

"Συμβολομετρία

Μελέτη περίπτωσης: Η εδαφική παραμόρφωση της περιοχής της Ναυπάκτου με χρήση εικόνων συμβολομετρίας σταθερών ανακλαστήρων"

Πτυχακή Εργασία της Κωσταρά Ιωάννας Επιβλέπων: Ισαακ Παρχαρίδης, Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα,2010

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	4
ПЕРІЛНΨН	5
ABSTRACT	6
1. ΕΝΕΡΓΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΗΣ 1.1 Παθητικά και Ενεονά συστήματα παρακολούθησης	
1.2 Τροχιά των radars	8
1.3 Μικροκυματική ακτινοβολία	9
1.4 Δορυφορικά συστήματα radars	10
2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ RADAR ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ	

3. ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή στη συμβολομετρία	32
3.2 Τεχνικη της συμβολομετριας	32
3.3 Βασικές αρχές και περιορισμοί της συμβολομετρίας	
3.4 Εφαρμογές συμβολομετρίας	34
3.5 Σώρευση συμβολογραφημάτων (stacking)	
3.6 Συμβολομετρία σταθερών ανακλαστήρων (permanent scatterers technique)	36
3.6.2 Μεθοδολογία	37
3.6.3 Περιορισμοί της τεχνικής σταθερών ανακλαστήρων	
3.6.4Χρησιμότητα της τεχνικής σταθερών ανακλαστήρων	38

4. ΧΑΡΑΚΤΙΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1 Φυσικό-Γεωγραφικά χαρακτιριστικά	
4.2 Γεωλογία και Τεκτονισμός	43
4.3 Σεισμικότητα	45

5. XPHSH THS TEXNIKHS THS SYMBOLOMETPIAS

ΣΤΑΘΕΡΏΝ ΑΝΑΚΛΑΣΤΉΡΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΉ ΤΗΣ ΝΑΥΠΑΚΤΟΥ

5.1 Η χρήσή της τεχνίκης της συμβολομετρίας σταθερών ανακλαστήρων σ	την περιοχή της
Ναυπάκτου	
5.2 Αποτελέσματα της τεγνικής	
5.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων	53

"Συμβολομετρία, μελέτη περίπτωσης: Η εδαφική παραμόρφωση της περιοχής της Ναυπάκτου" Κωσταρά Ιωάννα

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	
ПАРАРТНМА	

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΧΑΡΤΩΝ

<u>Χάρτης 1</u>
Γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης45
Vánama 2
<u>λαμτής 2</u>
Τοπογραφικός Χάρτης Ναυπάκτου46
Χάοτης 3
Γεωλογικός Χάρτης Ναυπάκτου47
Χάρτης 4
$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{j$
2οιομικοτητα Δυτικης Ελλασάς για την περισσο 1775-2000
<u>Χάρτης 5</u>

Σεισμικότητα της Ναυπάκτου , για την περίδο 1968-2010, εμφανίζονται οι σεισμοί με μέγεθος >4R......50

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

<u>Πίνακας 1.1</u> Φασματικές ζώνες μικροκυματικής ακτινοβολίας	11
<u>Πϊνακας 1.2</u> Χαρακτηριστικά του Seasat	14
<u>Πίνακας 1.3</u> Χαρακτηριστικά των ERS-1, ERS-2	
<u>Πίνακας 1.4</u> Χαρακτηριστικά του Envisat	
<u>Πίνακας 1.5</u> Χαρακτηριστικά του Radarsat-2	21
<u>Πίνακας 1.6</u> Χαρακτηριστικά του JERS-1	22
<u>Πίνακας 1.7</u>	

"Συμβολομετρία, μελέτη περίπτωσης: Η εδαφική παραμόρφωση της περιοχής της Ναυπάκτου" Κωσταρά Ιωάννα

Χαρακτηριστικά ALOS	24
<u>Πίνακας 1.8</u>	
Χαρακτηριστικά PALSAR	24
<u>Πίνακας 5.1</u>	
Χαρακτηριστκά των εικόνων ERS-1 -2	53
<u>Πίνακας 5.2</u>	
Χαρακτηριστκά των εικόνων ΕΝVISAT	54

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<u>Εικόνα 1.1</u>
Παράδειγμα παθητικού συστήματος παρακολούθησης11
<u>Εικόνα 1.2</u>
Παράδειγμα ενεργού συστήματος παρακολούθησης11
<u>Εικόνα 1.3</u>
Τρόπος περιστροφής των συστημάτων παρακολούθησης (πολική-ημιπολική τροχιά)12
<u>Εικόνα 1.4</u>
Μικροκυματική ακτινοβολία13
<u>Σχήμα 2.1</u>
Γεωμετρία εικολοληψίας29
<u>Σχήματα 2.2 και 2.3</u>
Γεωμετρία εικονοληψίας30
<u>Εικόνα 5.1</u>
Αποτελέσματα τεγνικής συμβολομετρίας PS με την γρήση εικόνων SAR των ERS-1 και -2 για

<u>Εικόνα 5.2</u>

Αποτελέσματα τεχνικής συμβολομετρίας PS με την χρήση εικόνων SAR του ENVISAT για τ	ηv
περιοχή της Ναυπάκτου για την περίοδο 2002-20095	6

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά την εκπόνηση μελέτης η οποία βασίζεται στην τεχνική της συμβολομετρίας. Αρχικά γίνεται εκτενής αναφορά στις τεχνικές της συμβολομετρίας και ειδικότερα στην τεχνική της συμβολομετρίας σταθερών ανακλαστήρων (PsInSAR). Στην συνέχεια γίνεται μία προσπάθεια σφαιρικής μελέτης της περιοχής της Ναυπάκτου, η οποία αποτελεί την περιοχή μελέτης της εργασίας αυτής. Καταγράφονται όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά τα οποία συνθέτουν το προφίλ της περιοχής. Συγκεκριμένα αναλύονται τα γεωλογικά, τεκτονικά και σεισμικά στοιχεία της περιοχής με σκόπο την μετέπειτα ανάλυση των αποτελεσμάτων της συμβολομετρίας. Τέλος μέσω της περιοχής της συμβολομετρίας σταθερών ανακλαστήρων μελετάται η εδαφική παραμόρφωση της περιοχής για την χρονική περίοδο 1992-2009. Αναλύονται τα αποτελέσματα και γίνεται μία προσπάθεια εύρεσης των πιθανών αιτίων που ευθύνονται για την παραμόρφωση του εδάφους.

Οι προσδοκόμενοι στόχοι αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι οι ακόλουθοι. Αρχικά η κατανόηση της τεχνικής που προαναφέρθηκε η οποία αποτελεί το εργαλείο για την ανάδειξη της ύπαρξης ή μη εδαφικής παραμόρφωσης. Στην συνέχεια μέσω της μελέτης του προφίλ της υπό μελέτη περιοχής και των αποτελεσμάτων της συμβολομετρίας στόχος είναι η εύρεση των πιθανών αιτιών που οδήγησαν στην παραμόρφωση του εδάφους της περιοχής.

Ο λόγος που ασχολήθηκα με το συγκεκριμένο θέμα είναι γιατί πρόκειται για μία τεχνική η οποία έχει αναπτυχθεί ραγδαία τα τελευταία 15 χρόνια και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών της Τηλεπισκόπησης. Στην εκπόνηση της εργασίας αυτής αμέριστη ήταν η βοήθεα του επιβλέποντος μου, Επίκουρου Καθηγητή Ισαάκ Παρχαρίδη, ο οποίος μου ανέθεσε και το θέμα. Θερμές ευχαριστίες αποδίδονται στην συνεργάτιδα του κ. Ισαάκ Παρχαρίδη, παρχαρίδη, Πηνελόπη Κουρκούλη, καθώς και στον Μιχάλη Φούμελη υποψήφιο διδάκτορα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών, για την αμέριστη βοήθεια τους καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κοσμά Παυλόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή, για την σημαντική βοήθειά του τόσο στην κατανόηση του γεωλογικού-τεκτονικού προφίλ της περιοχής όσο και για την εύρεση των πιθανών αιτιών της εδαφικής παραμόρφωσης της περιοχής μελέτης, καθώς και τον κ. Σταμάτη Καλογήρου, Λέκτορα, για την αμέριστη βοήθεία του στην διόρθωση της πτυχιακής μου εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της εδαφικής παραμόρφωσης της περιοχής της Ναυπάκτου.

Για τον σκοπό αυτό μελετάται η τεχνική της συμβολομετρίας. Συγκεκριμένα μελετώνται οι αρχές της συμβολομετρίας, η τεχνική της και η μεθοδολογία που ακολουθείται καθώς και οι περιορισμοί στους οποίους υπόκεινται η τεχνική. Δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην τεχνική των σταθερών ανακλαστήρων. Επιπλέον, μέσω των αποτελεσμάτων της τεχνικής των σταθερών ανακλαστήρων μελετάται η περίπτωση των εδαφικών παραμορφώσεων στην περιοχή της Ναυπάκτου. Λαμβάνοντας σοβαρά υπόψη το προφίλ της περιοχής, δηλαδή τη γεωλογία, τον τεκτονισμό και τη σεισμικότητα αναλύονται τα αποτελέσματα της συμβολομετρίας. Τέλος γίνεται μία προσπάθεια ανεύρεσης των αιτίων που οδήγησαν στην εδαφική παραμόρφωση της περιοχής μελέτης.

Για την εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο εικόνες συμβολομετρίας, οι οποίες δημιουργήθηκαν από εικόνες SAR από τους δορυφόρους ERS-1 και -2 και ENVISAT για το χρονικό διάστημα 1992 εώς 2009. Στην μία εικόνα παρουσιάζονται οι εδαφικές παραμορφώσεις που έχουν παρατηρηθεί στην περιοχή για την χρονική περίοδο 1992-2002 και στην άλλη για την περίοδο 2002-2009. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν ο τοπογραφικός χάρτης της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (φύλλο Ναυπάκτου) και ο γεωλογικός χάρτης του ΙΓΜΕ (φύλλο Ναυπάκτου) ως υπόβαθρα για την παραγωγή των αντίστοιχων χαρτών της περιοχής μελέτης. Τέλος χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία για την σεισμικότητα της περιοχής από το Εθνικό Αστεροσκοπείο.

Η περιοχή της Ναυπάκτου αποτελεί ένα σεισμικό εργαστήρι. Ο Κορινθιακός κόλπος και τα παράλια του αποτελούν με τη σειρά τους ένα γεωτεκτονικό εργαστήρι το οποίο εξελίσσεται συνεχώς. Χαρακτηριστικά αναφέται ότι η περιοχή του Κορινθιακού κόλπου αποτελεί μια από τις πιο ενεργές περιοχές του κόσμου. Για τους παραπάνω λόγους η περιοχή μελέτης είναι φυσικό να παρουσιάζει εδαφική παραμόρφωση στο χρόνο.

ABSTRACT

Ground deformation is the surface expression of various physical processes such as landslides, ground subsidence and earthquakes. For that reason, in the present work looks at the technique of interferometry (InSAR). Concretely, are looking at the beginnings of InSAR, the technique and the methodology that has been followed as well as the restrictions that the technique has. Particular importance is given to the PS (permanent scatterer) technique. Moreover, via the results of the PS technique the case of ground deformation in the region of Naypactos in Greece is studied. Taking into seriously consideration the profile of the region, that is to say the geology, the tectonism and the seismic activity, the results of InSAR were analyzed . Finally we tried to interpret the potential causes of the deformation.

For this study, two images of InSAR were used. The later were created by SAR images from satellites ers-1 and -2 and ENVISAT covering the period from 1992 to 2009. In the one image the ground deformation that has been observed in the region for time period 1992-2002 is presented and in the other for period 2002-2009. Also the topographic map of the Geographic Service of Army (GYS) and the geological map of the Institute of Geological and Mineral Research (IGME) (leaf Naypactos) were used as background for digitizing the corresponding maps of the study region.

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</u> <u>ΕΝΕΡΓΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΗΣ</u>

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι μια εισαγωγή στα συστήματα παρακολούθησης της Γης, παθητικά και ενεργά (Κεφάλαιο 1.1). Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση στην μικροκυματική ακτινοβολία (Κεφάλαιο 1.3) και στον τρόπο που εκτελούν την πτήση τους τα ενεργά δορυφορικά συστήματα (Κεφάλαιο 1.2). Τέλος παρουσιάζονται τα σημαντικότερα ενεργά δορυφορικά συστήματα (Κεφάλαιο 1.4).

1.1 Παθητικά και ενεργά συστήματα παρακολούθησης

Τα συστήματα παρακολούθησης της γης χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη αφορά τα συστήματα που καταγράφουν την "φυσική" ακτινοβολία και ονομάζονται παθητικά (εικόνα 1.1). Με τον όρο "φυσική" εννοούμε την ακτινοβολία εκείνη που προέρχεται είτε μέσω του φαινομένου της ανάκλασης είτε μέσω εκπομπής με την μορφή θερμότητας. Για την ανακλώμενη ενέργεια αυτό συμβαίνει κατά τη διάρκεια της μέρας όταν ο ήλιος φωτίζει τη Γη. Η με φυσικό τρόπο εκπεμπόμενη ενέργεια (μιλάμε για το θερμικό υπέρυθρο) μπορεί να καταγραφεί τόσο την ημέρα όσο και τη νύκτα με τη προϋπόθεση ότι το ποσό της ενέργειας είναι τέτοιο ώστε να μπορεί να καταγραφεί. Τα παθητικά συστήματα παρακολούθησης χρησιμοποιούν το τμήμα του φάσματος από πολύ μικρά μήκη κύματος (μικρότερα από 0,4μm) εώς την περιοχή του μήκος κύματος 1000μm.

Η δεύτερη κατηγορία αφορά τα ενεργά συστήματα παρακολούθησης (εικόνα 1.2). Τα συστήματα αυτά καταγράφουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα οποία εκπέμπονται από άλλη εξωτερική πηγή ή από το ίδιο όργανο καταγραφής. Συνήθως ισχύει η δεύτερη περίπτωση, δηλαδή τα όργανα καταγραφής είναι εκείνα που εκπέμπουν την ενέργεια η οποία στη συνέχεια ανακλάται από κάποιο σώμα στην επιφάνεια της Γης, επιστρέφει και το ίδιο όργανο καταγράφει την "ηχώ". Χαρακτήριστικό παράδειγμα τέτοιου τύπου οργάνου είναι τα Radars που εκπέμπουν στην περιοχή των μικροκυμάτων. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η ανάγκη των συστημάτων αυτών για ενέργεια είναι πολύ μεγάλη και για το λόγο αυτό δεν λειτουργούν συνεχώς (Μιγκίρος κ.α., 2003).



Εικόνες 1.1 και 1.2 : Παράδειγματα παθητικού και ενεργού συστήματος παρακολούθησης, αντίστοιχα πηγή : CCRS

<u>1.2 Τροχία των radars</u>

Τα συστήματα Radars (όπως και όλα τα δορυφορικά συστήματα παρακολούθησης της γης) έχουν σχεδιαστεί ώστε να ακολουθούν μια τροχιά η οποία σε συνδυασμό με την περιστροφή της Γης από τα δυτικά προς τα ανατολικά επιτρέπει σε αυτά να καλύπτουν το μεγαλύτερο τμήμα της γήινης επιφάνειας μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η τροχιά αυτή ονομάζεται σχεδόν πολική, από την κλίση της τροχιάς που είναι B-N. Το είδος αυτό της τροχιάς ονομάζεται ηλιοσύγχρονη γιατί τα Radars καλύπτουν κάθε περιοχή της Γης σε μία σταθερή τοπική ώρα. Αυτό εξασφαλίζει συνεπείς όρους φωτισμού κατά την απόκτηση των εικόνων σε μία συγκεκριμένη εποχή κατά τη διάρκεια των διαδοχικών ετών. Αυτό δίνει τη δυνατότητα ελέγχου των αλλαγών μεταξύ των εικόνων (CCRS).



<u>Εικόνα 1.3</u>: Τρόπος περιστροφής των συστημάτων παρακολούθησης (πολική-ημιπολική τροχιά) πηγή: CCRS

1.3 Μικροκυματική ακτινοβολία

Τα συστήματα Radars χρησιμοποιούν το μικροκυματικό τμήμα του ηλεκρομαγνητικού φάσματος, το οποίο περιλαμβάνει μήκη κύματος από 1mm εώς 1m. Αυτά τα μήκη κύματος δεν είναι αντιληπτά στο ανθρώπινο μάτι. Το μικροκυματκό τμήμα χωρίζεται σε φασματικές ζώνες. Κάθε φασματική ζώνη έχει ονομαστεί τυχαία με κάποιο γράμμα. Κάθε φασματική ζώνη χαρακτηρίζεται από τη συχνότητα και το μήκος κύματος (πίνακας 1.1 και εικόνα 1.4).

ΚΑΝΑΛΙ	ΣYXNOTHTA(GHz)	ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ(cm)
Ka	26,5 - 40	0,75 - 1,18
K	18 - 26,5	1,18 - 1,67
Ku	12,5 - 18	1,67 - 2,40
Х	8 - 12,5	2,40 - 3,75
С	4 - 8	3,75 - 7,5
S	2 - 4	7,5 – 15
L	1 – 2	15 - 30
UHF	0.3 – 1	30 - 100
Р	0,28 - 0,39	77 - 107
VHF	0,03 - 0,30	100 - 10000

Πίνακας 1	.1 : Ф ао	ατικές	ζώνες	икооки	ατική	ς ακτινο	βολίας
	11 1 1 010		300,03	<i>pp</i> 00		9 000000000	<u>p 0 2 11 0 1 4</u>





Οι αισθητήρες των δορυφόρων που χρησιμοποιούν αυτά τα μήκη κύματος μπορούν να καταγράφουν επιφανειακές ιδιότητες του γήινου περιβάλλοντος οι οποίες σχετίζονται κυρίως με γεωμετρικά χαρακτηριστικά (τοπογραφία, μορφολογία, τραχύτητα του εδάφους), την περιεκτικότητα σε νερό της βλάστησης και του εδάφους και τη διηλεκτρική συμπεριφορά των υλικών (σχετίζεται με το ποσοστό ενέργειας που ανακλάται σε σχέση με αυτό που διεισδύει και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας).

Η συχνότητα αποτελεί την πιο σημαντική ιδιότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας καθώς παραμένει σταθερή κατά τη διάδοση της ακτινοβολίας μέσα από υλικά με διαφορετική πυκνότητα, σε αντίθεση με την ταχύτητα και το μήκος κύματος τα οποία αλλάζουν. Επίσης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την επιφάνεια πρόσπτωσης και συγκεκριμένα στο βαθμό διείσδυσης και στη διάχυση της από μία τραχεία επιφάνεια.

Τα συστήματα καταγραφής στο μικροκυματικό τμήμα ονομάζονται παντώς καιρού, αφού έχουν το πλεονέκτημα της λειτουργίας ανεξάρτητα από τον ηλιακό φωτισμό, και επομένως έχουν την ικανότητα να λειτουργούν κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύκτας και κατά κανόνα δεν είναι ευαίσθητα σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες και στη νεφοκάλυψη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ελάχιστη ή μηδενική εξασθένηση του σήματος κατά το πέρασμα μέσα από την ατμόσφαιρα (Μιγκίρος, κ.α., 2003).

1.4 Δορυφορικά συστήματα radars

Τα ενεργά συστήματα παρακολούθησης άνοιξαν μια νέα εποχή για την παρακολούθηση και την καταγραφή της Γης από δορυφόρους αφού παρέχουν την δυνατότητα λειτουργίας ημέρα και νύχτα και κάτω από οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες. Η χρήση Radar άρχισε το 1978 με το δορυφόρο Seasat. Η χρήση των συστημάτων αυτών συνεχίστηκε κατά τη διάρκεια των σύντομων πτήσεων των διαστημικών λεωφορείων. Στη συνέχεια παραθέτονται τα σημαντικότερα ενεργά συστήματα παρακολούθησης.

Α. Δορυφορικό σύστημα Seasat



Όπως προαναφέρθηκε ο Seasat 1 ήταν ο πρώτος δορυφόρος που εκτοξεύτηκε και σχεδιάστηκε για την παρακολούθηση των ωκεανών της γης. Ανήκει στην κατηγορία των radar με σύστημα SAR (βλ. Κεφάλαιο 2). Η τροχιά του ήταν σχεδόν πολική, ύψους 800 km και κλίσης περίπου 108 μοίρες και είχε προγραμματιστεί για να καλύψει το 95% των ωκεανών της Γης. Κάθε ημέρα ολοκληρώνονταν 14

τροχιές. Δυστυχώς όμως κάποιο τεχνικό πρόβλημα περιόρισε την παραγωγή δεδομένων από το δορυφόρο. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συλλέχθηκαν 42 περίπου ώρες δεδομένων.

Οι εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν με την χρήση εικόνων SAR του Seasat 1 αφορούσαν ωκεανογραφικές μελέτες, χαρτογράφηση των πάγων στους πόλους, γεωλογική χαρτογράφηση,

ανάλυση υδρογραφικών δικτύων και τέλος χαρτογράφηση της βλάστησης και ωκεανογραφικές μελέτες.

Εκτός από το Radar συνθετικού ανοίγματος (SAR: λειτουργεί στην μικροκυματική φασματική ζώνη L) ο Seasat περιλάμβανε και τα ακόλουθα όργανα (JPL, 2010):

- 1. Radar altimeter: καταγράφει το ύψος του διαστημικού σκάφους από την επιφάνεια της θάλασσας.
- 2. Scatterometer system: μετράει την ταχύτητα και την διεύθυνση του ανέμου.
- 3. Visible and infrared radiometer: προσδιορίζει τα χαρακτριστικά των νεφών, της ξηράς και του νερού.
- 4. Scanning multi-channel microwave radiometer: καταγράφει την θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας.
- 5.Retroreflector array

Ακολουθούν τα βασικά χαρακτηριστικά του δορυφορικού συστήματος Seasat.

<u>Πϊνακας 1.2</u>: Χαρακτηριστικά του Seasat πηγή:_ILRS/NASA

Seasat Mission Parameters			
Sponsor:	NASA		
Expected Life:	1-3 years (stop functioning on 10 October 1978)		
Primary Applications:	ocean topography		
Primary SLR Applications:	calibrate radar altimeter		
COSPAR ID:	7806401		
SIC Code:			
NORAD SSC Code:	10967		
Launch Date:	June 28, 1978		
Orbit:	near polar		
Inclination:	108 degrees		
Eccentricity:	1		
Perigee:	793 km		
Period:	100 minutes		
Weight:	2290 kg		

Β. Δορυφορικά συστήματα ERS



Ο πρώτος δορυφόρος που τέθηκε σε τροχιά από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA) ήταν ο δορυφόρος ERS-1 (European Remote Sensing satellite), ο οποίος εκτός των άλλων έφερε ένα Radar συνθετικού ανοίγματος (SAR). Τέθηκε σε τροχιά στις 17 Ιουλίου του 1991. Ο ERS-2, ο οποίος ήταν ίδιος με τον ERS-1 με ένα επιπλέον

όργανο καταγραφής και τέθηκε σε τροχιά το 1995.

Λίγο μετά την εκτόξευση του ERS-2, η ESA αποφάσισε να συγχρονίσει τα δύο διαστημόπλοια σε διαδοχικές τροχιές κάτι που συνέβει για πρώτη φορά, και διάρκεσε για εννέα μήνες, από τις 16 Αυγούστου 1995 μέχρι τα μέσα Μαΐου του 1996. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου οι τροχιές των δύο διαστημόπλοιων συγχρονίστηκαν ώστε να "τρέχουν" γύρω από τη Γη με 24 ώρες διαφορά, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα να παρέρχονται από το ίδιο σημείο ανά 24 ώρες (24h revisit interval).

Οι δορυφόροι αυτοί είναι μοναδικοί στη μέτρηση πολλών παραμέτρων οι οποίοι δεν καταγράφονται από άλλα δορυφορικά συστήματα, όπως είναι ο κυματισμός της θάλασσας, οι άνεμοι στην επιφάνειά της και τα ρεύματα στους ωκεανούς. Επίσης, κατέγραφαν τη θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας με μεγαλύτερη λεπτομέρεια απ' ότι σε άλλα συστήματα (Μιγκίρος, κ.α., 2003).

Από αυτήν την αποστολή έχουμε μια τεράστια συλλογή από ζεύγη εικόνων τα οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμα ακόμα και σήμερα γιατί λόγω του γεγονότος ότι η λήψη των δεδομένων γίνεται κάθε 24 ώρες τα συμβολογραφήματα αποκτούν μεγαλύτερη συνοχή (interferogram coherence) (βλ. Κεφάλαιο 3). Η αυξημένη συχνότητα και το επίπεδο των διαθέσιμων στοιχείων στους επιστήμονες πρόσφεραν μια μοναδική ευκαιρία για τη δημιουργία λεπτομερών χαρτών αναγλύφου (DEMs) και την δυνατότητα παρατήρησης των όποιων αλλαγών μπορεί να υπάρξουν σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Ακόμη και μετά τη λήξη της αποστολής, η υψηλή τροχιακή σταθερότητα και ο προσεκτικός λειτουργικός έλεγχος επέτρεψαν την απόκτηση και άλλων ζευγών SAR για όσο καιρό τα δύο διαστημόπλοια βρίσκονταν σε τροχιά (ESA, 2007). Η σχεδόν πολική τροχιά του ERS σε συνδυασμό με την περιστροφή της Γης (EW) επιτρέπουν δύο λήψεις της ίδιας περιοχής από δύο διαφορετικές οπτικές γωνίες σε κάθε δορυφορικό κύκλο. Εάν γινόταν μόνο μια λήψη τότε η ακρίβεια του τελικού DEM θα εξαρτιόταν σε μεγάλο βαθμό από την τοπική κλίση του εδάφους, κάτι τέτοιο όμως δεν θα ήταν αποδεκτό από τον τελικό χρήστη. Αν όμως συνδυάσουμε DEMs που προέρχονται από αύξουσες (S-N) και φθίνουσες (N-S) τροχιές τότε τα προβλήματα που οφείλονται στη γεωμετρία της λήψης και στη άνιση δειγματοληψία της περιοχής ενδιαφέροντος, κυρίως στις περιοχές έντονου αναγλύφου, περιορίζονται. Η κεραία του ERS κοιτάει προς τα αριστερά (ESA, 2007).

Όπως προαναφέρθηκε οι δύο δορυφόροι ήταν εξοπλισμένοι με τα ίδια όργανα. Η μόνη διαφορά τους είναι ότι ο ERS-2 έφερε ένα παραπάνω όργανο. Τα όργανα με τα οποία ήταν εξοπλισμένοι οι δορυφόροι είναι τα ακόλουθα :

- AMI (Active Microwave Instrument) : είναι ένα όργανο καταγραφής το οποίο περιλαμβάνει δύο Radar, το SAR (Synthetic Aperture Radar) και το Scatterometer. Τα όργανα αυτά δίνουν 3 τρόπους καταγραφής τον SAR image, τον SAR Wave και τον Wave Scatterometer. Με το image mode επιτυγχάνονται εικόνες υψηλής ανάλυσης, πλάτους 100km στοχεύοντας και τη δεξιά πλευρά της πορείας του δορυφόρου. Η κεραία που έχει ύψος 10m και είναι παράλληλη με την πορεία της πτήσης, στέλνει λεπτή δέσμη σήματος Radar στην επιφάνεια της Γης. Το σύστημα image mode λειτουργεί μόνο 12min σε κάθε τροχιά, ενώ δεν επιτρέπει ταυτόχρονη λειτουργία στα υπόλοιπα AMI modes. Το wave mode μετρά τις αλλαγές στην ανάκλαση του σήματος Radar από την επιφάνεια της θάλασσας σε μικρές εικόνες διαστάσεων 10km*6km.
- 2. Radar Altimeter (RA) : είναι ένα όργανο το οποίο καταγράφει την ηχώ του σήματος από τις επιφάνειες των ωκεανών (μετράει το ύψος κύματος, την ταχύτητα των επιφανειακών ανέμων, το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας) και των πάγων (τοπογραφία, τον τύπο του αναγλύφου, την οριοθέτηση τους από την θάλασσα).
- 3. Scanning Radiometer and Sounder (ASTR-M) αποτελείται από δύο όργανα Infra red Radiometer (IRR) και το Microwave Sounder. Το IRR είναι ραδιόμετρο τεσσάρων καναλιών στο υπέρυθρο που μετράει θερμοκρασίες στην επιφάνεια της θάλασσας και στο επάνω τμήμα των νεφών. Στον ERS-2 αντί για τέσσερα κανάλια υπάρχουν επτά.

Από τα οποία τα 2 είναι στο ορατό και ένα στο υπέρυθρο. Το Microwave Sounder είναι ένα παθητικό ραδιόμετρο που έχει την δυνατότητα μετρήσεων του περιεχομένου στην ατμόσφαιρα νερού. Επίσης, χρησιμοποιείται για την ακριβέστερη μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας.

- Laser Reflector (LRR) : χρησιμοποιείται για την μέτρηση της θέσης του δορυφόρου και της τροχιάς του χρησιμοποιώντας κυμαινόμενος σταθμούς λέιζερ στο έδαφος.
- Precision Ranging Equipment (PRARE) : χρησιμοποιείται για τον ακριβή προσδιορισμό των δορυφορικών χαρακτηριστικών θέσης και τροχιάς και για τον γεωδαιτικό καθορισμό των επίγειων σταθμών (Μιγκίρος, κ.α., 2003).

Το επιπλέον όργανο του ERS-2 είναι το GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) το οποίο μελετά θέματα της χημείας της ατμόσφαιρας.

Τον Μάρτιο του 2000 διακόπηκε οριστικά η λειτουργία του ERS-1 ενώ ο ERS-2 αναμένεται να συνεχίσει να λειτουργεί για κάποιο χρονικό διάστημα ακόμα παρά την αποτυχία που σημειώθηκε το 2001.

Ακολουθούν τα χαρακτηριστικά των δύο δορυφόρων :

	ERS-1,-2
Είδος	Radar
Διαχωριστική ικανότητα	10-50 m
Έκταση κάλυψης μίας πλήρους	
εικόνας	100 km x 100 km
Συχνότητα	5,3
Κανάλι	C band
Πόλωση	VV
Γωνία Πρόσπτωσης	230
Δέκτες	AMI, ATSR, MWR, RA
Είδος λήψης	IM (Image mode)
Ύψος τροχιάς	785 km

<u>Πϊνακας 1.3</u>: Χαρακτηριστικά των ERS-1, ERS-2 πηγή ESA

"Συμβολομετρία, μελέτη περίπτωσης: Η εδαφική παραμόρφωση της περιοχής της Ναυπάκτου" Κωσταρά Ιωάννα

Γ. Δορυφορικό σύστημα Envisat



Ο Envisat είναι το μεγαλύτερο διαστημικό σκάφος παρατήρησης της γης που έχει κατασκευαστεί ποτέ και τέθηκε σε τροχιά το 2002. Φέρει δέκα περίπλοκα οπτικά όργανα και Radar για να παρέχει τη δυνατότητα συνεχούς παρατήρησης και ελέγχου του γήινου εδάφους, της ατμόσφαιρας, των ωκεανών και των πάγων. Τα δεδομένα του Envisat παρέχουν έναν πλούτο πληροφοριών σχετικά με τη λειτουργία του

γήινου συστήματος, καθώς και πληροφορίες που δίνουν στους ερευνητές την δυνατότητα να μελετήσουν τους παράγοντες που συμβάλουν στην κλιμάτική αλλαγή. Επιπλέον, τα στοιχεία που επιστρέφονται από το σύνολο των οργάνων καταγραφής του διευκολύνουν την ανάπτυξη διάφορων λειτουργικών και εμπορικών εφαρμογών.

Ο Envisat διαθέτει ένα προηγμένο Radar συνθετικού ανοίγματος (ASAR), που λειτουργεί στην Cband. Αυτό εξασφαλίζει την συνέχιση της συλλογής δεδομένων μετά τον ERS-2, παρά τη μικρή (31 MHZ) κεντρική μετατόπιση συχνότητας. Διαθέτει αυξημένη ικανότητα όσον αφορά την κάλυψη, το εύρος της συχνότητας των γωνιών, την πόλωση, καθώς και τις μεθόδους λειτουργίας του (ESA, 2007). Εκτός από το ASAR τα όργανα που διαθέτει ο δορυφόρος αναφέρονται επιγραματικά παρακάτω.

- Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS): καταγράφει την ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται από την γήινη επιφάνεια, τα σύννεφα και την συγκέντρωση χλωροφύλλης στους ωκεανούς και στα παράκτια δίκτυα.
- Advanced Along Track Scanning Radiometer (AATSR): καταγράφει τη θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας.
- Radar Altimeter 2 (RA-2): καταγράφει το ύψος των κυμάτων, την ταχύτητα των ανέμων, την τοπογραφία της γης και της θάλασσας.

- 4. Microwave Radiometer (MWR): Καταγράφει την ποσότητα των ατμοσφαιρικών υδρατμών.
- 5. Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS): όργανο που χρησιμοποιείται για τον ακριβή εντοπισμό του δορυφόρου στο διάστημα.
- 6. Global Monitoring by Occultation of Stars (GOMOS) : χρησιμοποιείται για την μέτρηση του όζοντος καθώς και άλλων αερίων της ατμόσφαιρας.
- 7. Michelson Inteferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS): χρησιμοποιείται για την καταγραφή της ατμοσφαιρικής πίεσης και της θερμοκρασίας.
- Scanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric Chartography (SCIAMACHY): καταγράφει την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε αέρια.
- Laser Retro-Reflector (LLR): Επιτρέπει τον ακριβή καθορισμό της τροχιάς του δορυφόρου (ILRS/NASA και Μιγκίρος, κ.α., 2003).

Ακολουθούν τα χαρακτηριστικά του Envisat:

Envisat-1 Parameters		
Sponsor:	European Space Agency	
Expected Life:	5 years	
Primary Applications:	remote sensing and environmental monitoring	
Primary SLR Applications:	POD	
COSPAR ID:	200901	
SIC Code:	6179	
NORAD SSC Code:	27386	
Launch Date:	01/03/02	
NP Bin Size:	15 seconds	
RRA Diameter:	20 cm	
RRA Shape:	hemispherical	
Reflectors:	9 corner cubes	
Orbit:	circular, sun-synchronous polar	
Inclination:	98.54 degrees	
Eccentricity:	0	
Perigee:	796 km	
Period:	100 minutes	
Weight:	8211 kg	

<u>Πίνακας 1.4</u>: Χαρακτηριστικά του Envisat πηγή: ILRS/NASA

Κύριοι στόχοι του είναι:

- ✓να υπάρξει συνέχεια των παρατηρήσεων που ξεκίνησε με τους δορυφόρους ERS
- ✓να ενισχύσει την αποστολή των ERS, ειδικότερα των ωκεανών και των πάγων
- ✓ να επεκτείνει το φάσμα των παραμέτρων που παρατηρούνται, ώστε να καλυφθούν
- ✓ οι ανάγκες για τον εμπλουτισμό της γνώσης των παραγόντων που επηρεάζουν το περιβάλλον
- ✓να συμβάλει σημαντικά στην εκπόνηση περιβαλλοντικών μελετών, ιδίως στο τομέα της ατμοσφαιρικής χημείας και των ωκεάνιων μελετών (συμπεριλαμβανομένης της θαλάσσιας βιολογίας).

<u>Δ. Δορυφορικό σύστημα Radarsat</u>



Ο δορυφόρος Radarsat-1 αναπτύχθηκε από την κυβέρνηση του Καναδά και εκτοξεύτηκε το Νοέμβριο του 1995. Το 2007 έχει προγραμματιστεί να εκτοξευθεί ο Radarsat-2. Οι δορυφόροι φέρουν έναν ενεργητικό μικροκυματικό αισθητήρα που εγγυάται την συλλογή δεδομένων ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών και συνθηκών φωτισμού.

Ο Radarsat-1 λειτούργησε για πέντε χρόνια. Η κεραία SAR έχει την δυνατότητα αλλαγής της προσπίπτουσας γωνίας του σήματος και έτσι το σύστημα γίνεται κατάλληλο για ειδικές εφαρμογές. Με την ευρεία επιλογή της χωρικής διακριτικής ικανότητας που διαθέτει 10 εώς 100m, καλύπτει όλες τις ανάγκες των χρηστών και επιπλέον προσφέρει υψηλή συχνότητα κάλυψης. Τα δεδομένα που χρησιμοποιεί ο δορυφόρος βρίσκουν εφαρμογή στην γεωργία, στη δασολογία, στη γεωλογία, στη χαρτογράφηση, στην υδρολογία, στην ωκεανογραφία, στις παράκτιες περιοχές και στις χρήσεις γης (Μιγκίρος, κ.α., 2003).

Ο Radarsat-2 έχει σχεδιαστεί να έχει χωρική διακριτική ικανότητα 3m, να έχει ευελιξία στην επιλογή της πόλωσης, να έχει την δυνατότητα αριστερής και δεξιάς απεικόνισης, ανώτερη αποθήκευση δεδομένων και ακριβέστερες μετρήσεις της θέσης και του ύψους των διαστημικών

σκαφών. Ακολουθούν τα βασικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου.

Mis	sion Information		
Launch Date	14/12/07		
Launch Site	Baikonur, Kazakhstan		
Launcher	Soyuz		
Lifetime	7 year minimum		
Or	bit Information		
Geometry	near-polar, sun-synchronous		
Altitude	798km		
Inclination	98.6 degrees		
Period	100.7 minutes		
Repeat cycle	24 days		
Orbits per day	14		
Radar Instrument Characteristics			
Frequency Band	C-band (5.405 GHz)		
Channel Bandwidth	11.6, 17.3, 30, 50, 100 MHz		
Channel Polarization	HH, HV, VH, VV		

<u>Πίνακας 1.5</u>: Χαρακτηριστικά του Radarsat-2 πηγή: <u>http://www.radarsat2.info/about/mission.asp</u>

Ε.Δορυφόρικο σύστημα JERS-1



Το 1992, οι Ιάπωνες έθεσαν σε πολική τροχιά τον δορυφόρο JERS-1(Japanese Earth Resources Satelite), ο οποίος φέρει έναν οπτικό δέκτη OS(optical system-σαρωτής ωστικής σάρωσης) και ένα Radar SAR. Ο σαρωτής OS φέρει οκτώ φασματικές ζώνες, στο ορατό, κοντινό και μέσο υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και δίνει εικόνες με διακριτική ικανότητα 18.3*24.2m. Από την πλευρά το SAR λειτουργεί στη μικροκυματική φασματική ζώνη L και δίνει

εικόνες Radar σε λωρίδες πλάτους 75km με διακριτική ικανότητα 18m. Οι εικόνες του δορυφόρου βοήθησαν στην καλύτερη ανίχνευση και παρακολούθηση του χερσαίου περιβάλλοντος της Γης (Μιγκίρος, κ.α., 2003).

Πίνακας 1.6: Χαρακτηριστικά του JERS-1 πηγή: <u>http://www.ersdac.or.jp/Projects/JERS1/JSAR/JSAR_E.html</u>

ΧΑΡΑΚΤΙΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ SAR	
Swath width	75km
Resolution	18m x18m
Off-nadir angle	35 deg.
Frequency	1275MHz
Polarization	H-H

ΣΤ. Δορυφορικό σύστημα ALOS



Το δορυφορικό σύστημα ALOS τέθηκε σε τροχιά από τους Ιάπωνες στις 24 Ιανουαρίου το 2006. η εκτόξευση του είχε προγραμματιστεί από το 2003, αλλά η αποτυχία διαφόρων ιαπωνικών δορυφορικών ενάρξεων οδήγησε σε αυτήν την καθυστέρηση. Σκοπός του ALOS ήταν η παρατήρηση της γήινης επιφάνειας ώστε να ενισχυθεί η χαρτογραφία, ο

έλεγχος των φυσικών καταστροφών καθώς και η παρατήρηση των χρήσεων γης και των φυσικών πόρων. Ο ALOS χρησιμοποιεί τρία όργανα ανίχνευσης από απόσταση:

- 1.Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM), για την ψηφιακή χαρτογράφηση του εδάφους με σκοπό την δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους.
- Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2 (AVNIR-2), για την ακριβή παρατήρηση της κάλυψης της επιφάνειας της γης.
- 3.Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR),για την παρατήρηση του εδάφους ημέρα και νύκτα και υπό οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες (http://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/ALOS.html).

Ο PALSAR είναι ένας ενεργός αισθητήρας μικροκυμάτων, ο οποίος έχει πολύ καλό σήμα και υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα. Το γεγονός ότι είναι πολυ-πολικός (polarimetry, multipolarization) βελτιώνει την ακρίβεια στην ανάλυση των γεωλογικών δομών. Η πολυ-πόλωση είναι αποτελεσματική στην απόκτηση πληροφοριών για τη βλάστηση. Ο PALSAR έχει τους ακόλουθους 3 τρόπους παρατήρησης.

◆<u>Fine mode</u>

Αυτός ο τρόπος παρατήρησης είναι ο πιο συνηθισμένος όταν το radar βρίσκεται σε κανονική λειτουργία. Η διακριτική ικανότητα του είναι 7m, μία από τις μεγαλύτερες για Radar συνθετικού ανοίγματος (SAR).

◆<u>ScanSAR mode</u>

Ο τρόπος ScanSAR επιτρέπει να μεταστραφεί η από ναδίρ γωνία από 3 έως 5 φορές για να καλύψει μια περιοχή από 250km (70x3) εώς 350km (70x5).

◆ <u>Polarimetric mode</u>

Ο PALSAR πραγματοποιεί τροχιές και με οριζόντια και με κάθετη πόλωση. Ο PALSAR μπορεί επίσης να λάβει ταυτόχρονα την οριζόντια και κάθετη πόλωση ανά κάθε πολωμένη μετάδοση, η οποία καλείται multi-polarimetry. Επιπλέον, ο PALSAR μπορεί να μεταστρέψει από οριζόντια σε κάθετη πόλωση και αντίστροφα στον αντίστοιχο σφυγμό μετάδοσης, επιτρέποντας τέσσερις πολώσεις από τη διπλή ταυτόχρονη πόλωση, μια λειτουργία αποκαλούμενη full polarimetry (http://www.palsar.ersdac.or.jp/e/about/sensor.html).

Ακολουθούν τα βασικά χαρακτηστικά του δορυφορικού συστήματος ALOS καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά του οργάνου καταγραφής PALSAR.

<u>Πίνακας 1.7:</u> Χαρακτηριστικά ALOS πηγή:JAXA/ALOS

ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΙΡΙΣΤΙΚΑ ALOS	
International Designation Code	2006-002A
Launch Date	10:33, January 24, 2006 (JST)
Location	Tanegashima Space Center
Shap	Box shape with a solar array paddle, phased array type L-band synthetic aperture radar (PALSAR), and data re- lay satellite communication antenna Main body: about 6.2m x 3.5m x4 .0m Solar Array Paddle: Approx. 3.1m x 22.2m PALSAR Antenna: Approx. 8.9m x 3.1m
Weight	Approx. 4,000kg
Orbiter	Sun-Synchronous Subrecurrent/ Recurrent Perid:Approx. 46day
Altitude	Approx. 700km
Inclination	Approx. 98 degrees
Period	Approx. 99 minutes
Attitude Control	Three-axis stabilization (High accuracy attitude control orbit determination function)

<u>Πίνακας 1.8:</u> Χαρακτηριστικά PALSAR π ηγή:<u>http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-00/ceos1/satellit/alos/alos_e.htm</u>

Major Specifications of PALSAR	
Frequency	L-band
Polarization	HH or VV (option: HV or VH)
Spatial Resolution	10m (2 looks) 20m (4 looks) for Fine Res- olution Mode, 100m for ScanSAR Mode
Swath Width	70km,250 – 360km (3 - 5scans)
Off-nadir Angle	18 - 48deg.
S/A	25dB
NE ⁰	-25dB

Ζ. Δορυφορικό σύστημα Terrasar Χ



Ο νέος γερμανικός ενεργός δορυφόρος TerraSAR-Χ τέθηκε σε τροχιά επιτυχώς στις 15 Ιουνίου 2007, από το Baikonur στο Καζακστάν. Ο TerraSAR-X είναι ο πρώτος γερμανικός δορυφόρος Radar που εφαρμόζεται μέσα σε μια δημόσιαιδιωτική συνεργασία (PPP) μεταξύ του γερμανικού αεροδιαστημικού κέντρου (DLR) κορυφαίου και του

δορυφορικού ειδικού Astrium της Ευρώπης. DLR και Astrium μοιράζονται τις δαπάνες της ανάπτυξης, της κατασκευής και της επέκτασης του δορυφόρου.

Με την ενεργό κεραία του, το διαστημικό σκάφος, αποκτά νέες υψηλής ποιότητας εικόνες (με διακριτική ικανότητα 1m) από τη μικροκυμματική ζώνη X-band ολόκληρου του πλανήτη. Η τροχιά του είναι πολική και σε ύψος 514 χλμ. Ο TerraSAR-X σχεδιάστηκε για να εκτελέσει το στόχο του για πέντε έτη, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες και το φωτισμό.

Ακολουθούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα του radar

- 1. Active phased array X-band SAR
- 2.Single, dual and quad polarisation
- 3.Side-looking γεωμετρία αποκτήσεων
- 4.Ηλιοσύγχρονη Dawn-dusk επαναλαμβανόμενη τροχιά
- 5. Επαναληπτική λήψη: 11 ημέρες, ενώ νέα επίσκεψη 2.5 ημερών μπορεί να επιτευχθεί
- 6. Ύψος τροχιάς από 512 χλμ σε 530 χλμ
- 7. Τρεις λειτουργικοί τρόποι απεικόνισης:
 - ✓ <u>SpotLight</u>: διακριτική ικανότητα μέχρι 1m, 10 χλμ (πλάτος) X 5 χλμ (μήκος)
 - ✓ <u>StripMap</u>: διακριτική ικανότητα μέχρι 3m, 30 χλμ (πλάτος) X 50 χλμ (μήκος)
 - ✓ <u>ScanSAR</u>: διακριτική ικανότητα μέχρι 18 μ, 100 χλμ (πλάτος) Χ 150 χλμ (μήκος)

Στις StripMap και ScanSAR: το μήκος αποκτήσεων έχει δυνατότητα επέκτασης 1.650 χλμ



Στο μέλλον αναμένεται να τεθεί σε τροχιά ένας όμοιος δορυφόρος με σκοπό την δημιουργία ενός δορυφορικού αστερισμού. Ο δορυφορικός αστερισμός θα επιτρέψει την παραγωγή υψηλής ποιότητας ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DEMs) σε μια παγκόσμια κλίμακα (Infoterra/TerraSAR-X).

Η. Δορυφορικό σύστημα Cosmo-Skymed



Το COSMO-SkyMed είναι ένα διπλής χρήσης σύστημα παρακολούθησης της γης και του διαστήματος που αφιερώνεται στην παροχή προϊόντων και υπηρεσιών για τους ακόλουθους λόγους:

- εφαρμογές περιβαλλοντικού ελέγχου και επιτήρησης για τη διαχείριση εξωγενών, ενδογενών και ανθρωπογενών κινδύνων
- > παροχή εμπορικών προϊόντων και υπηρεσίων

Ο αστερισμός αποτελείται από 4 μεσαίου μεγέθους δορυφόρους, ο καθένας από τους οποίους είναι εξοπλισμένος με ένα υψηλής ευκρίνειας ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) που λειτουργεί στη X-band. Έχουν τεθεί σε μια ηλιο-σύγχρονη τροχιά σε ύψος περίπου 620km από τη γήινη επιφάνεια, με την ικανότητα να αλλαχτεί η θέση τους προκειμένου να αποκτηθούν εικόνες τόσο από την δεξιά όσο και την αριστερή πλευρά της δορυφορικής διαδρομής (η κανονική απόκτηση είναι η δεξιά πλευρά). Το επίγειο τμήμα είναι αρμόδιο για τη διαχείριση του αστερισμού και τη χορήγηση των ειδικών υπηρεσιών για τη συλλογή, την αρχειοθέτηση και την παράδοση των προϊόντων στους χρήστες.

<u>KEΦΑΛΑΙΟ 2</u> <u>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ RADAR ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ</u> <u>(Synthetic Aperture Radar-SAR)</u>

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η ανάλυση του τρόπου λειτουργίας του radar συνθετικού ανοίγματος καθώς η παρουσίαση των εικόνων SAR. Αρχικά γίνεται αναφορά στις βασικές αρχές που διέπουν ένα SAR σύστημα (Κεφάλαιο 2.1). Στην συνέχεια περιγράφεται η γεωμετρία των radar συνθετικού ανοίγματος καθώς και τα χαρακτηριστικά της εικονοληψίας (Κεφάλαιο 2.2). Ακολουθεί η ανάλυση της διαχωριστικής ικανότητας των SAR (Κεφάλαιο 2.3) και του τρόπου επανασκέδασης του σήματος που εκπέμπεται από αυτά (Κεφάλαιο 2.4). Τέλος γίνεται αναφορά στις εικόνες που παράγονται από ένα τέτοιο σύστημα (Κεφάλαιο 2.5), όπου δίνεται έμφαση στο θόρυβο(Κεφάλαιο 2.5.2).

2.1 Βασικές αρχές των SAR

Το Radar συνθετικού ανοίγματος (SAR) είναι ένα σύστημα απεικόνισης μικροκυμάτων. Έχει την ικανότητα συννεφο-διείσδυσης επειδή χρησιμοποιεί μικροκύματα. Επιπλέον έχει τη δυνατότητα λειτουργίας και την ημέρα και την νύκτα επειδή αποτελεί ένα ενεργό σύστημα. Τέλος, το interferometric configuration, Interferometric SAR ή InSAR, επιτρέπει τις ακριβείς μετρήσεις της διαδρομής της ακτινοβολίας επειδή είναι συνεπές (coherent). Οι μετρήσεις των διακυμάνσεων της διαδρομής αυτής ως συνάρτηση της θέσης του δορυφόρου και του χρόνου της απόκτησης επιτρέπουν την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DEM) και τη μέτρηση των παραμορφώσεων (σε εκατοστά) της επιφάνειας του εδάφους (ESA, 2007). Τέλος θα πρέπει να πούμε ότι τα συστήματα SAR είναι αρκετά πολύπλοκα και με μεγάλο κόστος κατασκευής. Παρουσιάζουν όμως πλεονεκτήματα ως προς την ανάλυση σε σχέση με τα συστήματα RAR (real aperture radar) στα οποία το μικρό μήκος της κεραίας δημιουργεί προβλήματα στην ανάλυση.

Τα συστήματα SAR εκπέμπουν παλμούς μικροκυματικής ακτινοβολίας διάρκειας μερικών λεπτών από μία κεραία που βρίσκεται πάνω στο δορυφόρο ή στο αεροσκάφος και έτσι αποτελούν πηγές ενέργειας ή φωτισμού. Η μικροκυματική ακτινοβολία διαδίδεται μέσω της ατμόσφαιρας προς την επιφάνεια της γης, σκεδάζεται ή ανακλάται και στη συνέχεια ένα μέρος της επιστρέφει προς την κεραία, ενώ το υπόλοιπο χάνεται προς διαφορετική κατεύθυνση. Η καταγραφή του χρόνου επιστροφής του παλμού στα όργανα του δορυφόρου είναι αυτή που καθορίζει τη θέση των γήινων χαρακτηριστικών επάνω στην εικόνα.

Ένα σύστημα SAR δεν κοιτάζει κατευθείαν προς τα κάτω (ναδίρ) αλλά προς τα κάτω και πλαγίως του τροχιακού επιπέδου, σε αντίθεση με έναν οπτικό δείκτη. Αυτό είναι απαραίτητο έτσι ώστε οι παλμοί (εκπεμπόμενοι) να σαρώνουν τη γήινη επιφάνεια σε αυξανόμενες αποστάσεις από το Radar και συνεπώς να αποδίδουν στην εικόνα την διάσταση στη διεύθυνση των μετρούμενων αποστάσεων.

2.1.1 Γεωμετρία εικονοληψίας

Η γεωμετρία της εικονοληψίας ενός συστήματος SAR διαφέρει σηγαντικά από την αντίστοιχη των σαρωτών οπτικών συστημάτων που συλλέγουν την ανακλώμενη ακτινοβολία κυρίως από το ναδίρ της τροχιάς. Η μικροκυματική δέσμη μεταδίδεται υπό γωνία και προς τα δεξιά της δορυφορικής πλατφόρμας είτε αυτή εκτελεί ανερχόμενη τροχιά είτε κατερχόμενη, σαρώνοντας μία λωρίδα συγκεκριμένου πλάτους (swath C, βλέπε σχήμα 2.1), η οποία βρίσκεται εκτός σημείου ναδίρ (B, σχήμα 2.1).



πηγή CCRS

Χαρακτηριστικά εικονοληψίας

•Διεύθυνση της απόστασης (D): Η διεύθυνση της απόστασης (range) είναι κάθετη στην διεύθυνση της τροχιάς (A) της πλατφόρμας ενώ η διεύθυνση του αζιμούθιου (azimuth) (E) είναι παράλληλη σε

αυτή.

 Εγγύς (A) και άπω (B) περιοχή: Το τμήμα της εικόνας που βρίσκεται κοντά στο ναδίρ ονομάζεται "εγγύς περιοχή" (near range) και το μακρύτερο τμήμα ονομάζεται "άπω περιοχή" (far range) (βλέπε σχήμα 2.2).

•<u>Γωνία πρόσπτωσης:</u> (incidence angle-A) ονομάζουμε τη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της μικροκυμματικής δέσμης και του εδάφους, η οποία αυξάνεται από την εγγύς περιοχή προς την άπω περιοχή (βλέπε σχήμα 2.3).

•<u>Γωνία παρατήρησης:</u> (look angle-B) ονομάζεται η γωνία με την οποία βλέπει το σύστημα SAR τη γήινη επιφάνεια (βλέπε σχήμα 2.3).

•<u>Slant range distance</u>: Η κεκλιμένη απόσταση (slant range distance-C) κατά την εγκάρσια διάσταση σε σχέση με την τροχιά είναι η απόσταση της πλατφόρμας από το αντικείμενο-στόχο στη γήινη επιφάνεια και έπεται ότι η απόσταση αυτή θα κυμένεται ανάλογα με τη θέση του αντικειμένου μέσα στην περιοχή σάρωσης (βλέπε σχήμα 2.3).

•<u>Ground range distance</u>: Η εδαφική απόσταση (ground range distance-D) είναι η πραγματική ορίζονται απόσταση κατά μήκος του εδάφους μεταξύ του ίχνους του συστήματος στο ναδίρ και το αντικείμενο-στόχο και η οποία επίσης κυμαίνεται ανάλογα με τη θέση του αντικείμενου μέσα στη περιοχή σάρωσης (βλέπε σχήμα 2.3).

(CCRS)



πηγή CCRS

"Συμβολομετρία, μελέτη περίπτωσης: Η εδαφική παραμόρφωση της περιοχής της Ναυπάκτου" Κωσταρά Ιωάννα

2.1.2 Διαχωριστική ικανότητα του συστήματος SAR

Διαχωριστική ικανότητα ή χωρική ανάλυση ενός συστήματος Radar είναι η ελάχιστη απόσταση δύο αντικειμένων στόχων που μπορούν να διακριθούν σε μία εικόνα και είναι συνάρτηση συγκεκριμένων ιδιοτήτων της μικροκυματικής ακτινοβολίας και της γεωμετρίας εικονοληψίας. Η χωρική ανάλυση εξαρτάται από το μήκος του παλμού στη διεύθυνση της κεκλιμένης απόστασης, που είναι κάθετη στη διεύθυνση τροχιάς, και από πλάτος σάρωσης της επιφάνειας στη διεύθυνση του αζιμουθίου, που είναι παράλληλη της τροχιάς. Ως εκ τούτου καθορίζονται δύο διαχωριστικές ικανότητες της απόστασης και του αζιμουθίου.

Η χωρική ανάλυση στην απόσταση καθορίζεται από το μήκος του παλμού. Για να επιτευχθεί η διάκριση δύο αντικειμένων στόχων πρέπει τα ανακλώμενα σήματά τους να φθάνουν στο δορυφόρο σε διαφορετικούς χρόνους. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει τα δύο αντικείμενα να έχουν τέτοια απόσταση ώστε να μην περικλείονται από τη ζώνη του μισού μήκους του παλμού. Όσο μικρότερο είναι το μήκος του παλμού τόσο καλύτερη ανάλυση έχουμε, βέβαια θα πρέπει να τονίσουμε ότι η μείωση αυτή δεν μπορεί να είναι απεριόριστη.

Η χωρική ανάλυση του αζιμούθιου καθορίζεται από το γωνιακό πλάτος της μικροκυματικής δέσμης και την κεκλιμένη απόσταση. Η ανάλυση αυξάνεται όσο η δέσμη διαδίδεται σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Το πλάτος της μικροκυματικής δέσμης είναι αντιστρόφως ανάλογο με το μήκος της κεραίας, όσο μεγαλύτερη είναι η κεραία τόσο το πλάτος της δέσμης θα είναι λεπτότερο και η ανάλυση του αζιμούθιου θα είναι λεπτομερέστερη. Το μήκος της κεραίας υπόκειται σε τεχνικούς περιορισμούς και κυμαίνεται από 1-2 m σε αερομεταφερούμενες πλατφόρμες και από 10-15 m σε δορυφόρους (Μιγκίρος, κ.α., 2003).

2.1.2 Επανασκέδαση σήματος Radar από φυσικά αντικείμενα.

Μια εικόνα SAR μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ψηφιδωτό (δηλ. ένα διασδιάστατο σχήμα που αποτελείται από στήλες και σειρές) αποτελούμενο απο μικρά στοιχεία (pixels). Κάθε pixel αντιστοιχεί σε μια μικρή περιοχή της γήινης επιφάνειας (το οποίο ονομάζεται resolution cell). Κάθε pixel έχει έναν σύνθετο αριθμό ο οποίος εμπεριέχει πληροφορίες για την ισχύ (δηλαδή για το εύρος και τη φάση) του σήματος που επανασκεδάζονται. Η ισχύς εξαρτάται από διαφορετικούς παράγοντες μεταξύ των οποίων είναι οι παράμετροι παρατήρησης (μήκος κύματος, συχνότητα,

πόλωση, προσπίπτουσα γωνία του εκπεμπόμενου κύματος) και οι επιφανειακοί παράμετροι (ανάγλυφο-τραχύτητα, γεωμετρικό σχήμα και διηλεκτρικές ιδιότητες των αντικειμένων). Οι διαφορετικές σειρές της εικόνας συνδέονται με την διαφορετική θέση του αζιμούθιου, ενώ οι διαφορετικές στήλες υποδεικνύουν διαφορετική θέση της διαγωνίου απόστασης (slant range).

Όσον αφορά το μήκος κύματος πρέπει να πούμε ότι ανάλογα με το μήκος κύματος έχουμε και διαφορετική διείσδυση της ακτινοβολίας, έτσι όσο αυξάνεται το μήκος κύματος τόσο αυξάνεται και η διείσδυση. Από την άλλη η διηλεκτρική σταθερά η οποία περιγράφει την ικανότητα των υλικών να απορροφούν, να ανακλούν ή να μεταφέρουν την μικροκυματική ενέργεια, αυξάνει με την παρουσία της υγρασίας στα υλικά αλλάζοντας σημαντικά τις ιδιότητας ενός αντικειμένου για τον τρόπο που θα εμφανίζεται σε μια εικόνα Radar. Η επανασκέδαση και επομένως η φωτεινότητα θα είναι έντονη όταν υπάρχει αυξημένο ποσοστό υγρασίας.



Επιπλέον τα διάφορα αντικείμενα της γήινης επιφάνειας ανακλούν σε διαφορετικό βαθμό το σήμα του Radar. Ο βαθμός αυτός ονομάζεται συντελεστής επανασκέδασης. Το ποσό της ανάκλασης καθορίζει και την απόχρωση, στην κλίμακα του γκρι, σε μια εικόνα SAR.

Έτσι μία λεία επιφάνεια με υψηλή διηλεκτρική σταθερά συμπεριφέρεται σαν καθρέπτης με αποτέλεσμα το σήμα να ανακλάται εξ ολοκλήρου προς την κατεύθυνση του δορυφόρου. Τα υλικά αυτά είναι γνωστά ως κατροπτικοί ανακλαστήρες και εμφανίζονται με σκούρο γκρι στις εικόνες SAR. Αντίθετα μια τραχιά επιφάνεια θα αποτυπώνεται με μέσες αποχρώσεις του γκρι λόγω της επιστροφής μέρος του σήματος, ενώ αντικείμενα που σχηματίζουν κάθετη επιφάνεια όπως τα κτίρια θα εμφανίζονται με ανοικτές-λευκές αποχρώσεις.

Τέλος το ανάγλυφο της γήινης επιφάνειας παίζει σημαντικό ρόλο όταν αυτό έχει διαστάσεις που μπορούν να συγκριθούν με το προσπίπτον μήκος κύματος. Ο τρόπος που αποτυπώνεται η τραχύτητα του εδάφους σε μία εικόνα, ως ανάγλυφη ή λεία, εξαρτάται από το μέγεθος των αλλαγών στην επιφάνεια του, το μήκος κύματος και την προσπίπτουσα γωνία. Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία πρόσπτωσης και το μήκος κύματος σε σχέση με το μέγεθος των επιφανειακών αλλαγών, τόσο περισσότερο λεία εμφανίζεται η επιφάνειά του αντικειμένου (Μιγκίρος, κ.α., 2003).

2.2 Εικόνες που παράγονται από τα συστήματα SAR

2.2.1 Βασικά στοιχεία της απεικόνισης με Radar

Στη βασική λειτουργία του Radar περιλαμβάνεται η εκπομπή ενός ελαχίστου χρόνου υψηλής ενέργειας σήματος και η αποτύπωση της επανασκέδασης από τη γήινη επιφάνεια του σήματος αυτού. Η πληροφόρηση η οποία καταγράφεται έχει άμεση σχέση, δηλαδή εμπεριέχει στην αποτύπωσή της τα ακόλουθα:

- •τη σχετική υφή του σήματος
- •το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ του εκπεμπόμενου και του εισερχόμενου σήματος
- •τη διεύθυνση από την οποία προέρχεται το ανακλώμενο σήμα

Ένα μικρής ισχύος εισερχόμενο σήμα εμφανίζεται στην εικόνα Radar ως σκούρο ή μαύρο. Στα ενεργά συστήματα Radar το ίδιο όργανο χρησιμοποιείται για την εκπομπή και τη λήψη της μικροκυματικής ακτινοβολίας, ενώ η αποτύπωση των σημάτων γίνεται σε ψηφιακή μορφή. Τα ψηφιακά δεδομένα επεξεργάζονται έτσι ώστε να δημιουργηθεί το τελικό προϊόν που είναι μία δισδιάστατη συλλογή από ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων.

Η υφή μιας εικόνας SAR διακρίνεται σε τρία συστατικά που είναι:

1.Η μίκρο-υφή ή θόρυβος (speckle), που εμφανίζεται σαν τυχαίοι κόκκοι ίδιου μεγέθους ή ελαφρώς μεγαλύτεροι από την κυψελίδα διακριτικής ικανότητας, η οποία είναι υπεύθυνη για την μείωση της ικανότητας αναγνώρισης της εικόνας και η επίδραση της μπορεί να ελαττωθεί με τεχνικές φιλτραρίσματος.

2.Η μέσο-υφή, η οποία εκφράζει την διαφοροποίηση της έντασης του ανακλώμενου σήματος η οποία οφείλεται στη φύση του υλικού και στη γεωμετρία της επιφάνειάς του. Η υφή αυτή είναι πολλές φορές μεγαλύτερη από την κυψελίδα διακριτικής ικανότητας και είναι πολύ σημαντική για την ερμηνεία της εικόνας.

3.Η μάκρο-υφή, αφορά τις διαφοροποιήσεις της φωτεινότητας του Radar και οφείλεται σε αντικείμενα της γήινης επιφάνειας, όπως οι δρόμοι, γραμμώσεις που έχουν σχέση με τη δομή των πετρωμάτων, όρια μεταξύ των χρήσεων γης κ.λ.π.. Η υφή αυτή είναι επίσης πολύ σημαντική στην ερμηνεία της εικόνας, ενώ με τη χρήση ειδικών φίλτρων είναι δυνατό να διευκολυνθεί η ανίχνευσή τους.

Μία εικόνα λοιπόν αποτελείται από τρεις συνιστώσες και επιπλέον από το ραδιομετρικό τμήμα το οποίο χαρακτηρίζεται από τη μέση ανάκλαση μιας ομοιογενούς επιφάνειας (Μιγκίρος, κ.α., 2003).

<u>2.2.2 Θόρυβος(Speckle)</u>

Η παρουσία διαφόρων στοιχείων (scatterers) μέσα σε κάθε εικονοστοιχείο δημιουργεί μία κοκκώδη εμφάνιση στην εικόνα κάτι που ισχύει για όλες τις εικόνες με μεγάλη συνοχή (coherent). Το συγκεκριμένο είδος θορύβου είναι παρόν σε όλες τις εικόνες SAR αλλά όχι στις οπτικές εικόνες. Ομοιογενείς περιοχές του εδάφους που επεκτείνονται σε πολλά εικονοστοιχεία SAR (φανταστείτε, παραδείγματος χάριν, έναν μεγάλο γεωργικό τομέα που καλύπτεται από έναν τύπο καλλιέργειας) εμφανίζονται με διαφορετικά εύρη στα διάφορα εικονοστοιγεία. Με αυτό τον τρόπο η γενική υφή της εικόνας παρουσιάζει κηλίδωση. Η παρουσία του θορύβου στις εικόνες καθιστά δύσκολη την ερμηνεία. Εντούτοις, με τη λήψη περισσότερων εικόνων της ίδιας περιοχής στους διαφορετικούς χρόνους ή από ελαφρώς διαφορετικές γωνίες, ο θόρυβος μπορεί να μειωθεί, χωρίς όμως να εξαλειφθεί πλήρως. Ο υπολογισμός του μέσου όρου διάφορων εικόνων τείνει να ακυρώσει την τυχαία μεταβλητότητα εύρους και να αφήσει το ομοιόμορφο επίπεδο εύρους αμετάβλητο (ESA, 2007). Η μείωση του θορύβου μπορεί να επιτευχθεί και με διάφορες τεχνικές επεξεργασίας, δεδομένου ότι η εικόνα έχει ήδη υποστεί μείωση του θορύβου με την τεχνική multi-looking, πριν αυτή αποκτηθεί από τον χρήστη. Η χρήση ειδικών φίλτρων μπορεί να μειώσει το θόρυβο και ανάλογα με το μέγεθος τους η ομογενοποίηση των πρωτογενών δεδομένων μπορεί να είναι μικρή ή μεγάλη (Μιγκίρος, κ.α., 2003).

2.2.3 Εικόνες που παράγονται

Όλα τα προϊόντα που δημιουργούνται από τα συστήματα SAR είναι εικόνες σε ψηφιακή μορφή. Οι εικόνες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το επίπεδο επεξεργασίας τους.

- •RAW: Τα raw αρχεία αποτελούνται πρωτογενή δεδομένα με βοηθητικά αρχεία.
 Χρησιμοποιούνται για συνθέσεις εικόνων και στην συμβολομετρία. Από αυτά θα παραχθούν μετά όλα τα άλλα είδη εικόνων με περαιτέρω επεξεργασία.
- •SLC (Single Look Complex Image): εικόνες που λαμβάνονται έπειτα από το φιλτράρισμα των raw δεδομένων τόσο στο εύρος όσο και στο αζιμούθιο. Χρησιμοποιούνται για υπολογισμό

εύρους και φάσης, καθώς και στην συμβολομετρία. Παρά την επεξεργασία των εικόνων διατηρείται η αρχική σύνθεση της δηλαδή, η φάση παραμένει ίδια.

Υπάρχουν δύο μορφές του προϊόντος SLC:

- 1. Full frame (SLCI) format.
- 2. Quarter frame (SLCn)
- •PRI (Precision Image): εικόνες εύρους 3-look με ραδιομετρική διόρθωση. Χρησιμοποιούνται για ποσοτικές αναλύσεις, φωτοερμηνεία και επεξεργασία εικόνων.
- •GEC (Ellipsoid Geocoded Image): εικόνες εύρους 3-look με ραδιομετρική διόρθωση και γεωαναφορά (WGS84) χωρίς φωτοσταθερά σημεία. Χρησιμοποιούνται για φωτοερμηνεία και επεξεργασία εικόνων
- •MRI (Medium Resolution Image): εικόνες εύρους multi-look με ραδιομετρική διόρθωση.
 Χρησιμοποιούνται για παρακολούθηση σε σχεδόν πραγματικό χρόνο και έλεγχο με την χρήση δεδομένων υψηλής διαχωριστικής ικανότητας για εντοπισμό πλοίων, παρακολούθηση μολύνσεων κλπ.

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</u> ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η ανάλυση και περιγραφή της τεχνικής της συμβολομετρίας. Αρχικά γίνεται μία εισαγωγή περιγράφοντας το τι είναι αυτή η τεχνική και ποιές είναι οι βασικές αρχές που την διέπουν (Κεφάλαιο 3.1). Στην συνέχεια γίνεται ανάλυση της τεχνικής της συμβολομετρίας (Κεφάλαιο 3.2) και αναφέρονται οι περιορισμοί που παρουσιάζει η τεχνική (Κεφάλαιο 3.3). Ακολουθεί η χρήση της συμβολομετρίας στους διάφορους επιστημονικούς κλάδους (Κεφάλαιο 3.4). Στο Κεφάλαιο 3.5 εξηγείται η σώρευση συμβολογραφημάτων, η οποία αποτελεί μία από τις τεχνικές της συμβολομετρίας. Τέλος στο Κεφάλαιο 3.5 περιγράφεται και αναλύεται διεξοδικά η τεχνική των σταθερών ανακλαστήρων. Αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθείται στην τελευταία τεχνική, οι περιορισμοί που παρουσιάζει και τέλος αναφέρονται οι τομείς που μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

3.1 Εισαγωγή στη συμβολομετρία

Η συμβολομετρία (interferometry) είναι μια τεχνική ανίχνευσης και παρακολούθησης των παραμορφώσεων του εδάφους. Το σχετικό χαμηλότερο κόστος και η μη καταπατητική εφαρμογή της έχουν οδηγήσει στην ευρεία χρήση της τεχνικής από πολυάριθμους επιστημονικούς κλάδους. Οι κινήσεις του εδάφους οφείλονται κυρίως σε διάφορα φυσικά φαινόμενα (σεισμοί, καθιζήσεις, ηφαιστειακή δραστηριότητα). Όμως παραμορφώσεις στο έδαφος μπορούν να προκληθούν λόγω ανθρώπινων παρεμβάσεων-δραστηριοτήτων στη Γη όπως είναι η άντληση υδάτων ή η ύπαρξη ορυχείων. Τέλος οι όποιες παραμορφώσεις στο εδάφους μπορεί να οφείλονται σε συνδυασμό και των δύο παραπάνω παραγόντων. Από οποιονδήποτε λόγο και αν έχει προκληθεί η παραμόρφωση αυτή έχει οικονομικό και περιβαλλοντικό αντίκτυπο καθώς μπορεί να απειλήσει την ασφάλεια των ανθρώπων. Αυτό έχει οδηγήσει στην ευρεία ανάπτυξη της τεχνικής τα τελευταία 15 χρόνια.

3.2 Τεχνική της συμβολομετρίας

Οι συμβολομετρικές τεχνικές είναι τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων Radar. Οι εικόνες που αποκτούνται από τους δορυφόρους SAR περιλαμβάνουν, όπως ειπώθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, τιμές για τη φάση και το εύρος των σημάτων που λαμβάνονται και αφορούν για κάθε ένα εικονοστοιχίο της εικόνας. Για να δημιουργηθεί ένα συμβολογράφημα απαιτούνται δύο εικόνες

για την περιοχή μελέτης που αποκτούνται είτε από δύο διαφορετικές γωνίες την ίδια στιγμή, από δύο δορυφόρους (τότε μιλάμε για single-pass συμβολομετρία), είτε μπορεί να έχουν ληφθεί σε δύο διαφορετικές στιγμές στο χρόνο από τον ίδιο δορυφόρο ή από διαφορετικούς όπως στην περίπτωση των ERS-1 και ERS-2 (τότε μιλάμε για repeat-pass συμβολομετρία).

Η απόσταση μεταξύ των δύο δορυφόρων (ή των τροχιών) καλείται βασική γραμμή συμβολόμετρων (interferometer baseline) ενώ η κάθετη προβολή αυτής στο επίπεδο είναι η κάθετη βασική γραμμή (perpendicular baseline).

Από τις δύο εικόνες υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ των τιμών των φάσεων για κάθε εικονοστοιχείο και δημιουργείται το συμβολογράφημα. Το συμβολογράφημα παράγεται με τον διαγώνιο πολλαπλασιασμό, εικονοστοιχείο επί εικονοστοιχείο. Η πρώτη εικόνα πολλαπλασιάζεται με την σύνθετη κλίση της. Κατά συνέπεια, το εύρος των συμβολογραφημάτων είναι το εύρος της πρώτης εικόνας που πολλαπλασιάζεται με αυτήν της δεύτερης, ενώ η φάση της είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των εικόνων (ESA, 2007). Το συμβολογράφημα λοιπόν είναι μία εικόνα όπου σε κάθε pixel απεικονίζεται η διαφορά μεταξύ των φάσεων ενός σήματος μικροκυμάτων. Η χρησιμότητα ενός συμβολογραφήματος προέρχεται από το γεγονός ότι οι διαφορές αυτές στη φάση αντιστοιχούν σε μετατόπιση του αντίστοιχου αντικειμένου στην επιφάνεια της γης στο χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο λήψεων. Η διαφορά φάσης επηρεάζεται όμως και από άλλους παράγοντες, αν όμως αυτοί οι παράγοντες εξαληφθούν τότε μπορεί να ληφθεί μία ακριβής μέτρηση μετατοπίσεων-παραμορφώσεων.

3.3 Βασικές αρχές και περιορισμοί της συμβολομετρίας

Η συμβολομετρία μπορεί να εφαρμοστεί κάτω από προϋποθέσεις. Για την repeat-pass συμβολομετρία η απόσταση μεταξύ των δύο γραμμών πτήσης δεν πρέπει να είναι πάνω από μια ορισμένη τιμή (περίπου 1 km για τον ERS). Οι δορυφόροι SAR σχεδιάζονται για να επαναλάβουν τις τροχιές τους κυκλικά και επομένως η πρώτη προϋπόθεση ικανοποιείται. Άλλοι παράμετροι που πρέπει να ικανοποιηθούν είναι η κλίση του εδάφους να μην είναι πολύ απότομη, το μήκος κύματος των σημάτων να είναι ικανοποιητικό (μεγάλο) και η διακριτική ικανότητα (resolution) του εικονοστοιχείου να είναι καλή. Όλα τα παραπάνω εξαρτώνται από την απόσταση των δύο λήψεων. Ένας περαιτέρω παράγοντας που πρέπει να ικανοποιηθεί είναι ότι το έδαφος πρέπει να παρατηρηθεί από την ίδια κατεύθυνση. Το τελευταίο αναφέρεται στο γεγονός ότι δεν είναι δυνατό να εφαρμοστεί η συμβολομετρία σε ζεύγη εικόνων που ανήκουν σε διαφορετικούς δορυφόρους με διαφορετικά χαρακτηριστικά αισθητήρων (παραδείγματος χάριν με διαφορετικο μήκος κύματος ή πόλωση). Επίσης, οι εικόνες του ίδιου δορυφόρου που έχουν αποκτηθεί με διαφορετικό τρόπο (άνοδος ή κατέβασμα) δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Τα συμβολογραφήματα υπόκεινται σε ορισμένους περιορισμούς. Οι πιο σημαντικοί είναι η χρονική και η γεωμετρική-χωρική αποσυσχέτιση (decorrelation). Η θέση και ο προσανατολισμός των αντικειμένων στο έδαφος μπορούν να αλλάξουν κατά τη χρονική διάρκεια που μεσολαβεί μεταξύ των δύο λήψεων (χρονική αποσυσχέτιση), κάτι τέτοιο αποτελεί σημαντική πηγή σφαλμάτων για την repeat-pass συμβολομετρία. Όσον αφορά τη γεωμετρική αποσυσχέτιση και αυτή μπορεί να περιορίσει τη χρήση της συμβατικής συμβολομετρίας και οφείλεται στη γεωμετρία της τεχνικής. Όταν γίνει η ταύτιση των απεικονίσεων κάθε εικονοστοιχείο δεν αντιστοιχεί στην ίδια ακριβώς μοναδιαία περιοχή μελέτης.Τα συμβολογραφήματα επηρεάζονται επίσης από δύο είδη ασάφειας. Κατ' αρχάς, οι διαφορές φάσης δίνονται ως μέρη των κύκλων. Δεύτερον, τα συμβολογραφήματα παρέχουν τις σχετικές αλλαγές της φάσης, και όχι τις απόλυτες αλλαγές, αυτό σημαίνει ότι πρέπει ήδη να ξέρουμε ένα σημείο με μηδενική παραμόρφωση και να αναφέρουμε σε αυτό όλες τις μετρήσεις.

Οι υψηλές κλίσεις παραμόρφωσης δεν μπορούν να μετρηθούν. Το όριο είναι ένα interferometric περιθώριο ανά εικονοκύτταρο. Υπάρχουν επίσης και κάποιοι άλλοι περιορισμοί όπως: η συμβολομετρία πρέπει να εφαρμοστεί πάνω σε πολλά εικονοστοιχεία, επειδή όταν λαμβάνεται μόνο ένα εικοστοιχείο υπόψη, οι ατμοσφαιρικοί περιορισμοί και άλλοι θόρυβοι δεν μπορούν να απομονωθούν. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να μελετηθούν τα γεωφυσικά φαινόμενα που είναι εξαπλωμένα σε τουλάχιστον 10 εικονοστοιχεία (Massonnet και Feigl, 1998).

3.4 Εφαρμογές συμβολομετρίας

Η συμβολομετρία χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, η πιο διαδεδομένη όμως είναι εκείνη που εφαρμόζεται σε σεισμικά γεγονότα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για πρώτη φορά μέσω της συμβλομετρίας μπορούν να χαρτογραφηθούν οι παραμορφώσεις στην επιφάνεια της γης σε μια μεγάλη χωρική και χρονική κλίμακα με ακρίβεια εκατοστού ή και ακόμη και χιλιοστού. Επιπλέον για να εφαρμοστεί η τεχνική της συμβολομετρίας δεν απαιτείται κάποιος ακριβός εξοπλισμός στην

επιφάνεια της Γης. Μερικές από τις εφαρμογές είναι οι ακόλουθες :

- > Δημιουργία ψηφικού μοντέλου αναγλύφου (DEM)
- Χαρτογράφηση τοπογραφικών χαρτών
- > Δασολογία
- Ταξινόμηση χρήσεων γης
- Μελέτη ωκεάνιων ρευμάτων
- > Υδρολογία
- Μετακινήσεις παγετώνων
- Παράκτιες ζώνες
- Ανίχνευση αλλαγών
- > Καθίζηση εδάφους
- > Ηφαιστειακοί κίνδυνοι
- > Σεισμικά γεγονότα

3.5 Σώρευση συμβολογραφημάτων (stacking)

Το stacking είναι μια τεχνική της συμβολομετρίας όπου υπολογίζεται ο μέσος όρος όλων των συμβολογραφιμάτων, προκειμένου να περιοριστεί ο αντίκτυπος των ατμοσφαιρικών αποτελεσμάτων στα στοιχεία. Δηλαδή, σε αυτή την τεχνική ο αντίκτυπος των ατμοσφαιρικών αποτελεσμάτων αφαιρείται βασισμένος στο γεγονός ότι εξετάζοντας έναν μεγάλο αριθμό συμβολογραφημάτων τα ατμοσφαιρικά αποτελέσματα τείνουν να γίνουν μηδενικά.

3.6 Συμβολομετρία σταθερών ανακλαστήρων (Permanent Scatterers Technique)

Οι τεχνικές της συμβατικής Συμβολομετρίας Radar χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανίχνευση εδαφικών παραμορφώσεων μεγάλης κλίμακας. Μετακινήσεις μικρότερες των 28mm δεν είναι δυνατό να ανιχνευτούν με την παραπάνω τεχνική. Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις αποτελούν ίσως τον σημαντικότερο περιοριστικό παράγοντα στην αναγνώριση μετακινήσεων μικρότερης κλίμακας. Άλλοι περιοριστικοί παράγοντες είναι η χωρική και η χρονική αποσυσχέτιση.

Προκειμένου να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα και να είναι δυνατή η μέτρηση παραμορφώσεων της τάξης του χιλιουστού, έχουν αναπτυχθεί κάποιες τεχνικές οι οποίες

χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό κινήσεων σε μεμονωμένα εδαφικά σημεία. Λόγω λοιπόν της φύσης των συγκεκριμένων τεχνικών, όπου μελετώνται συγκεκριμένα σημεία των οποίων τα χαρακτηριστικά ανάκλασης του σήματος παραμένουν σταθερά καλούνται τεχνικές σταθερών ανακλαστήρων.

Η τεχνική σταθερών ανακλαστήρων (PSInSAR) είναι μια προηγμένη δορυφορική τεχνολογία που επιτρέπει τη ακριβή μέτρηση των μετακινήσεων της επίγειας επιφάνειας χρησιμοποιώντας εικόνες Radar. Ακόμη και οι μετακινήσεις 0.1mm ανά χρόνο μπορούν να μετρηθούν. Αυτό είναι δυνατό επειδή η φάση του σήματος ραντάρ που εκπέμπεται από το δορυφορικό αισθητήρα και που επανασκεδάζεται από το έδαφος είναι ανάλογη προς την απόσταση μεταξύ του δορυφορικού αισθητήρα και του σημείου στο έδαφος από το οποίο το σήμα επανασκεδάζεται. Η τεχνική PS αναπτύχθηκε στο πολυτεχνικό πανεπιστήμιο του Μιλάνου (POLIMI) και κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 2000. Είναι το αποτέλεσμα περισσότερων από 10 ετών έρευνας της ομάδας SAR στο POLIMI.

Η τεχνική σταθερών ανακλαστήρων συνίσταται σε μία σειρά αριθμητικών επεξεργασιών των δεδομένων που συλλέγονται από τα Padar, κατά τη διάρκεια των οποίων τα δεδομένα μελετώνται στατιστικά και ο θόρυβος όπως η διαταραχή λόγω της ατμόσφαιρας, λάθη στο DEM αναφοράς αφαιρούνται. Στο τέλος λαμβάνονται τιμές μετατοπίσεων των σημείων στο έδαφος, οι οποίες καλούνται PS. Για να εφαρμοστεί η τεχνική είναι απαραίτητο να υπάρξουν τουλάχιστον 25 με 30 εικόνες Radar για την περιοχή ενδιαφέροντος.

Οι σταθεροί ανακλαστήρες (PS) είναι σημεία στη γήινη επιφάνεια που έχουν πάντα την ίδια συμπεριφορά στις εικόνες Radar που αποκτούνται στους διαφορετικούς χρόνους. Παρά τις ποικίλες κλιματολογικές και ατμοσφαιρικές συνθήκες και τις διαφορετικές δορυφορικές γωνίες αποκτήσεων, παρουσιάζουν τις ίδιες ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες. Είναι συνήθως μέρη κτηρίων, μεταλλικές δομές, βράχοι, φραγμοί του σκυροδέματος. Τα PS μπορούν να έχουν ποικίλες διαστάσεις (μπορούν να αντιστοιχούν σε μια κεραία TV πάνω από σε μια στέγη καθώς επίσης και σε μια μεγάλη πέτρινη πλάκα). Πάντως θα πρέπει να έχουν μια "καλή" συμπεριφορά, επομένως θα έχουν πάντα μικρές διαστάσεις, πολύ μικρότερες από το resolution cell. Η τεχνική PS επιτρέπει τη μέτρηση των μετατοπίσεων αυτών των σημείων (TERRAFIRMA, 2010).

Ανάλογα με την περιοχή μελέτης έχουμε και διαφορετικό αριθμό PSs που ανακτώνται. Στις αστικές

περιοχές τα PS ανακτώνται με υψηλή πυκνότητα, πάνω από 500 PS/km². Η πυκνότητα μειώνεται στην επαρχία (περίπου 150 PS/km²) και είναι η χαμηλότερη στις ορεινές περιοχές, όπου κατά μέσο όρο βρίσκονται 20 PS/km². Για να εφαρμόστει η τεχνική, πρέπει η πυκνότητα σε PS να είναι τουλάχιστον 4-5 PS/km², διαφορετικά είναι αδύνατο να διορθωθούν τα δεδομένα από τα ατμοσφαιρικά αποτελέσματα.

Μερικές φορές πολλά PS βρίσκονται το ένα κοντά στο άλλο και σύμφωνα με μια ευθεία γραμμή. Αυτό συμβαίνει επειδή το σήμα Radar που επανασκεδάζεται από την επιφάνεια σε εκείνη την περιοχή είναι πολύ ισχυρό. Λόγω του φιλτραρίσματος του σήματος δεν το εμφανίζει ως ένα μεγάλο χαρακτhριστικό αλλά το σύστημα το αποδίδει ως ομάδα PS, όπου τα PS που έχουν την υψηλότερη συνοχή είναι τα πραγματικά PS και τα σημεία στην πλευρά τους θα έχουν μειωμένη συνοχή και θα αντιπροσωπεύσουν τις ίδιες επαναλαμβανόμενες πληροφορίες.

Η ακρίβεια των ερευνών που ολοκληρώνονται από την τεχνική PS εξαρτάται από τον αριθμό των διαθέσιμων εικόνων στην περιοχή ενδιαφέροντος, από τη σταθερότητα κάθε PS και από την απόσταση των PS από το σημείο αναφοράς. Όσο υψηλότερη η συνοχή, τόσο υψηλότερη η αξιοπιστία της μέτρησης των μετατοπίσεων. Επιπλέον η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από από τις ημερομηνίες που έχουν ληφθεί οι εκόνες και από την απόσταση μεταξύ των τροχιών (normal baseline). Λαμβάνοντας υπόψη τον ίδιο αριθμό εικόνων εν τούτοις, μια ομοιόμορφα διανομή των ημερομηνιών αποκτήσεων και των κανονικών βασικών γραμμών θα οδηγήσει σε μεγαλύτερες ακρίβειες από μια άνιση διανομή (TERRAFIRMA, 2010).

<u>3.6.2 Μεθοδολογία</u>

Το αρχικό στάδιο της μελέτης περιλαμβάνει τον έλεγχο της διαθεσιμότητας εικόνων SAR για την εκάστοτε περιοχή μελέτης. Η επιτυχία της τεχνικής εξαρτάται από την ποιότητα των SAR δεδομένων, όπως αυτή ορίζεται από την σταθερότητα της συχνότητας Doppler μεταξύ των λήψεων. Επιπλέον, το σύνολο των διαθέσιμων εικόνων καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την αξιοπιστία των τελικών αποτελεσμάτων της επεξεργασίας. Πρακτικά υπάρχει ένα ελάχιστο όριο εικόνων, περίπου είκοσι λήψεις, πέραν του οποίου τα τελικά αποτελέσματα χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό αβεβαιότητας. Η παρουσία θορύβου στα δεδομένα έχει άμεσες συνέπειες στην εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Έτσι στα αρχικά στάδια της επεξεργασίας επικεντρώνονται στην απομάκρυνση του θορύβου. Το βασικό μέρος της επεξεργασίας πραγματοποιείται με εξειδικευμένα λογισμικά τα

οποία αναλύουν την απόκριση των φάσεων σε κάθε σημείο-στόχο με σκοπό να διαχωριστούν οι επιμέρους συνεισφορές στη φάση. Γίνεται απομάκρυνση του θορύβου λόγω ατμοσφαιρικών επιδράσεων, φάσεων λόγω αναγλύφου και άλλων παραμέτρων.

Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

Βήμα 1: Επιλέγεται μία εικόνα ως κύρια (master) πάνω στην οποία θα βασιστούν όλα τα επόμενα βήματα.

Βήμα 2: Συμπροσαρμογή των SAR εικόνων με τη κύρια εικόνα. Η συμπροσαρμογή μεταξύ του συνόλου των εικόνων μπορεί να έχει ακρίβεια μεγαλύτερη από 1/8 του εικονοστοιχείου.

Βήμα 3: Υπολογίζεται σε όλες τις εικόνες η αναλογία μεταξύ της μέσης έντασης και της σταθερής απόκλισης. Όταν αυτή η τιμή υπερβαίνει ένα ορισμένο κατώτατο όριο (συνήθως 2,5 ή 3) τότε αποτελεί ένα υποψήφιο PS. Όλα τα υποψήφια PSs καλούνται PSC (υποψήφιοι σταθεροί ανακλαστήρες).

Βήμα 4: Δημιουργία διαφορικών συμβολογραφημάτων. Κάθε ένα από τα οποία υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ μιας εικόνας και της κύριας εικόνας. Αν υποθέσουμε ότι οι εικόνες είναι Ν τότε θα δημιουργηθούν N-1 συμβολογραφήματα.

Όσον αφορά τα συμβολογραφήματα υποθέτουμε ότι σε κάθε PSC το σημείο είναι ανάλογο προς τη μετατόπιση PSC συν μια σειρά άλλων θορύβων. Οι παράγοντες που παρεμποδίζουν την αξία μετατοπίσεων είναι: μια ατμοσφαιρική οθόνη φάσης που επιβάλλεται στην εικόνα (αποκαλούμενη APS), τα λάθη στο DEM αναφοράς και ο θόρυβος. Μόλις εξαλειφθούν τα αποτελέσματα θορύβου, μπορεί να εξαχθεί μία πολύ ακριβής μέτρηση των μετακινήσεων κάθε PS.

Τα περισσότερα από τα βήματα της τυποποιημένης τεχνικής PS εκτελούνται αυτόματα, αλλά κάθε ένα από αυτά ελέγχεται πάντα από έναν ειδικό. Μερικές μεταβάσεις είναι αντ' αυτού ημιαυτόματες, όπως στην περίπτωση της επιλογής της κύριας εικόνας ή της επιλογής σημείου αναφοράς, υπό την έννοια ότι το λογισμικό προτείνει μια επιλογή αλλά είναι ο χειριστής που πρέπει να την δεχτεί ή να κάνει μια διαφορετική επιλογή. Σε περίπτωση της επιλογής της κύριας εικόνας, η εικόνα που προτείνεται από το σύστημα πρέπει να ελεγχθεί από το χειριστή για τις μετεωρολογικές συνθήκες πρίν γίνει αποδεκτή. Η επιλογή του PSC και των PS εκτελείται αυτόματα ενώ ο έλεγχος της ποιότητας της εικόνας πραγματοποιείται από το χειριστή. Σε περίπτωση προηγμένης ανάλυσης PS η αλληλεπίδραση με το χειριστή είναι υψηλότερη και απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι υπολογισμού.

3.6.3 Περιορισμοί της τεχνικής σταθερών ανακλαστήρων

•Η τεχνική PS δεν είναι ικανή να ανιχνεύσει τις γρήγορες μετακινήσεις (περισσότερο από 1cm κάθε 35 ημέρες σε περίπτωση ERS), εκτός αν τα επίγεια στοιχεία είναι διαθέσιμα εκθέτοντας το μέγεθος της μετατόπισης. Αυτός ο περιορισμός οφείλεται στο γεγονός ότι η συμβολομετρία μπορεί να μετρήσει τις παραλλαγές της απόστασης αισθητήρας-στόχων ίσης με ένα μέρος του μήκους κύματος (ισοδύναμου με 5,66cm για τους δορυφόρους ERS) αλλά όταν οι παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες από ένα ολόκληρο μήκος κύματος, δεν είναι δυνατό να μετρηθούν ολόκληρες οι τιμές αλλά μόνο τα δεκαδικά μέρη τους.

Λαμβάνοντας υπόψη τη συχνότητα των αποκτήσεων από το δορυφόρο (κάθε 35 ημέρες για το ERS), η τεχνική δεν είναι δυνατό να ακολουθήσει σε πραγματικό χρόνο την εξέλιξη ενός φαινομένου, εκτός αν προγραμματίζονται ειδικές αποκτήσεις (όπως σε περίπτωση Radarsat).

Από τις αστικές περιοχές, στις περιοχές που καλύπτονται κυρίως από βλάστηση, ο αριθμός
 πιθανών μετρήσεων μειώνεται λόγο ελλειψης τεχνητών δομών ή βράχων.

•Είναι απαραίτητο να υπάρξει ένα σύνολο δεδομένων τουλάχιστον 15-20 εικόνων της ίδιας
 περιοχής για να είναι δυνατή μια ανάλυση (TERRAFIRMA, 2010)

3.6.4 Χρησιμότητα της τεχνικής των σταθερών ανακλαστήρων

Η τεχνική PS είναι κατάλληλη για διάφορες εφαρμογές.

 Ανίχνευση περιοχών που έχουν υποστεί καθίζηση ή ανύψωση. Οι παραμορφώσεις αυτές μπορεί να έχουν προκληθεί από την άντληση των υδάτων

✓ Ανίχνευση των περιοχών όπου το έδαφος έχει υποστεί ολίσθηση και περιοχών με ασταθή κλίση.

✓ Έλεγχος των ηφαιστειακών ζωνών και των σεισμογενών περιοχών.

✓Προγραμματισμός των νέων δρόμων και υποδομών: Τα στοιχεία που λαμβάνονται από την ανάλυση των εικόνων Radar μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βοηθήσουν τις στρατηγικές αποφάσεις στον προγραμματισμό των νέων οδικών διαδρομών και των υποδομών.

✓ Δυνατότητα εύρεσης ευθυνών σε περίπτωση ζημιών που προκαλούνται από σημαντικές εργασίες

(γραμμές υπογείων, σήραγγες, κ.λπ.). Η τεχνική PS είναι πράγματι ένα χρήσιμο εργαλείο για μια αναδρομική ανάλυση που θα μπορούσε να βοηθήσει σε καλύτερη ετυμηγορία στις δικαστικές διαμάχες.

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</u>

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση της υπό μελέτη περιοχής. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα φυσικό-γεωγραφικά χαρακτηριστικά, η γεωλογία και τεκτονική της περιοχής και η σεισμικότητα. Σκοπός είναι να αποκτηθεί καλή γνώση του υποβάθρου της περιοχής, ώστε να είναι δυνατή η ανάλυση των αποτελεσμάτων της τεχνικής των σταθερών ανακλαστήρων στο επόμενο κεφάλαιο.

4.1 Φυσικό-Γεωγραφικά χαρακτηριστικά

Περιοχή μελέτης της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας αποτελεί η ευρύτερη περιοχή της Ναυπάκτου. Η Ναύπακτος βρίσκεται στα νότιο-ανατολικά όρια του Νομού Αιτολωακαρνανίας, ο οποίος ανήκει στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Στερεάς Ελλάδας. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περιοχή μελέτης περιλαμβάνεται και ένα μικρο τμήμα του Νομού Φωκίδας, και πιο συγκεκριμένα το νότιο-δυτικό τμήμα του. Ακολουθεί ο χάρτης θέσης της περιοχής.

<u>Χάρτης 1:</u> Γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης πηγή: ιδία επεζεργασία



ΧΑΡΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Το ορεινό στοιχείο κυριαρχεί στην υπό μελέτη περιοχή. Ένας μεγάλος ορεινός όγκος βρίσκεται στα βόρειο-δυτικά της υπό μελέτη περιοχής (Όρη Ναυπάκτου). Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από πολλές δασώδεις εκτάσεις, οι οποίες βρίσκονται κυρίως στα ορεινά. Το υδρογραφικό δίκτυο χαρακτηρίζεται από τον κύριο ποταμό, τον Μόρνο, ο οποίος κόβει την περιοχή στην μέση και διέρχεται από τα βόρεια για να καταλήξει στο νοτιότερο τμήμα της περιοχής, το Δέλτα του Μόρνου. Εκτός από τον Μόρνο το υδρογραφικό δίκτυο χαρακτηρίζεται από πολλές διακλαδώσεις μόνιμης η μη ροής.

Το κλίμα της περιοχής αυτής ποικίλει από θερμά καλοκαίρια με πολλή υγρασία σε ήπιους χειμώνες στις χαμηλού υψομέτρου περιοχές. Έχει αυξημένες βροχοπτώσεις, σύντομες περιόδους καλοκαιρινής ξηρασίας και μεγάλη ηλιοφάνεια. Κρύοι χειμώνες κυριαρχούν στις ορεινές περιοχές, ενώ σε ακόμα μεγαλύτερα υψόμετρα, τα καλοκαίρια είναι δροσερά. Χιόνια καθώς και κρύος καιρός χαρακτηρίζουν τους χειμερινούς μήνες. Ακολουθεί ο τοπογραφικός χάρτης της περιοχής.

<u>Χάρτης 2</u>: Τοπογραφικός Χάρτης Ναυπάκτου (πρωτογενή δεδομένα: αντίστοιχος χάρτης ΓΥΣ) πηγή: ιδία επεξεργασία

<u>ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ</u> <u>ΝΑΥΠΑΚΤΟΣ</u>





"Συμβολομετρία, μελέτη περίπτωσης: Η εδαφική παραμόρφωση της περιοχής της Ναυπάκτου" Κωσταρά Ιωάννα

4.2 Γεωλογία και Τεκτονισμός

Η περιοχή της Ναυπάκτου βρίσκεται σε συνεχή τεκτονική και γεωλογική εξέλιξη.

Ο ηπειρωτικός φλοιός της περιοχής παρουσιάζει έναν μεγάλο αριθμό ρηγμάτων (ενεργών και μη ενεργών). Το σύνολο των ρηγμάτων αυτών βρίσκεται στα ανατολικά της περιοχής μελέτης, κοντά στα όρια των νομών Φωκίδος και Αιτωλοακαρνανίας. Τα περισσότερα από αυτά τα ρήγματα έχουν διεύθυνση Α-Δ και χαρακτηρίζονται κανονικά. Εξαίρεση αποτελούν τα ρήγματα που βρίσκονται κοντά στα ανατολικά παράλια της περιοχής, και τα οποία έχουν διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ. Θα ήταν σκόπιμο να τονιστεί ότι τα ρήγματα αυτά χρονολογούνται πριν από το 1967 και τα περισσότερα από αυτά θεωρούνται πλέον ανενεργά. Στον θαλάσσιο πυθμένα του κορινθιακού κόλπου υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός ενεργών ρηγμάτων, τα οποία είναι υπεύθυνα για την σημερινή τεκτονική εξέλιξη της περιοχής (Brooks and Ferentinos 1984, Ferentinos et. al. 1985, Chronis et al., 2001).

<u>Χάρτης 3</u>: Γεωλογικός Χάρτης Ναυπάκτου (για την δημιουργία του χάρτη χρησιμοποιήθηκε ο γεωλογικός χάρτης του 1967 του ΙΓΜΕ) πηγή: ιδία επεξεργασία



"Συμβολομετρία, μελέτη περίπτωσης: Η εδαφική παραμόρφωση της περιοχής της Ναυπάκτου" Κωσταρά Ιωάννα

Η περιοχή της Ναυπάκτου ανήκει στην γεοτεκτονική ενότητα της ζώνης της Πίνδου, εκτός από το νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής το οποίο ανήκει στην ζώνη του Ιονίου. Στο νοτιοδυτικό τμήμα επικρατεί ο φλύσχης ηλικίας Ηώκαινου-Μειόκαινου και αποτελείται από εναλλαγές κυανοπράσινων και αμμούχων μαργών, ψαμμιτών και κροκαλοπαγών. Τα πετρώματα που επικρατούν στην περιοχή είναι οι ασβεστόλιθοι, ο φλύσχης και οι κερατόλιθοι.

Στους κατώτερους ορίζοντες επικρατούν ασβεστόλιθοι ηλικίας Ανώτερου Τριαδικού οι οποίοι είναι μικροκρυσταλικοί, εναλλασσόμενοι με αργιλικούς σχιστόλιθους, χρώματος υποπράσινου εώς ερυθρού και ραδιολαρίτες. Ο επόμενος ορίζοντας αποτελείται από ρυθρίζοντες, λευκούς, μικροκρυσταλλικούς, ωολιθικούς ασβεστόλιθους με προσθήκες από τρυματοφόρα και ασβεστοφύκη καθώς επίσης και παρεμβολές ερυθρών ραδιολαριτών, ηλικίας Ιουρασικού. Ο ορίζοντας που ακολουθεί του Κατώτερου Κρητιδικού εμφανίζει ερυθρούς κερατόλιθους με παρεμβολές αργιλικών σχιστόλιθων και μάργων. Στον ορίζοντα ηλικίας Ανώτερου Κρητιδικού επικρατούν ασβεστόλιθοι οι οποίοι είτε είναι πολυγενείς μικρολατυποπαγείς με θραύσματα Ρουσιστων είτε αποτελούνται από εναλλαγές πλακωδών και εστρωμένων πελαγικών ασβεστολίθων, με κόνδυλους και λεπτές ενστρώσεις κερατόλιθων και στα ανώτερα μέλη παρουσιάζονται ψαμμίτες και αργιλικοί σχιστόλιθοι με κερατόλιθως. Τέλος στον ορίζοντα ηλικίας Ανώτερου Κρητιδικού-Ηώκαινου επικρατεί ο φλύσχης ο οποίος αποτελείται από εναλλαγές ψαμμιτών με παρεμβολές λεπτοπλάκωδων βιοκλαστικών ασβεστολιθων και μαργών με Τρηματοφόρα.

Στα νότια και κεντρικά της περιοχής δηλαδή στο δέλτα του Μόρνου επικρατούν σύγχρονες προσχώσεις και πλευρικά κορήματα ηλικίας του Τετταρτογενούς, καθώς και σύγχρονοι κώνοι κορυμάτων.

Τέλος στο νότιο-δυτικότερο τμήμα της περιοχής μελέτης εμφανίζονται λιμναία στρώματα ηλικίας Πλειόκαινου τα οποία αποτελούνται από μάργες, ασβεστόλυθους, κροκαλοπαγοί και ίλυς με λιγνίτες (Γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ, 1967).

<u>4.3 Σεισμικότητα</u>

Η εξεταζόμενη περιοχή αποτελεί μια από τις πιο σεισμικά ενεργές περιοχές τόσο της Ελλάδας όσο και της Ευρώπης, όπως αποδεικνύεται από τις ενόργανες σεισμικές καταγραφές και από την βιβλιογραφία ιστορικής σεισμικότητας. Είναι γνωστό ότι η περιοχή έχει πληγεί στο παρελθόν από από πολλούς ισχυρούς σεισμούς, οι οποίοι προκάλεσαν σοβαρές καταστροφές (Ambrasseys and

Jackson, 1997). Από τους σεισμούς του παρελθόντος ιδιαίτερα καταστροφικός ήταν ο σεισμός του 373 π.Χ.. Το 1402 είναι γνωστό ότι η περιοχή επλήγη από ένα ισχυρότατο σεισμό. Άλλοι ισχυροί σεισμοί που έπληξαν την περιοχή έλαβαν χώρα τα έτη 1748, 1817, 1861, 1870, 1888, 1909, 1928, 1965,1970 καθώς και οι πιο πρόσφατοι σεισμοί του 1981 και του 1995 στην Αίγιο.



<u>Χάρτης 4</u>: Σεισμικότητα Δυτικής Ελλάδας για την περίοδο 1995-2006 <u>πηγή: http://seismo.geology.upatras.gr</u>

Στην περιοχή της Ναυπάκτου έχουν καταγραφεί από το 1968 εώς τις 22/01/2010 συνολικά 4467 σεισμικά γεγονότα, των οποίων τα μεγέθοι κυμαίνονται από 1,2 εώς 5,5 Richter και μπορεί να φτάνουν σε βάθος εώς και 130,4km. Από τους σεισμούς αυτούς οι 154 είχαν μέγεθος πάνω από 4

Richter. Ο μεγαλύτερος σεισμός που έχει καταγραφεί στην περιοχή ήταν της τάξεως των 5,5 Richter και είχε επίκεντρο σημείο με συντεταγμένες LAT: 38,404 LON: 21,961 (κοντά στην περιοχή του Ευπαλίου) και βάθος 0,8μ και έγινε στις 18/01/2010. Ακολουθεί χάρτης ο οποίος παρουσιάζει όλους τους σεισμούς που έχουν καταγραφεί στην περιοχή από το 1968 και είχαν μέγεθος μεγαλύτερο από 4 Richter (Εθνικό Αστεροσκοπείο).

> <u>Χάρτης 5</u>: Σεισμικότητα της Ναυπάκτου , για την περίδο 1968-2010, εμφανίζονται οι σεισμοί με μέγεθος >4R πηγή: Ιδία επεζεργασία



<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</u>

<u>Χρήση της τεχνικής της Συμβολομετρίας Σταθερών Ανακλαστήρων στην</u> <u>περιοχή της Ναυπάκτου</u>

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται και περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την διαδικασία παραγωγής των εικόνων συμβολομετρίας. Επίπλεον αναφέρονται όλα τα πρωτογενή δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Τέλος γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων καθώς και μία προσπάθεια ερμηνείας τους.

<u>5.1 Η χρήση της τεχνικής της συμβολομετρίας σταθερών ανακλαστήρων στην περιοχή της</u> <u>Ναυπάκτου</u>

Για την εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο εικόνες συμβολομετρίας , οι οποίες δημιουργήθηκαν από εικόνες SAR από τους δορυφόρους ERS-1 και -2 και ENVISAT για το χρονικό διάστημα 1992 εώς 2009. Στην μία εικόνα παρουσιάζονται οι εδαφικές παραμορφώσεις που έχουν παρατηρηθεί στην περιοχή για την χρονική περίοδο 1992-2002 και στην άλλη για την περίοδο 2002-2009. Πιο συγκεκριμένα για την εικόνα συμβολομετρίας της περιόδου 1992-2002 χρησιμοποιήθηκαν 42 SAR εικόνες από τους δορυφόρους ERS-1, -2, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

			ΚΩΔΙΚΟΣ				ΦΟΡΑ
A/A	HM/NIA	ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ	ΛΗΨΗΣ	TPOXIA	ΠΛΑΙΣΙΟ	ΠΟΛΩΣΗ	ΛΗΨΗΣ
1	12/11/92	ERS-1	6937	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
2	10/06/93	ERS-1	9943	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
3	19/08/93	ERS-1	10945	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
4	28/10/93	ERS-1	11947	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
5	25/03/95	ERS-1	19305	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
6	29/04/95	ERS-1	19806	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
7	03/06/95	ERS-1	20307	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
8	08/07/95	ERS-1	20808	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
9	13/08/95	ERS-2	1636	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
10	17/09/95	ERS-2	2137	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
11	21/10/95	ERS-1	22311	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
12	31/12/95	ERS-2	3640	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
13	19/05/96	ERS-2	5644	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
14	23/06/96	ERS-2	6145	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
15	01/09/96	ERS-2	7147	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
16	06/10/96	ERS-2	7648	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
17	10/11/96	ERS-2	8149	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
18	15/12/96	ERS-2	8650	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
19	19/01/97	ERS-2	9151	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
20	23/02/97	ERS-2	9652	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
21	04/05/97	ERS-2	10654	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
22	08/06/97	ERS-2	11155	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
23	13/07/97	ERS-2	11656	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
24	17/08/97	ERS-2	12157	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
25	21/09/97	ERS-2	12658	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
26	30/11/97	ERS-2	13660	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
27	04/01/98	ERS-2	14161	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
28	19/04/98	ERS-2	15664	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
29	24/05/98	ERS-2	16165	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
30	28/06/98	ERS-2	16666	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
31	02/08/98	ERS-2	17167	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
32	06/09/98	ERS-2	17668	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
33	28/02/99	ERS-2	20173	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
34	13/06/99	ERS-2	21676	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
35	18/07/99	ERS-2	22177	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
36	22/08/99	ERS-2	22678	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
37	26/09/99	ERS-2	23179	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
38	31/10/99	ERS-2	23680	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
39	05/12/99	ERS-2	24181	279	2835	VV	КАӨОЛІКН
40	09/01/00	ERS-2	24682	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
41	23/04/00	ERS-2	26185	279	2835	VV	ΚΑΘΟΛΙΚΗ
42	28/05/00	ERS-2	26686	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ

Πίνακας 5.1 : Χαρακτηριστκά των εικόνων ERS-1 -2

		ΚΩΔΙΚΟΣ				ΦΟΡΑ
A/A	HM/NIA	ΛΗΨΗΣ	TPOXIA	ΠΛΑΙΣΙΟ	ΠΟΛΩΣΗ	ΛΗΨΗΣ
1	20/10/02	3339	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
2	09/03/03	5343	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
3	22/06/03	6846	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
4	09/11/03	8850	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
5	28/03/04	10854	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
6	11/07/04	12357	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
7	19/09/04	13359	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
8	06/02/05	15363	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
9	13/03/05	15864	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
10	17/04/05	16365	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
11	22/05/05	16866	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
12	04/09/05	18369	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
13	13/11/05	19371	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
14	26/02/06	20874	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
15	11/06/06	22377	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
16	16/07/06	22878	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
17	29/10/06	24381	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
18	11/02/07	25884	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
19	05/08/07	28389	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
20	27/01/08	30894	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
21	06/04/08	31896	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
22	11/05/08	32397	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
23	15/06/08	32898	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
24	20/07/08	33399	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
25	24/08/08	33900	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
26	28/09/08	34401	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
27	07/12/08	35403	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
28	15/02/09	36405	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
29	22/03/09	36906	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ

Πίνακας 5.2 : Χαρακτηριστκά των εικόνων ENVISAT

Για τον αρχικό υπολογισμό της φάσης λόγω αναγλύφου χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου SRTM χωρικής ανάλυσης 90m/pixel, καθώς και τα τροχιακά δεδομένα ακρίβειας από το Ινστυτουτο DELFT (DELFT, 2010).

5.2 Αποτελέσματα της τεχνικής

Στις εικόνες 5.1 και 5.2 που ακολουθούν βλέπουμε τα αποτελέσματα της συμβολομετρίας. Με αστεράκι αποτυπώνεται το σημείο-σταθερός ανακλαστήρας που θεωρήθηκε ως σταθερό για την εξεταζόμενη περιοχή. Με κουκκίδες παρουσιάζονται τα σημεία-ανακλαστήρες που παραμορφώνονται. Από αυτά με κόκκινο εμφανίζονται εκείνα που καθιζάνουν, σε σχέση με τον σταθερό ανακλαστήρα , ενώ με πράσινο εκείνα που ανυψώνονται. Τέλος με κίτρινο εμφανίζονται

τα σημεία τα οποία δεν παρουσιάζουν ή όχι ελάχιστη παραμόρφωση. Στην ουσία στις δύο εικόνες παρουσιάζονται οι εδαφικές παραμορφώσεις σε σχέση με τον χρόνο στην περιοχή της Ναυπάκτου.

Εικόνα 5.1: Αποτελέσματα τεχνικής συμβολομετρίας PS με την χρήση εικόνων SAR των ERS-1 και -2 για την περιοχή της Ναυπάκτου για την περίοδο 1992-2000



πηγή: Terrafirma/Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Η ετήσια παραμόρφωση που παρατηρείται στην περιοχή την περίοδο 1992-2000 σε κάθε ανακλαστήρα κυμαίνεται από -7 mm/y εώς και 2 mm/y. Αναλυτικότερα η περιοχή που βρίσκεται ανάμεσα στην πόλη της Ναυπάκτου και στο χωριό Μοναστηράκι -περιοχή που αποτελεί το δέλτα του ποταμού Μόρνου- εμφανίζει την τάση της καθίζησης. Παρόμοια τάση παρατηρούμε και στην περιοχή του Μοναστηρακίου καθώς και λίγο βορειότερα από αυτήν. Αντίθετα κατευθυνόμενοι από την πόλη της Ναυπάκτου δυτικά προς την Περιοχή του Αντιρίου παρατηρούμε ότι το έδαφος



της Ναυπάκτου για την περίοδο 2002-2009 πηγή: Terrafirma/Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Εικόνα 5.2: Αποτελέσματα τεχνικής συμβολομετρίας PS με την χρήση εικόνων SAR του ENVISAT για την περιοχή

Όσον αφορά την περίοδο 2002-2009, η ετήσια εδαφική παραμόρφωση που παρατηρείται στην περιοχή μελέτης κυμαίνεται από -7 mm/y εώς και 4 mm/y. Πιο συγκεκριμένα όπως και στην χρονική περίοδο 1992-2000 η περιοχή του Δέλτα του Μόρνου παρουσιάζει την τάση καθίζησης. Η πόλη της Ναυπάκτου καθώς και η περιοχή που ορειοθετείται από την Ναύπακτο και το Αντίρριο κάθε χρόνο ανυψώνεται. Στο χωριό Μοναστηράκι όμως παρουσιάζεται διαφορά στην συμπεριφορά του εδάφους από την περίοδο 1992-2000, ενώ θα περιμέναμε να ανεβαίνει, η περιοχή παρουσιάζει την τάση να καθιζάνει. Βορειότερα από το δέλτα του Μόρνου παρατηρείται μια μικρή τάση για ανύψωση του εδάφους. Κάτι ανάλογο συμβαίνει στην περιοχή του Ευπαλίου.

5.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 3, οι παράγοντες στους οποίους οφείλεται η εδαφική παραμόρφωση είναι είτε φυσικά φαινόμενα είτε φαινόμενα που οφείλονται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Τα φυσικά φαινόμενα μπορεί να είναι είτε σεισμικά φαινόμενα, είτε καθιζήσεις, είτε να προέρχονται από ηφαιστειακή δραστηριότητα. Στην περιοχή μελέτης όμως η όποια μεταβολή στο έδαφος δεν μπορεί να οφείλεται σε ηφαιστειακή δραστηριότητες αναφερόμαστε στην άντληση υδάτων, στην ύπαρξη ορυχείων κ.α.. Εδαφική παραμόρφωση όμως μπορεί να ύπαρξη και λόγο συνδυασμού των παραπάνω παραγόντων.

Οι παραμορφώσεις που προκαλούνται στο έδαφος μπορεί να είναι είτε ανύψωση είτε καθίζηση. Τα αίτια που μπορεί να προκαλέσουν τα δύο είδη παραμορφώσεων είναι διαφορετικά. Όσον αφορά την ανύψωση του εδάφους αυτή μπορεί να οφείλεται στους εξής λόγους :

- 1. τεκτονισμός
- 2. πρόσχωση
- 3. σφάλμα στην τεχνική λόγο μετατόπιση του ανακλαστήρα

Από την άλλη μεριά τα αίτια που μπορεί να προκαλέσουν καθίζηση στο έδαφος είναι :

- 1. τεκτονισμός
- 2. συμπύκνωση (κυρίως αναφερόμαστε σε λεπτόκοκκα υλικά)
- 3. κατολίσθηση (όπου η μία πλευρά θα ανυψώνεται και η άλλη θα καθιζάνει)
- συμπύκνωση λόγω άντλησης υδάτων του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, κάτι που συμβαίνει κυρίως σε δέλτα ποταμών και αν υπάρχουν κλαστικά υλικά (δεν παρατηρείται συμπύκνωση σε περιοχές όπου επικρατούν αλλουβιακά ρυπίδια.

Συγκεκριμένα στην περιοχή της Ναυπάκτου η καθίζηση που παρατηρείται στην περιοχή του δέλτα του Μόρνου πιθανολογούμε ότι οφείλεται σε συμπύκνωση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Όσον αφορά την περιοχή που βρίσκεται ανατολικά της πόλης της Ναυπάκτου, όπου παρουσιάζεται από την μέν βόρεια πλευρά ανύψωση και από την δε νότια καθίζηση, υποθέτουμε ότι αυτές οφείλονται είτε στην ύπαρξη κάπου ρήγματος είστε σε κατολίσθηση. Αυτό συμβαίνει γιατί η νοητή γραμμή όπου από την μία πλευρά έχουμε ανύψωση και από την άλλη καθίζηση παρουσιάζει γραμμικότητα. Οι περιοχές Μοναστηρακίου και Ευπαλίου την περίοδο 2002-2009 φαίνεται να ανυψώνονται. Το γεγονός αυτό υποθέτουμε ότι οφείλεται στην έντονη σεισμική δραστηριότητα όπου έχει σαν αποτέλεσμα την κατολίσθηση. Είναι γνωστό ότι και οι δύο περιοχές πλήττονται από κατολισθήσεις μετά από ισχυρές δονήσεις.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η εδαφική παραμόρφωση της περιοχής της Ναυπάκτου με τη χρήση εικόνων συμβολομετρίας σταθερών ανακλαστήρων. Η τεχνική της συμβολομετρίας σταθερών ανακλαστήρων της συμβολομετρίας σταθερών ανακλαστήρων είναι μια προηγμένη δορυφορική τεχνολογία η οποία επιτρέπει τη ακριβή μέτρηση των μετακινήσεων της επίγειας επιφάνειας χρησιμοποιώντας τις εικόνες ραντάρ. Ακόμη και οι μετακινήσεις 0.1mm ανά χρόνο μπορούν να μετρηθούν.

Η χρήση της τεχνικής της συμβολομετρίας σταθερών ανακλαστήρων και η ανάλυση των εικόνων συμβολομετρίας αποτέλεσε πολύ σημαντικό στοιχείο για την κατάδηξη των εδαφικών παραμορφώσεων της περιοχής.

Η περιοχή της Ναυπάκτου αποτελεί ένα σεισμικό εργαστήρι. Ο Κορινθιακός κόλπος και τα παράλια του αποτελούν με τη σειρά τους ένα γεωτεκτονικό εργαστήρι το οποίο εξελίσσεται συνεχώς. Χαρακτηριστικά αναφέται ότι η περιοχή του Κορινθιακού κόλπου αποτελεί μια από τις πιο ενεργές περιοχές του κόσμου. Για τους παραπάνω λόγους η περιοχή μελέτης είναι φυσικό να παρουσιάζει εδαφική παραμόρφωση στο χρόνο. Πιο συγκεκριμένα τα αίτια στα οποία οφείλονται αυτές οι εδαφικές παραμορφώσεις πιθανολογούμε πως είναι κυρίως η έντονη σεισμικότητα της περιοχής η οποία πολλές φορές οδηγεί και σε κατολισθήσεις και ο τεκτονισμός και τέλος οι προσχώσεις.

Το κύριο συμπέρασμα είναι ότι η περιοχή του Δέλτα του Μόρνου παρουσιάζει την τάση καθίζησης, ενώ η πόλη της Ναυπάκτου καθώς και η περιοχή που οριοθετείται από την Ναύπακτο και το Αντίρριο κάθε χρόνο ανυψώνεται. Τέλος στο χωριό Μοναστηράκι παρουσιάζεται διαφορά στην συμπεριφορά του εδάφους κατά τις περιόδους μελέτης της περιοχής. Το χρονικό διάστημα 1992-2000 η περιοχή ανυψώνεται ενώ το διάστημα 2002-2009 καθιζάνει.

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>

<u>ΕΛΛΗΝΙΚΗ</u>

Αναστασίου Δ., 2009, Πτυχιακή εργασία, "Μελέτη των τεκτονικών μετατοπίσεων στο Ιόνιο με ανάλυση χρονοσειρών GPS", Αθήνα.

Γκάνας Αθανάσιος, Simone Atzori, Cristiano Tolomei & Stefano Salvi, Συμβολομετρική χαρτογράφηση της παραμόρφωσης στην Θεσσαλία μεταξύ 1992-2000 με τη χρήση της μεθόδου SBAS (Small Baseline Subset), Τηλεπισκόπηση Εξελίξεις και Εφαρμογές, ΤΕΕ, Αθήνα, 22-23 Φεβρουαρίου 2007.

Κουρκούλη Π., 2008, Πτυχιακή Εργασία "Αζιοποίηση συμβολομετρικής συνοχής από δορυφορικές. εικόνες ERS στη δημιουτγία θεματικών χαρτών κάληψης γης", Αθήνα.

Μιγκίρος Γ., Παυλόπουλος Κ., Παρχαρίδης Ι., Γατσής Ι., Ψωμιάδης Ε., 2003, "Τηλεπισκόπηση: Εφαρμογές στις Γεωεπιστήμες", Αθήνα.

Παυλόπουλος Κ., 2008, "Σημειώσεις μαθήματος Εφαρμοσμένης Γεωμορφολογίας", Τμήμα Γεωγραφίας Χαροκόπειο Παν/μιο, Αθήνα.

ΔΙΕΘΝΗΣ

Ambraseys N.N. and Jackson, J.A., 1997. Seismicity and strain in the Gulf of Corinth (Greece) since 1964. *J. of Earthquake Eng.*, **1**, 433-474.

Astronautix,, 2010, ERS -1 -2, http://www.astronautix.com/craft/ers12.htm, 20.1.2010

Austalian Government/ Geoscience Austalia, 2010, *JERS-1 - Japanese Earth Resources Satellite-1*, <u>http://www.ga.gov.au/remote-sensing/satellites-sensors/jers-1.jsp</u>, 22.2.2010

Canada Centre for Remote Sensing (CCRS) ,"Fandamental of Remote Sensing",

"Συμβολομετρία, μελέτη περίπτωσης: Η εδαφική παραμόρφωση της περιοχής της Ναυπάκτου" Κωσταρά Ιωάννα http://ccrs.nrcan.gc.ca .

EORC/JAXA, 2010, *Japanese Earth Resources Satellite -1 (JERS-1)*, http://www.eorc.jaxa.jp/JERS-1/en/index.html, 23.2.2010

European Space Agency (ESA), 2007, "*InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry*". Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2001, Permanent Scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **39**, 8-20.

German Aerospace Center,"<u>TerraSAR-X - The German Radar Eye in Space</u>" (www.dlr.de)

Higgs B., 1988, Syn-sedimentary structural controls on basin deformation in the Gulf of Corinth (Greece), *Basin Res.*, **1**, 155-165.

JAXA, 2010, ALOS, http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_e.html, 21.2.2010

JPL, 2010, Seasat 1978, http://southport.jpl.nasa.gov/scienceapps/seasat.html, 10.2.2010

ILRS/NASA, 2010, http://ilrs.gsfc.nasa.gov, 20.1.2010

INFOTERRA, 2010, *TerraSAR-X: Satellite and Mission*, <u>http://www.infoterra.de/terrasar-x/terasar-x/terasar-x/terrasar-x/terrasar-x/</u>

Leeder, M.R., Seger, M.J. & Stark, C.P., 1991, The interaction between normal faulting and drainage in the active extensional basins, with examples from the western United States and central Greece, *Basin Res.*, **5**, 79-102.

Lagios E, Sakkas V., Parcharidis Is. & Deitrich V., 2005, Ground deformation of Nisyros Volcano Greece for the period 1995-2002 : Results from DinSAR and DGPS observations, *Bull. Volcanology*, **68**, 201-214.

Massonnet D. and Feigl K., 1998, "*Radar Interferometry and its applications in the earth's surface*", *Reviews of Geophysics*, **36**, 441-500.

M. Foumelis, I. Parcharidis, E. Lagios, N. Voulgaris, 2009, Evolution of post-seismic ground deformation of the Athens 1999 earthquake observed by SAR interferometry, *Journal of Applied*. *Geophysics*.

PALSAR project, 2010, *About PALSAR*, <u>http://www.palsar.ersdac.or.jp/e/about/sensor.html</u>, 23.2.2010

Radarsat, 2010, Mission, http://www.radarsat2.info/about/mission.asp , 20.2.2010

Radartutorial, 2010, Basics, www.radartutorial.eu, 15.2.2010

Terrafirma, 2010, FAQs, http://www.terrafirma.eu.com/FAQs.htm, 20.2.2010

UGS/COSMO-SkyMed, 2010, About COSMO-SkyMed, <u>http://www.cosmo-</u> skymed.it/en/index.htm, 26.2.2010

Urs Wegmiller, Charles Werner, Tazio Strozzi and Andreas Weismann, 2006, Application of SAR interferometric techniques for surface deformation monitoring, 3rd IAG / 12th FIG Sympsium, Baden, May 22-24.

$\underline{\textbf{\textsf{MAPAPTHMAI}}}$

Πίνακας: Μονάδες Μέτρησης

ΜΟΝΑΔΕΣ		
km	χιλιόμετρα	
m	μέτρα	
cm	εκατοστά	
mm	χιλιοστά	
min	λεπτά	
mm/y	εκατοστά/έτος	
m/pixel	μέτρα/pixel	
ps/km^2	σταθεροί ανακλαστήρες/τετραγωνικά χιλιόμετρα	