έως -5mm/year. Οι μεγαλύτεροι ρυθμοί παραμόρφωσης πιθανά να ερμηνεύονται από το ισχυρό σεισμικό γεγονός της σμηνοσειράς του Απριλίου του 2007. Οι τάσεις αυτές απεικονίζονται και στο διάγραμμα με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των ρυθμών παραμόρφωσης των δύο χαρτών για τις περιοχές των οικισμών.



Διάγραμμα 3 Μέγιστες και Ελάχιστες Τιμές Ρυθμών Παραμόρφωσης Οικισμών Πριν και Μετά την Σμηνοσειρά του Απριλίου του 2007

# 7.3 Ανάλυση Γραμμικού Συνδυασμού Συμβολογραφημάτων (Linear Combination) [i)16-01-2007/15-04-2008 ii) 15-04-2008 /02-09-2008 iii) 11-11-2008/24-01-2009]

Εφαρμόζοντας γραμμικό συνδυασμό (στην περίπτωση μας πρόσθεση) τριών συμβολογραφημάτων καλύπτοντας την περίοδο 1)2007-01-16/2008-04-1 2)2008-04-15/2008-09-02 3)2008-11-11/2009-01-20 δημιουργήθηκε ένα ψεύδοσυμβολογράφημα που κάλυπτε την περίοδο από το 2007 έως το 2009. Το ψεύδοσυμβολογράφημα ήταν ικανό να μας αποδώσει την συμπεριφορά της παραμόρφωσης στο χρονικό διάστημα του σεισμού συνδυαζόμενο με τα άλλα συμβολογραφήματα. Βασικό κριτήριο για την επιλογή των ζευγαριών ήταν αρχικά το χρονικός εύρος κάλυψης με σημείο αναφοράς τον Απρίλιο του 2007 και με την τεχνική παράμετρο της επιλογής περίπου ίδιων ημερομηνιών έναρξης και λήξης. Κάνοντας μία πρώτη ανάγνωση στον συγκεκριμένο χάρτη παραμόρφωσης της περιοχής είναι σταθερό με μικρούς ρυθμούς καθίζησης, ενώ αντιθέτως το νότιο τμήμα εμφανίζει μία ανοδική τάση. Χαρακτηριστικό επίσης είναι ότι στην υπο-περιοχή του νοτιοανατολικού τμήματος της λίμνης το δυτικό τμήμα εμφανίζει μία χαρακτηριστική άνοδο ενώ το ανατολικό μία σημαντικού βαθμού κάθοδο.



Εικόνα 24 Χάρτης Διαχρονικής Συνιστώσας Επιφανειακών Παραμορφώσεων στην Διεύθυνση LOS, με τον γραμμικό συνδυασμό των Συμβολογραφημάτων i)2007-01-16/2008-04-15 ii)2008-04-15/2008-09-02 iii)2008-11-11/2009-01-24, με εγκάρσιου ανύσματος βάσης <150μ. Δίνεται η θέση του Επιλεγμένου Σημείου Αναφοράς (κόκκινο αστέρι)

Ειδικότερα για τις υπό-περιοχές μελέτης παρατηρούνται τα εξής. Στο Βόριο Τμήμα της Λίμνης ο οικισμός Παναιτόλιο παρουσιάζει μία σταθερότητα με το νότιο τμήμα να υποχωρεί. Το Καινούργιο παρουσιάζει μία καθίζηση περίπου -9mm/year έως -1,9 cm/year. Ο οικισμός των Παραβόλων εμφανίζει και αυτός μία μικρή κάθοδο της τάξης -9 mm/year. Ενώ στην Παντάνασσα εντοπίζονται μεικτοί ρυθμοί παραμόρφωσης. Τέλος το Αγρίνιο εμφανίζει σταθερό σήμα με μια καθίζηση στα Νοτιοδυτικά της τάξης των -2,3 cm/year. Στο Νότιο Τμήμα της Λίμνης ο οικισμός Παπαδάτες παρουσιάζει μια σταθερότητα με μικρή άνοδο έως 1cm/year. Ο οικισμός της Ματαράγκας εμφανίζει μια ανοδική τάση περίπου 2,5cm/year, το ίδιο περίπου μοτίβο ακολουθεί και το Γραμματικό με ρυθμούς 2cm/year. Ο οικισμός Γκαβαλού παρουσιάζει άνοδο περίπου 2cm/year. Ενώ το Τριχώνιο που βρίσκετε μέσα στην λεκάνη παρουσιάζει μία βύθιση περίπου -1cm/year. Τέλος για το νότιο τμήμα ο Άγιος Αντρέας παρουσιάζει και αυτό μια ανοδική τάση της τάξης έως 2,2cm/year.

Στο Νοτιοανατολικό Τμήμα της Λίμνης το οποίο εξετάζετε ξεχωριστά λόγο των δύο ρηγμάτων της περιοχής εμφανίζει όπως προαναφέρθηκε μία διαφορετική χωρική κατανομή παραμόρφωσης. Το δυτικό τμήμα με τους οικισμούς του Παλαιοχώριου και της Κάτω Μακρινούς να ανυψώνετε με ρυθμούς περίπου 1cm/year. Ενώ το ανατολικό τμήμα με τον οικισμό των Σιταράλωνων παρουσιάζει ένα αρκετά μεγάλο ρυθμό καθίζησης με τις μέγιστές τιμές να εντοπίζονται έως 3cm/year.

	Μέγιστο (m)	Ελάχιστο(m)	Μέσος(m)				
Βόριο Τμήμα της Λίμνης							
Παραβόλα	-0,018	0,015	-0,002				
Καινούργιον	-0,019	0,009	-0,005				
Παντάνασσα	-0,029	0,026	-0,001				
Παναιτώλιον	-0,027	0,016	-0,006				
	Νότιο Τμήμα Λίμ	νης					
Τριχώνιον	-0,017	0,010	-0,004				
Παππαδάται	-0,012	0,025	0,007				
Αγιος Ανδρέας	-0,008	0,022	0,007				
Γαβαλού	-0,009	0,021	0,006				
Ματαράγκα	-0,009	0,030	0,010				
Γραμματικού	-0,011	0,021	0,005				
Νοτιοανατολικό Τμήμα της Λίμνης							
Σιταράλωνα	-0,030	0,009	-0,011				
Παλαιοχώριον	-0,013	0,030	0,009				
Κάτω Μακρινού	-0,014	0,025	0,005				

Πίνακας 15 Βασικά Στατιστικά Επιφανειακών Παραμορφώσεων Διεύθυνση LOS για τους Οικισμούς της Περιοχής Μελέτης ψεύδο-συμβολογραφήματος .

Αποτελέσματα



Διάγραμμα 4 Μέσος Όρος Επιφανειακών Παραμορφώσεων Διεύθυνση LOS ψεύδο-συμβολογραφήματος για τους Οικισμούς της Περιοχής Μελέτης . Βόριο Τμήμα της Λίμνης – Πορτοκαλί / Νότιο Τμήμα της Λίμνης – Πράσινο / Νοτιοανατολικό Τμήμα της Λίμνης «το οποίο εξετάζετε ξεχωριστά λόγο των δύο ρηγμάτων» – Μπλε

Τα χωρικά μοτίβα (patterns) της παραμόρφωσης επαληθεύονται και με το χωρικόστατιστικό εργαλείο με τις δομημένες περιοχές των οικισμών και το υπόβαθρο των ρυθμών παραμόρφωσης για την περιοχή. Στο διάγραμμα (Διάγραμμα 4) είναι εμφανές ότι το βόριο τμήμα (πορτοκαλί ράβδοι) της περιοχής είναι σταθερό με μικρούς ρυθμούς καθίζησης, ενώ αντιθέτως το νότιο τμήμα (πράσινοι ράβδοι) εμφανίζουν μία ανοδική τάση. Επίσης για την υπο-περιοχή του νοτιοανατολικού τμήματος της λίμνης (μπλέ ράβδοι) το δυτικό τμήμα εμφανίζει μία χαρακτηριστική άνοδο (Παλαιχώρι και Κάτω Μακρινού) ενώ το ανατολικό μία σημαντικού βαθμού κάθοδο.

Τέλος με τα κατάλληλα εργαλεία των ΣΓΠ δημιουργήθηκε είναι θεματικός χάρτης (Εικόνα 25) με τα τρία παραγόμενα αποτελέσματα (Διαχρονική Επιφανειακή Παραμόρφωση Πριν το Σεισμικό Γεγονός, Διαχρονική Επιφανειακή Παραμόρφωση Μετά το Σεισμικό Γεγονός της Σμηνοσειράς του Απριλίου του 2007 και το co-seismic με το ψευδο-συμβολογράφημα 1)2007-01-16/2008-04-15 2)2008-04-15/2008-09-02 3)2008-11-11/2009-02-24.) αποτυπώνοντας με αναλογικά βέλη τον ανοδικό ή καθοδικό ρυθμό παραμώρφσης σε κάθε περίπτωση.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα αρχικά παρατηρίται ότι στον χάρτη (Εικόνα 25) παραμόρφωσης για την περιοχή μελέτης μετά το σεισμικό γεγονός οι καθοδικοί ρυθμοί παραμόρφωσης έχουν αυξηθεί σε σχέση με τον χάρτη πριν το σεισμικό γεγονός. Το ψευδο-συμβολογράφημα που περιέχει ουσιαστικά την co-seismic πληροφορία αναδικνύει ότι τα χωρικά μοτίβα αλλάζουν με το νότιο τμημα να

Αποτελέσματα

εμφανίζει ανοδικούς ρυθμούς σε σχέση με τις τάσεις των σωρευμένων συμβολογραφημάτων πριν και μετά την σμηνοσειρά. Ενώ και το νοτιοανατολικό τμήμα της λίμνης, που εξετάζετε ξεχωριστά λόγο της παρουσίας των δύο ρηγμάτων της περιοχής που εντοπίζετε και η σμηνοσειρά του Απριλίου του 2007, εμφανίζει ένα διαφορετικό μοτίβο παραμόρφωσης με το δυτικό τμήμα να ανυψώνετε και το ανατολικό τμήμα να υποχωρεί με μεγάλου ρυθμούς. Σημαντικό χαρακτηριστικό που πιθανά να ερμηνεύει και τις αντίστοιχές μελέτες που αναδεικνύουν τον νέο τεκτονικό καθεστώς που προσδιορίστηκε από την σμηνοσειρά του Απριλίου του 2007.

Τέλος σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελεί και η συσχέτιση των αποτυπωμένων περιοχών και των παραμορφώσεων της με το γεωλογικό υπόβαθρο (Εικόνα 14) της περιοχής. Συνδυάζοντας τους χάρτες παραμόρφωσης (Εικόνα 25) με τον γεωλογικό χάρτη αποτυπώνετε ότι όλες οι περιοχές - οικισμοί που μελετούνται εντοπίζονται σε κοκκώδεις - σύγχρονους προσχηματισμούς τεταρτογενούς. Το συγκεκριμένο γεωλογικό υπόβαθρο αποτελείται από αλουβιακές αποθέσεις και από αλουβιακά ριπίδια. Οι συγκεκριμένοι σχηματισμοί κατά την γένεση τους περιέχουν μεγάλα ποσοστά νερού με την πάροδο του χρόνου το νερό αφαιρείτε από διάφορες διεργασίες, όπως την εναπόθεση νέο σχηματισμών με αποτέλεσμα την συμπύκνωση τους (compaction). Η διαδικασία αυτή σε συνδυασμό με τη παρουσία ρηγμάτων στην περιοχή πιθανά να αποδίδει και τις καθοδικές τάσεις πριν και μετά το σεισμικό γεγονός.

Εικόνα 25 Χάρτης Συνολικής Αναπαράστασης Αποτελεσμάτων (preseismic, coseismic και postseismic) με Αναλογικό Συμβολισμό Παραμόρφωσης ± 5mm/yrs (βέλη).

Αποτελέσματα



Συμπεράσματα

#### 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, η θεμελιώδη ιδέα που προκύπτει είναι η αποτελεσματική και σημαντική θέση της Γεωπληροφορικής σε ένα μεγάλο εύρος παρακολούθησης και ανάλυσης φυσικών φαινομένων. Κάνοντας μια επισκόπηση παρατηρήθηκε ότι σε όλα τα στάδια της μεθοδολογίας για την επεξεργασία και την ερμηνεία των δεδομένων υπήρξαν τα κατάλληλα εργαλεία που ανταποκρίθηκαν σε όλες τις διαδικασίες. Ενώ συγκεκριμένα, η τεχνική της Διαφορικής Συμβολομετρίας (DInSAR), μπορεί να θεωρηθεί και να χαρακτηριστεί ως μία αποτελεσματική τεχνολογία παρατήρησης και υπολογισμού της εδαφικής παραμόρφωσης, ανεξάρτητο από το αίτιο που την προκαλεί φυσικό ή ανθρωπογενές.

Συνοπτικά με την χρήση κατάλληλων συμβολομετρικών τεχνικών αποτυπώθηκε η διαχρονική παραμόρφωση της επιφάνειας πριν και μετά το σεισμικό γεγονός, ενώ αναλύθηκε και η σεισμική περίοδος με τον συνδυασμό συμβολογραφημάτων. Οι βασικοί άξονες των αποτελεσμάτων είναι, πρώτον οι μεγαλύτεροι ρυθμοί παραμόρφωσης μετά την περίοδο της σμηνοσειράς σε σχέση με πριν καθώς και τα διαφορετικά μοτίβα (patterns) παραμόρφωσης κατά την περίοδο της. Δεύτερος άξονας που προκύπτει από την μελέτη είναι η επαλήθευση των μελετών που αναδεικνύουν τον νέο τεκτονικό καθεστώς που προσδιορίστηκε από την σμηνοσειρά του Απριλίου του 2007 με δύο «νέα» ενεργά ρήγματα στο νοτιοανατολικό τμήμα της λίμνης. Τέλος, οι προκείμενες εδαφικές παραμορφώσεις, είναι πιθανό να οφείλονται σε αρκετές παραμέτρους. Συνοπτικά, μπορεί να οφείλονται στη σεισμικότητα της περιοχής, στην ύπαρξη των ενεργών ρηγμάτων, στο γεωμορφολογικό υπόβαθρο της περιοχής καθώς και στον συνδυασμό τους.

Η μελετητική συνεισφορά της εργασίας οριοθετείτε βασικά στον επιστημονικό κλάδου της συμβολομετρίας σε συνδυασμό με τις επιστημονικές ενότητες της σεισμολογίας και του τεκτονισμού. Βολιδοσκοπώντας τις βιβλιογραφικές αναφορές των αντιστοιχών μελετών, απαριθμείτε ένα μεγάλος πλήθος ερευνών με τις συγκεκριμένες ενότητες και την παρατήρηση αντίστοιχων φαινομένων.

Η παρούσα πτυχιακή μελέτη συμβάλει στην προσθήκη γνώσης για τον τεκτονισμό της περιοχής μελέτης, ενώ αποδίδει και τις τάσεις της επιφανειακής παραμορφώσεις. Αποκτάται επομένως μία πλησιέστερη εικόνα του γεωδυναμικού καθεστώτος της περιοχής ενώ επαληθεύονται και οι αντίστοιχές μελέτες που αναδεικνύουν τον νέο τεκτονικό καθεστώς που προσδιορίστηκε από την σμηνοσειρά του Απριλίου του 2007.

Κατά την εκπόνηση της εργασίας αντιμετωπίστηκαν κάποια προβλήματα, μία σειρά αυτών ξεπεράστηκαν ενώ άλλα αποτέλεσαν περιοριστικός παράγοντας για την μελέτη. Ο βασικός περιοριστικός παράγοντας αποτέλεσε η έλλειψη περισσοτέρων ραντάρ εικόνων για την περιοχή μελέτης. Με το μεγαλύτερο πλήθος εικόνων και κατά την άνοδο και κατά την κάθοδο (ascending & descending) του δορυφόρου θα ήταν ικανή η δημιουργία περισσοτέρων συμβολομετρικών ζευγαριών, με πιθανές ημερομηνίας και κοντά στην σμηνοσειρά του Απριλίου του 2007 που θα αποτελούσε σημαντική συμβολομετρική πληροφορία.

Ακόμη ένα πρόβλημα, το οποίο ξεπεράστηκε, ήταν η δημιουργία της χωρικής βάσης δεδομένων για την περιοχή μελέτης. Λόγο έλλειψης αντίστοιχου οργανισμού τα προηγούμενα χρόνια τα γεωγραφικά δεδομένα υπάρχουν σε συγκεκομμένες μορφές με διαφορετικό γεωγραφικό σύστημα αναφοράς. Για αυτό τον λόγο η συλλογή τους και η εναπόθεση τους σε μία χωρική βάση δεδομένων αποτέλεσε μία χρονοβόρα διαδικασία.

Τέλος, άξια αναφοράς είναι η μελλοντική ερευνητική μελέτη για την περιοχή. Ξεπερνώντας την περιοριστική παράμετρο των εικόνων και εφαρμόζοντας μεθόδους όπως η Τεχνική των Σταθερών Σκεδαστών (Permanent Scatters Interferomtry – PSI) ή (SBAS) μπορούμε, για την περιοχή μελέτης, να δούμε πιο ειδικά τα χωρικά μοτίβα (spatial patterns) της παραμόρφωσης. Επίσης, η εφαρμογή μετρήσεων μίας συγγενής τεχνολογίας, όπως τα GPS, για την περιοχή μελέτης, θα αποτελούσε σημαντική γεωγραφική πληροφορία για τις τάσεις μετακίνησης των περιοχών αυτών. Ενώ τέλος, η συλλογή δεδομένων, όπως η καταγραφή των γεωτρήσεων και των τοπικών γεωμορφολογικών και γεωλογικών σχηματισμών, θα αποτελούσε μία σημαντική πληροφορία συσχέτισης με το φαινόμενο της εδαφικής παραμόρφωσης.

# 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

#### Ελληνική Βιβλιογραφία

- Καρτάλης, Κ. και Χ. Φείδας, 2006. Αρχές και εφαρμογές της δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Β. Γκιούδας Εκδοτική, Αθήνα.
- Μερτίκας Στ. 1999. Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας. Παρίκου Σ. & ΣΙΑ ΟΕ, Αθήνα.
- Μιγκίρος Γ., Α. Παυλόπουλος, Ι. Παρχαρίδης, Ι Γατσής, Ε. Ψωμιάδης, 2003, Τηλεπισκόπιση ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΙΣ ΓΕΩΕΠΙΣΤΗΜΕΣ, Αθήνα 2003 – Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο
- Φουμέλης Μ., 2009, ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΥΡΗΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΘΗΝΩΝ ΒΑΣΕΙ ΔΙΑΦΟΡΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ GPS ΚΑΙ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΡΑΝΤΑΡ, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών / Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος / Τομέας Γεωφυσικής και Γεωθερμίας, Αθήνα, 374 σελ.
- Ψιλοβίκος Α, Αλπανάκης Κ., Παλικαρίδης Χ και Βουβαλίδης Κ, 1998, Περιβαλλοντική Αξία και Σημασία της Λίμνης Τριχωνίδας ως του μεγαλύτερου φυσικού ταμιευτήρα καθαρού νερού της Ελλάδας, Πρακτικά 4<sup>ου</sup> Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου, Ελληνική Γεωγραφική Εταιρία, Αθήνα.

#### Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Adam,N. Eineder, Yague-Martinez,N., Bamler,R., 2008, High Resolution Interferometric Stacking with TerraSAR-X Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International Volume: 2 Page(s): II-117 - II-120
- Born, M., Wol, E., 1980. Principles of Optics, 6 ed: Pergamon Press.
- Burgman, R., Rosen, PA and Fielding EJ, 2000, Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. Annual Review Earth Planet Science 2000, 28:169-209.
- Chen Curtis W. and Zebker Howard A., 2000, "Network approaches to twodimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms," Journal of the Optical Society of America A, volume 17, pp. 401-414, March 2000.
- Costantini, M., 1998, A novel phase unwrapping method based on network programming, 1998, IEEE Trans. GARS, 36 (3), 813 821.
- Crosetto M., B. Crippa , E. Biescas , O. Monserrat , M. Agudo, 2005, STATE-OF-THE-ART OF LAND DEFORMATION MONITORING USING DIFFERENTIAL SAR INTERFEROMETRY,<u>http://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/126-</u> crosetto.pdf
- Dibble Sandra, 2008, "Ground stays still, but residents in quake area rattled". *The San Diego Union-Tribune*, Retrieved -08-27.

- Doulka Evangelia, Kehayias Spatial and temporal distribution of zooplankton in Lake Trichonis (Greece), George Source: Journal of Natural History, Volume 42, Numbers 5-8, 2008, pp. 575-595(21)
- Doutsos, T., N. Kontopoulos, and D. Frydas (1987). Neotectonic evolution of northwesterncontinental Greece, Geol. Rundsch. 76, 433–450.
- Evangelidis C. P., Konstantinou K. I., Melis N. S., Charalambakis M., Stavrakakis G. N., 2008, Waveform relocation and focal mechanism analysis of an earthquake swarm in Trichonis lake, western Greece, *Bull. Seism. Soc. Am.* 98(2), pp. 804-811.
- Ferretti, A., Novalo, F., Burgmann, R., Hilley, G. & Prati, C., 2004. InSAR Permanent Scatterer Analysis Reveals Ups and Downs in San Francisco Bay Area. EOS, 85(34), 1-3.
- Ferretti, A., Prati., C., Rocca, F. and Monti Guarnieri, A., 1997. Multibaseline SAR interferometry for auomatic 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.
- Fletcher Karen, (2007), InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, ESA Publications ESTEC Postbus 299 2200 AGNoordwijk The Netherlands Copyright: © 2007 European Space Agency
- Fukushima, Y. Takada, Y., Ozawa, T., Hashimoto, M., 2011, ALOS/PALSAR Observations Associated with the 2011 Mw 9.0Tohoku, Japan, Earthquake, American Geophysical Union, Fall Meeting 2011, abstract #G44A-05
- Gabriel A., R. Goldstein, (1988), Crossed orbits interferometry: theory and experimental results from SIR-B, International Journal on Remote sensing, No.5, pp. 857-872, 1988.
- Gamma Remote Sensing, 2007, Documentation Theory Interferometric SAR Processing Version 1.0, GAMMA Remote Sensing AG, Worbstrasse 225, CH-3073 Gümligen, Switzerland
- Gamma Remote Sensing. GAMMA Software Documentation, 2006.
- GENS, R, (1998), *Quality assessment of SAR interferometric data*. Doctoral thesis, University of Hannover, Germany, 141 pages
- Geudtner, D., 1996. The interferometric processing of ERS-1 SAR. Technical Report, ERS-TT-1341 (Technical Translation of DLR-FB 95-28), European Space Agency, ESA-ESRIN, Frascati, Italy
- Goldstein R M and Werner C L, 1998, Radar interferogram filtering for geophysical applications, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 25, NO. 21, PP. 4035-4038, 1998 doi:10.1029/1998GL900033
- Goldstein R., 1995, "Atmospheric Limitations to repeat-pass, Interferometry", Geophysical Research Letters, vol. 22, no. 18, pp. 2517-2520, September

- Goldstein Richard M and Charles L Werner., 1998, Radar interferogram filtering for geophysical applications. Geophysical Research Letters, 25(21):4035-4038, November.
- Goldstein, R., Zebker, H., Werner, C., 1988, Satellite radar interferometry: two dimensional phase unwrapping, Radio Science, Vol. 23, N. 4, pp. 713 720, Aug. 1988.
- Goldsworthy, M., J. Jackson, and J. Haines, 2002, The continuity of active fault systems in Greece, Geophys. J. Int. 148, 596–618.
- Graham L.C., (1974), Synthetic interferometer radar for topographic mapping. Proceedings of the IEEE, 62(6):763-768, June 1974.
- Hanssen R F, 2001, Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis: Kluwer Academic Press, Dordrecht, The Netherlands, 289p.
- Kiratzi, A., Sokos, E., Ganas, A., Tselentis, A., Benetatos, C., Roumelioti, Z., Serpetsidaki, A., Andriopoulos, G., Galanis, O., Petrou, P., 2008. The April 2007 earthquake swarm near Lake Trichonis and implications for active tectonics in western Greece, *Tectonophysics* 452, 51-65.
- Kontoes C.C, 1999, "Mapping Athens from Space. High resolution satellite Imagery for Urban Mapping", GIM, No 9, Vol. 13, pp. 92-95.
- Marriott, A, 2011, The performance of heritage buildings in the 2010/2011 Christchurch earthquake swarm, 16th Engineering Heritage Australia Conference: Conserving Our Heritage - Make a Difference! 13-16 November 2011, Hobart, Tasmania
- Massmann F.-H., K.H. Neumayer, J.C Raimondo, K. Enninghorst and H. Li, 1997, "Quality of the D-PAF ERS Orbits before and after the Inclusion of PRARE Data", Proc. 3rd ERS Symposium, ESA SP-414 Vol. III, pp1655-1660.
- Massonnet D. and K.L. Feigl, 1998, Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. Reviews of Geophysics, 36(4):441-500, November 1998.
- Massonnet D., H. Vadon 1996: Reduction of the need for phase unwrapping In : *IEEE Transactions* on Geoscience and Remote Sensing
- Papanikolaou, I.D., Foumelis, M., Parcharidis, I., Lekkas, E.L. & Fountoulis, I.G., 2010. Deformation pattern of the 6 and 7 of April 2009, Mw=6.3 and Mw=5.6 earthquakes in L' Aquila (Central Italy) revealed by ground and space based observations. Natural Hazards and Earth System Sciences 10, 73-87.
- Papazachos, B., and K. Papazachou (1997). The Earthquakes of Greece, Ziti Editions, Thessaloniki, Greece.
- Parcharidis Is., E. Lagios, V. Sakkas, D. Raucoules, D. Feurer, S. Le Mouelic, C. King, C. Carnec, F. Novali, A. Ferretti, R. Capes, and G. Cooksley, 2006, Subsidence monitoring within the Athens Basin (Greece) using space radar interferometric techniques, *Earth Planets Space*, 58, 505–513, 2006

- Parcharidis, I., Foumelis, M., Kourkouli, P., Wegmuller, U., 2009. Persistent catterers 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.
- Pritt M.D., 1997, "Congruence in Least-Squares Phase Unwrapping," In International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Singapore, 3-8 August 1997, pp. 875-877,
- Pritt, M.D. and J.S. Shipman, 1994, Least-squares two-dimensional phase unwrapping using FFT's, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on Volume: 32, Issue: 3 Page(s): 706 - 708
- Samson, J. 1996, Coregistration in SAR Interferometry: MSc Thesis April 1998, Delft University
- Sandwell, D.T. and E.J. Price, 1998, Phase gradient approach to stacking interferograms, JGR, vol.103, pages 30183-30204,
- Scharoo, R., Visser, P.N.M.A.M., 1998. Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites. J. Geophys. Res., 103, 8113-8127.
- Schwäbisch M, Geudtner D 1995, Improvement of Phase and Coherence Map Quality Using Azimuth Prefiltering: Examples of ERS-1 and X-SAR, Proc. IGARSS '95, Firenze, pp. 205-207
- Schwabisch M., 1995,"Die SAR-Interferometrie zur Erzeugung digitaler Geliindemodelle," DLR Technical Report 95-25 (in German)
- Small D., P.Pasquali, and S.Fuglistaler, 1996, "A Comparison of Phase to Height Conversion Methods for SAR Interferometry" – Proc. IGARSS'96 – Lincoln, Nebraska – USA – 27-31 May 1996.
- Smith, K., von Seggern, D. H., Depolo, D., Anderson, J. G., Biasi, G. P., Anooshehpoor, R., 2008, Seismicity of the 2008 Mogul-Somersett West Reno, NevadaEarthquake Sequence American Geophysical Union, Fall Meeting 2008
- Stevens, N.F. and Wadge, G., 2004. Towards operational repeat-pass SAR interferometry atactive volcanoes. Natural Hazards33: 47–76, doi:10.1023/B:NHAZ.0000035005.45346.2b
- Tafas T. & A. Economou-Amilli, Limnological survey of the warm monomictic lake Trichonis (central western Greece) II. Seasonal phytoplankton periodicity – a community approach, Hydrobiologia 344: 141–153, 1997. Kluwer Academic Publishers. Printed in Belgium.
- Tosi, L. Carbognin, P. Teatini, T. Strozzi and U. Wegmuller, 2002, Evidence of the present relative land stability of Venice, Italy, from land, sea, and space observations, *Geophys. Res. Lett.*, 29(12), doi:10.1029/2001GL013211
- Touzi, R.; Lopes, A.; Bruniquel, J.; Vachon, P.W.; Coherence estimation for SAR imagery; Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on Volume 37, Issue 1, Part 1, pp:135 – 149, Jan. 1999.

- USGS, 2008, "Earthquake Swarms at Yellowstone". United States Geological Survey. Retrieved 08-27. http://volcanoes.usgs.gov/volcanoes/yellowstone/yellowstone monitoring 50.html
- Werner C., U. Wegmüller, and T. Strozzi, 2002, Processing strategies for phase unwrapping for INSAR applications, Procs. EUSAR Conf., Cologne, Germany, 4.-6. June,
- Zacharias I., G. Ferentinos, A numerical model for the winter circulation in Lake Trichonis, Greece Original Research Article *Environmental Modelling & Software, Volume 12, Issue 4, 1997, Pages 311-32.*
- Zebker H.A. and J. Villasenor., 1992, Decorrelation in interferometric radar echoes. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 30(5), pp. 950-959, September
- Zebker H.A. and P. Rosen, 1997, "Atmospheric Artifacts in Interferometric SAR Surface Deformation and Topographic Maps" J.Geophys.Res.- Solid Earth – vol. 102 (B4), pp. 7547-7563,.
- Zotos Anastasios, Thomas Raus and Panayotis Dimopoulos, 2006, New Floristic Reports from the Lakes Trichonis and Lisimachia (W Greece), Published by: Botanischer Garten und Botanisches Museum, Berlin-Dahlem, Page 731 of 731-739

### Διαδικτυακή Βιβλιογραφία

- European Space Agency ESA (http://www.esa.int/esaCP/index.html,)
- German Aerospace Center-DLR (http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10002/)
- Telespazio (<u>http://www.telespazio.it/cosmo.html</u>,).
- NASA(<u>http://southport.jpl.nasa.gov/cdrom/sirced03/cdrom/ROADMAP/IMAGERAD/IMGRADV3.H</u> <u>TM</u>)

International Center of Tropical Agriculture (CIAT) http://srtm.csi.cgiar.org/

Department of Earth Observation and Space Systems) http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs,