



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

## ΘΕΜΑ:

**Διαχρονική Συμβολομετρία Ραντάρ για την εκτίμηση  
ρυθμών παραμόρφωσης στην περιοχή της Δυτικής Κρήτης  
για την χρονική περίοδο 1992-2001. Σύγκριση με δεδομένα  
GPS.**

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Της

**Μαρίας Β. Κασκαρά**

Επιβλέπων Καθηγητής :

Δημήτρης Παραδείσης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2015





# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

## ΘΕΜΑ:

**Διαχρονική Συμβολομετρία Ραντάρ για την εκτίμηση  
ρυθμών παραμόρφωσης στην περιοχή της Δυτικής Κρήτης  
για την χρονική περίοδο (1992-2001). Σύγκριση με δεδομένα  
GPS.**

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Της

**Μαρίας Β. Κασκαρά**

**Επιβλέπων Καθηγητής :**

Δημήτρης Παραδείσης Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 20 Μαρτίου του 2015.

.....  
Δημήτρης Παραδείσης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Χαράλαμπος Κοντοές  
Διευθυντής ερευνών ΙΑΑΔΕΤ,  
ΕΑΑ

.....  
Βασιλεία Καραθανάση  
Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2015

.....

Μαρία Β. Κασκαρά

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Μαρία Β. Κασκαρά, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ-ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρακάτω διπλωματική εργασία εκπονήθηκε για την ολοκλήρωση των σπουδών μου στην σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το μεγαλύτερο μέρος της επεξεργασίας έγινε στα πλαίσια του έργου BEYOND (Building a Centre of Excellence for Earth Observation based monitoring of Natural Disasters in south-eastern Europe) στο Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών & Τηλεπισκόπησης (ΙΑΑΔΕΤ) του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ).

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατανόηση και εμβάθυνση στην τεχνολογία της Συμβολομετρίας καθώς και η εξαγωγή χαρτών εδαφικής παραμόρφωσης (deformation maps) και διαγραμμάτων διαχρονικής παραμόρφωσης (time series analysis) για την περιοχή της Δυτικής Κρήτης την περίοδο 1992-2001

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτριο Παραδείση, καθηγητή Ε.Μ.Π για την ανάθεση και επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας και τον υποψήφιο διδάκτορα Ξάνθο Παπανικολάου για την συμβολή του στα θέματα του GPS.

Παράλληλα, ευχαριστώ τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) για την παραχώρηση των SAR απεικονίσεων, την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε για την προμήθεια του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους καθώς επίσης και το ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογίας και Μεταλλευτικών Ερευνών) και το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο για τη συμβολή τους στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Θερμές ευχαριστίες στον κ. Χαράλαμπο Κοντοέ, Διευθυντή Ερευνών του Ινστιτούτου Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών & Τηλεπισκόπησης (ΙΑΑΔΕΤ) του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ) για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου και για την ευκαιρία που μου έδωσε να δουλέψω για το έργο BEYOND.

Ευχαριστώ τον Ιωάννη Παπουτσή, μεταδιδακτορικό ερευνητή του ΙΑΑΔΕΤ του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών για την καθοδήγηση και τη βοήθεια του σε τεχνικά θέματα. Οι κατευθύνσεις και συμβουλές του σε όλα τα στάδια της επεξεργασίας αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα για την αποτελεσματική πορεία της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την απεριόριστη ευγνωμοσύνη σε όλους μου τους συναδέλφους στο ΙΑΑΔΕΤ και τους φίλους μου για την υποστήριξή τους και στην οικογένεια μου για τη βοήθεια, στήριξη και υπομονή που διέθεσαν όλα αυτά τα χρόνια και για το εξαιρετικό επίπεδο σπουδών που μου προσέφεραν.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο νότιο τμήμα της Ελλάδας βρίσκεται το όριο μεταξύ της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής πλάκας. Η Ελλάδα βρίσκεται στην επαφής και σύγκλιση της Ευρασιατικής πλάκας με την Αφρικανική, γεγονός που αιτιολογεί την παρατηρούμενη υψηλή σεισμικότητα στην περιοχή της. Η βύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική είναι η αιτία παραγωγής του μάγματος σε βάθος κάτω από την υπερκείμενη πλάκα και ως αποτέλεσμα σχηματίζεται το Ελληνικό νησιωτικό τόξο. Το τόξο αυτό αποτελείται από μια διαδοχή νησιών, όπως η Ρόδος, η Κρήτη, τα Κύθηρα και η Πελοπόννησος. Επομένως, το νησί της Κρήτης θεωρείται κρίσιμη περιοχή όσον αφορά την τεκτονική δραστηριότητα γι' αυτό η χαρτογράφηση των τεκτονικών κινήσεων αυτής κρίνεται μεγάλης σημασίας.

Διαφορική Συμβολομετρία είναι μια τεχνική που έχει αναπτυχθεί ιδιαιτέρως τα τελευταία είκοσι χρόνια και είναι ικανή να μετρήσει παραμορφώσεις του εδάφους με μεγάλη ακρίβεια. Σε αυτή τη μελέτη, η παραμόρφωση της περιοχής ενδιαφέροντος έχει μετρηθεί με τη χρήση μιας σειράς ERS1 και ERS2 απεικονίσεων για την χρονική περίοδο 1992 έως 2001. Στις μέρες μας, υπάρχει μεγάλος αριθμός λογισμικών κατάλληλων για επεξεργασία εικόνας ραντάρ. Στην εργασία αυτή, παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ των λογισμικών StaMPS και SARscape.

Αρχικά, τα δεδομένα υπέστησαν επεξεργασία με το λογισμικό SARscape, το οποίο είναι μια επέκταση του λογισμικού ENVI που είναι κατάλληλο για την επεξεργασία διαστημικών δεδομένων από ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) αισθητήρες (Sahraoui et al., 2006). Αρχικά, όλο το σετ δεδομένων υποβλήθηκε σε επεξεργασία με τη βοήθεια της προηγμένης τεχνικής Διαφορικής Συμβολομετρίας, τη μέθοδο υποσυνόλων μικρών βάσεων (SBAS). SBAS είναι μια τεχνική η οποία είναι ιδανική για την μελέτη χωρικής και χρονικής εδαφικής παραμόρφωσης και μέσω της επεξεργασίας πολλαπλών εικόνων SAR μπορεί να παρέχει ένα γραμμικό ρυθμό παραμόρφωσης σε χιλιοστά ανά χρόνο.

Έπειτα, η επεξεργασία έγινε με τη χρήση του λογισμικού StaMPS [Hooper, 2006], ένα δωρεάν και ανοιχτού κώδικα λογισμικό που αναπτύχθηκε αρχικά στο πανεπιστήμιο του Stanford και η μετέπειτα ανάπτυξή του έγινε στα πανεπιστήμια της Ισλανδίας, Delft και Leeds. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε μια συνδυαστική μέθοδος των δύο διαφορετικών μεθόδων επεξεργασίας χρονοσειρών, αυτή των σταθερών σκεδαστών (PS) και αυτή των υποσυνόλων μικρών βάσεων (SBAS).

Εξαιτίας της θέσης του νησιού της Κρήτης και το πολυσύνθετο της περιοχής, η εδαφική παραμόρφωση του δείχνει μεγάλη διακύμανση.

Στην μελέτη αυτή, συνδυάζονται διαθέσιμα δεδομένα GPS των δικτύων URANUS και GREECE με τις ταχύτητες που υπολογίστηκαν από την διαδικασία της Συμβολομετρίας και γίνεται μια ερμηνεία των αποτελεσμάτων.





## **ABSTRACT**

To the southern part of Greece lies at the boundary between the Eurasian and African plates. Greece is on the verge of contact and convergence of the Eurasian plate and the African and this is the reason why it is an area of high seismicity. Because the Eurasian plate subducts the African plate, there is production of magma at depth below the over-riding plate and as a result the Hellenic island arc is formed. This island arc consists of a succession of islands such as Rhodes, Crete, Kythira and the Peloponnese. Therefore, Crete Island is considered crucial region concerning tectonic activity and that is why mapping the tectonic movements of Crete Island, Greece, is of high importance.

Differential interferometry is a technique that is rapidly developed in the last twenty years and is able to measure ground deformations with great accuracy. In this study, deformation of the area of interest has been measured using series of ERS1 and ERS2 acquisitions for the time period 1992 - 2001. Nowadays, there is a large number of software, suitable for radar image processing. In this thesis, a comparison is presented between the software StaMPS and SARscape.

Initially, data have been processed with SARscape software, which is a modular set of ENVI (ENvironment for Visualizing Images) functions and deals with processing spaceborne data from Synthetic Aperture Radar (SAR) sensors (Sahraoui et al., 2006). At first, the entire dataset was processed by means of an advanced InSAR technique, the Small Baseline Subset (SBAS) method. SBAS is a technique which is ideal for spatial and temporal ground deformation and via processing multiple SAR images can provide a linear deformation rate outline at a millimeter grade.

Then, the processing was done using the StaMPS software (Hooper, 2006), a free and open-source software that was originally developed at Stanford University and subsequent development has taken place at the University of Iceland, Delft University of Technology and University of Leeds. The results obtained using two different time series processing methods, this of the permanent scatterers (PS) and that of small baseline subsets (SBAS) and also a combined method.

The results show that due to the position of the island of Crete and the complexity of the regional tectonics, deformation shows a large variability.

In this study, available GPS data of URANUS and GREECE networks are combined with velocities calculated by the interferometric process and there is also an interpretation of the results.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ-ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	iii
ABSTRACT .....	v
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	vii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	x
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	xiii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	xv
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	3
2.1. Τεκτονική Ανάλυση Ελλαδικού χώρου.....	3
2.2. Σεισμολογία και Γεωτεκτονικό Περιβάλλον της Κρήτης.....	6
2.3. Θεματικοί Χάρτες Περιοχής Μελέτης .....	7
3. ΡΑΝΤΑΡ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ (SAR) .....	11
3.1. Εισαγωγή στα Συστήματα Ραντάρ .....	11
3.2. Εισαγωγή στα Συστήματα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (SAR).....	12
3.2.1. Αρχή Λειτουργίας SAR.....	12
3.2.2. Χωρική Ανάλυση.....	15
3.3. Γεωμετρία Λήψης Απεικόνισης SAR.....	17
3.3.1. Παράμετροι που Επηρεάζουν τις Απεικονίσεις SAR.....	19
3.3.2. Παραμορφώσεις SAR Απεικονίσεων.....	21
3.4. Ιδιότητες Απεικονίσεων SAR .....	23
3.4.1. Κηλίδωση (Speckle) .....	23
3.4.2. Τρόποι Λήψης.....	25
3.5. Χαρακτηριστικά Αντικειμένων-Στόχων .....	28
3.6. Εφαρμογές SAR Απεικονίσεων.....	31
4. ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ SAR ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ .....	33
4.1. Αρχές της Συμβολομετρίας .....	33
4.2. Μορφές Συμβολομετρίας.....	35
4.2.1. Συμβολομετρία κατά Πλάτος (across track interferometry).....	36
4.2.2. Συμβολομετρία κατά Μήκος (along track interferometry).....	37
4.2.3. Διαφορική Συμβολομετρία .....	37
4.2.4. Συμβολομετρία Πλήρως Πολωμένων Απεικονίσεων (PolInSAR).....	38
4.2.5. Χρονοσειρές .....	38

4.3.	Βήματα Συμβολομετρίας.....	40
4.3.1.	Προ-επεξεργασία .....	40
4.3.2.	Υπολογισμός διανύσματος βάσης (Baseline estimation) .....	41
4.3.3.	Φασματική Επεξεργασία (Filtering) .....	42
4.3.4.	Συμπροσαρμογή Απεικονίσεων (Coregistration).....	42
4.3.5.	Δημιουργία Διαγράμματος Κροσσών Συμβολής (Συμβολόγραμμα) (Interferogram Generation) .....	43
4.3.6.	Αφαίρεση του όρου της Επίπεδης Γης (Flat earth removal) .....	44
4.3.7.	Φιλτράρισμα του Συμβολογράμματος (Adaptive filtering) .....	45
4.3.8.	Δημιουργία Εικόνας Συνάφειας (Coherence generation).....	45
4.3.9.	Αποκατάσταση της Φάσης (Phase unwrapping).....	46
4.3.10.	Μετατροπή της Φάσης σε Υψόμετρο (Phase to height conversion) .....	46
4.3.11.	Γεωκωδικοποίηση (Geocoding).....	47
4.4.	Εφαρμογές της Συμβολομετρίας.....	48
4.5.	Λογισμικά .....	50
4.6.	Παράγοντες που Επηρεάζουν την Συμβολομετρία.....	51
5.	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	53
5.1.	Δεδομένα.....	53
5.2.	Λογισμικό SARscape - Επεξεργασία .....	55
5.2.1.	Εισαγωγή και Εστίαση (Import & Focusing).....	55
5.2.2.	Περικοπή (Cropping) .....	56
5.2.3.	Διάγραμμα Δικτύου Συνδέσεων (Connection Graph).....	57
5.2.4.	Ροή Συμβολομετρικών Εργασιών (Interferometric Workflow).....	58
5.2.5.	Refinement & Re flattening.....	61
5.2.6.	Πρώτη Αντιστροφή (First Inversion).....	62
5.2.7.	Δεύτερη Αντιστροφή (Second Inversion) .....	64
5.2.8.	Γεωκωδικοποίηση (Geocoding).....	65
5.2.9.	Μετατροπή Raster Αρχείων σε Διανυσματικά (Raster to Shape Conversion) .....	67
5.3.	Αποτελέσματα SARscape.....	67
5.4.	Λογισμικό StaMPS – Επεξεργασία.....	68
5.4.1.	Προετοιμασία Δεδομένων (Data preparation) .....	69
5.4.2.	Παραγωγή Συμβολογραμμάτων (Interferograms Generation) .....	70
5.4.3.	Επεξεργασία Σταθερών Σκεδαστών (PS Processing).....	71
5.4.4.	Επεξεργασία Μικρής Βάσης (Small Baseline Processing) .....	76

5.4.5. Επεξεργασία Συνδυασμού PS και SBAS (Combined Multi temporal InSAR Processing).....	79
5.5. Αποτελέσματα StaMPS.....	81
5.6. Δεδομένα GPS .....	82
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	91
6.1. Ερμηνεία Αποτελεσμάτων .....	91
6.2. Σύγκριση λογισμικών .....	99
6.2.1. Λογισμικό StaMPS .....	101
6.2.2. Λογισμικό SARscape .....	101
6.3. Μελλοντικές Προτάσεις για Μελέτη.....	102
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	103
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	107

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1:Το Ελληνικό τόξο Πηγή: Διάλεξη: Φυσική της Λιθόσφαιρας, Κυρατζή Α. ....	3
Εικόνα 2.2:Βύθιση Αφρικανικής πλάκας στο χώρο του Αιγαίου Πηγή: Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ .....	4
Εικόνα 2.3: Χάρτης σεισμικότητας $M>6$ από -550π.Χ. μέχρι 2014 μ.Χ., Πηγή: Βάση δεδομένων Σεισμολογικού σταθμού Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης .....	5
Εικόνα 2.4: Αιτίες γένεσης σεισμών Πηγή: Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ .....	6
Εικόνα 2.5: Τομή κατάδυσης αφρικανικής πλάκας που προκύπτει από σεισμολογικά δεδομένα Πηγή: Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ .....	6
Εικόνα 2.6: Σεισμοί $M>5$ από -550 π.Χ. μέχρι 2014 μ.Χ. Πηγή: Σεισμολογικός σταθμός Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης .....	7
Εικόνα 2.7: Χρήσεις Γης περιοχής μελέτης Πηγή: Corine Land Cover .....	8
Εικόνα 2.8: Χάρτης προσανατολισμού πρανών περιοχής μελέτης .....	8
Εικόνα 2.9: Χάρτης κλίσεων περιοχής μελέτης.....	9
Εικόνα 2.10: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής μελέτης Πηγή: ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. ....	9
Εικόνα 3.1: Τρόπος λειτουργίας ραντάρ Πηγή: Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada .....	11
Εικόνα 3.2: Διάταξη πειράματος Young Πηγή: Βάρβολης, 2010 .....	13
Εικόνα 3.3: Σχηματισμός συνθετικού ανοίγματος Πηγή: Christian Wolff, 2008 .....	14
Εικόνα 3.4: Γεωμετρία λήψης SAR Πηγή: Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada .....	18
Εικόνα 3.5: Απεικόνιση όπου παρουσιάζεται το φαινόμενο της κηλίδωσης Πηγή: Καραθανάση Β.,2006 .....	24
Εικόνα 3.6: Τρόποι λήψης SAR Πηγή: eoPortal Directory, ESA 2014.....	25
Εικόνα 3.7: Διαπεραστικότητα Πηγή: Sarmap, August 2009 .....	30
Εικόνα 3.8: Αναγνώριση πετρελαιοκηλίδας Πηγή:ESA 2002.....	31
Εικόνα 4.1: Διάγραμμα κροσσών συμβολής Πηγή: Fringe Workshop, ESA, 2005.....	34
Εικόνα 4.2: Πλατφόρμα παραγγελίας δεδομένων Πηγή: Eolisa, 2014.....	41
Εικόνα 4.3: Διάγραμμα αποκατάστασης φάσης Πηγή: Sarmap, August 2009 .....	46
Εικόνα 4.4: Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας Ελβετίας Πηγή: Sarmap, August 2009 .....	49
Εικόνα 4.5: Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας Ελβετίας Πηγή: Peulik volcano, Alaska, 1996-1998, USGS .....	50
Εικόνα 5.1: Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας Κρήτης Πηγή: ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε, 2014 .....	53
Εικόνα 5.1: Απεικονίσεις SAR που παραγγέλθηκαν Πηγή: Eolisa .....	55
Εικόνα 5.3: Διαδικασία εισαγωγής και εστίασης εικόνων.....	56
Εικόνα 5.4: Ακτογραμμή Ελλαδικού Χώρου Πηγή: ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε., 2014 .....	56

Εικόνα 5.5: Διαδικασία περικοπής εικόνων.....	57
Εικόνα 5.6: Διάγραμμα συνδέσεων: Χρόνου-Σχετικής θέσης (αριστερά) και Χρόνου-Γραμμής βάσης (δεξιά).....	58
Εικόνα 5.7: Ροή συμβολομετρικών εργασιών.....	59
Εικόνα 5.8: Συμβολογράμματα που αφαιρέθηκαν. Ασυνέχεια φάσης.....	60
Εικόνα 5.9: Refinement & Reflattening.....	61
Εικόνα 5.10: Επιλεγμένα Σημεία Ελέγχου.....	61
Εικόνα 5.11: Συμβολόγραμμα που αφαιρέθηκε. Phase ramp.....	62
Εικόνα 5.12: Επεξεργασία πρώτης αντιστροφής.....	62
Εικόνα 5.13: Σημεία αναφοράς στην πόλη των Χανίων - SARscape.....	64
Εικόνα 5.14: Επεξεργασία δεύτερης αντιστροφής.....	65
Εικόνα 5.15: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης για ένα σημείο της περιοχής μελέτης-SARscape.....	65
Εικόνα 5.16: Επεξεργασία γεωκωδικοποίησης.....	66
Εικόνα 5.17: Γεωκωδικοποιημένες ταχύτητες παραμόρφωσης.....	66
Εικόνα 5.18: Επεξεργασία Raster to shape conversion.....	67
Εικόνα 5.19: Ταχύτητες παραμόρφωσης Δ. Κρήτης - SARscape.....	68
Εικόνα 5.20: Συμβολογράμματα μετά την αφαίρεση τοπογραφίας και επίδραση της τροχιάς.....	73
Εικόνα 5.21: Σημείο Αναφοράς ταχυτήτων - StaMPS.....	74
Εικόνα 5.22: Ταχύτητες εδαφικής παραμόρφωσης με PS Δυτικής Κρήτης με σημείο αναφοράς στην πόλη των Χανίων - StaMPS.....	75
Εικόνα 5.23: Τυπική απόκλιση ταχυτήτων με PS Δυτικής Κρήτης με σημείο αναφοράς στην πόλη των Χανίων -StaMPS.....	75
Εικόνα 5.24: Χρονοσειρά σημείου ενδιαφέροντος της Δυτικής Κρήτης με σημείο αναφοράς στην πόλη των Χανίων -StaMPS.....	76
Εικόνα 5.25: Διάγραμμα συνδέσεων -StaMPS.....	77
Εικόνα 5.26: Ταχύτητες εδαφικής παραμόρφωσης με SBAS Δυτικής Κρήτης με σημείο αναφοράς στην πόλη των Χανίων – StaMPS.....	78
Εικόνα 5.27: Τυπική απόκλιση ταχυτήτων με SBAS Δυτικής Κρήτης με σημείο αναφοράς στην πόλη των Χανίων -StaMPS.....	78
Εικόνα 5.28: Ταχύτητες παραμόρφωσης Δ. Κρήτης με συνδυασμό μεθόδων PS & SBAS – StaMPS.....	80
Εικόνα 5.29: Τυπική απόκλιση ταχυτήτων με συνδυασμό μεθόδων PS & SBAS Δυτικής Κρήτης με σημείο αναφοράς στην πόλη των Χανίων -StaMPS.....	80
Εικόνα 5.30: Ταχύτητες παραμόρφωσης Δ. Κρήτης - StaMPS.....	81

Εικόνα 5.31: Δίκτυο δορυφόρων NAVSTAR GPS.....	82
Εικόνα 5.32: Προσδιορισμός θέσης με GPS Πηγή: Hurn, 1989 .....	83
Εικόνα 5.33: Θέσεις σταθμών GPS.....	84
Εικόνα 6.1: Ταχύτητες παραμόρφωσης Δ. Κρήτης. Αριστερά: SARscape Δεξιά: StaMPS.....	91
Εικόνα 6.2: Ταχύτητες παραμόρφωσης Δ. Κρήτης με ρήγματα - StaMPS.....	92
Εικόνα 6.3: Ταχύτητες παραμόρφωσης στο νότιο τμήμα της Δ. Κρήτης.....	93
Εικόνα 6.4: Αριστερά: Ανυψωτικές κινήσεις όπως μετρήθηκαν από τις χρονοσειρές συμβολομετρίας. Δεξιά: Θαλάσσιες αναβαθμίδες ένδειξης ανυψωτικών κινήσεων Πηγή: IGME.....	94
Εικόνα 6.5: Ταχύτητες παραμόρφωσης φαραγγιού Σαμαριάς. Αριστερά: SARscape, Δεξιά: StaMPS.....	95
Εικόνα 6.6: Ταχύτητες παραμόρφωσης περιοχής αρχαίας Υρτακίνας .....	96
Εικόνα 6.7: Ταχύτητες παραμόρφωσης και κλίση εδάφους περιοχής αρχαίας Υρτακίνας ...	96
Εικόνα 6.8: Ταχύτητες παραμόρφωσης περιοχής Γάλλου.....	98
Εικόνα 6.9: Ταχύτητες παραμόρφωσης SARscape vs. StaMPS.....	99
Εικόνα 6.10: Ρήγματα στην Δυτική Κρήτη.....	100



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3.1: Γεωμετρία τροχιών δορυφόρου.....	15
Σχήμα 3.2: Σχηματική απεικόνιση αζιμουθιακής χωρικής ανάλυσης Πηγή: SAR-Guidebook, sarmap 2009.....	16
Σχήμα 3.3: Σχηματική απεικόνιση πλάγιας χωρικής ανάλυσης Πηγή: Τμήμα Γεωγραφίας, UCL University.....	17
Σχήμα 3.4: Οριζόντια (H) και κάθετη (V) πόλωση Πηγή: Canada Centre for Remote Sensing.....	21
Σχήμα 3.5: Γεωμετρία σμίκρυνσης Πηγή: Gis wiki, FAU Erlangen-Nürnberg .....	22
Σχήμα 3.6: Γεωμετρία πτύχωσης Πηγή: Natural Resources Canada, 2013.....	22
Σχήμα 3.7: Γεωμετρία σκίασης Πηγή: Raney, 1998 .....	23
Σχήμα 3.8: Το φαινόμενο της κηλίδωσης Πηγή: sarmap,2009.....	24
Σχήμα 3.9: Επεξεργασία πολλών όψεων Πηγή: Canadian Centre for Remote Sensing.....	25
Σχήμα 3.10: Τεχνικές φιλτραρίσματος Πηγή: Canadian Centre for Remote Sensing .....	25
Σχήμα 3.11: Γεωμετρία λειτουργίας Stripmap Πηγή: www.radartutorial.eu .....	26
Σχήμα 3.12: Γεωμετρία λειτουργίας ScanSAR Πηγή: www.radartutorial.eu .....	27
Σχήμα 3.13: Γεωμετρία λειτουργίας Spotlight Πηγή: www.radartutorial.eu .....	28
Σχήμα 3.14: Διπλή αναπήδηση Πηγή: Τομέας Τηλεπισκόπησης, Santa Barbara University..	29
Σχήμα 3.15: Επιφανειακή τραχύτητα.....	29
Σχήμα 4.1: Γεωμετρία λήψης συμβολομετρίας Πηγή: Luzi G., 2010. Ground Based SAR Interferometry: a Novel Tool for Geoscience: Chapter 1 in book "Geoscience and Remote Sensing New Achievements".....	33
Σχήμα 4.2: Γεωμετρία κατά πλάτος συμβολομετρίας Πηγή: Zou Wei-bao, 2009 .....	36
Σχήμα 4.3: Γεωμετρία κατά μήκος συμβολομετρίας Πηγή: Zou Wei-bao, 2009.....	37
Σχήμα 4.4: Δίκτυα συμβολογραφημάτων τεχνικής PS και SBAS Πηγή: sarmap .....	40
Σχήμα 4.5: Διάνυσμα βάσης.....	41
Σχήμα 4.6: Όρος φάσης επίπεδης γης Πηγή: Paul A Rosen, NASA, 2011 .....	44
Σχήμα 5.1: Διαδικασία δεύτερης αποκατάστασης φάσης Πηγή: sarmap, 2013 .....	63
Σχήμα 5.2: Διάγραμμα βημάτων StaMPS.....	69
Σχήμα 5.3: Διάγραμμα συνδυαστικής μεθόδου .....	69
Σχήμα 5.4: Προβολή διανυσμάτων Up, North και East σε διεύθυνση LOS .....	86
Σχήμα 5.5: Διαφορετική συμβολή των οριζόντιων συνιστωσών (north, east) στην καθοδική και στην ανοδική τροχιά. Μπλε: Καθοδική τροχιά Κόκκινο: Ανοδική τροχιά Πηγή: Παπουτσής, 2014 .....	87
Σχήμα 6.1: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένο σημείο στην ζώνη ανύψωσης - SARscape.....	93

Σχήμα 6.2: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένο σημείο στην ζώνη ανύψωσης – StaMPS .....	94
Σχήμα 6.3: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένο σημείο στον οικισμό αρχαίας Υρτακίνας – StaMPS .....	97
Σχήμα 6.4: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένο σημείο στην περιοχή του οικισμού Γάλλου – StaMPS .....	98

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Παράμετροι των βασικών SAR συστημάτων .....	19
Πίνακας 3.2: Φασματικά κανάλια Πηγή: Moreira et al.,2013 .....	20
Πίνακας 4.1 : Χαρακτηριστικές βάσεις για συμβολομετρικές εφαρμογές του ERS-1, Πηγή : Data selection and interferometric baselines (Gens, 2006).....	42
Πίνακας 4.2: Λογισμικά που χρησιμοποιούνται για Συμβολομετρία.....	50
Πίνακας 5.1: Απεικονίσεις SAR που χρησιμοποιήθηκαν .....	54
Πίνακας 5.2: Συμβολογράμματα που αφαιρέθηκαν .....	73
Πίνακας 5.3: Ταχύτητες και τοποθεσία σταθμών GPS Πηγή: Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας, Ε.Μ.Π. ....	85
Πίνακας 5.4: Ταχύτητες και τοποθεσία σταθμών GPS Πηγή: <a href="http://dionysos.survey.ntua.gr/">http://dionysos.survey.ntua.gr/</a> .....	85
Πίνακας 5.5: Ταχύτητες και σφάλματα GPS σε διεύθυνση LOS .....	88
Πίνακας 5.6: GPS vs. SAR.....	89
Πίνακας 6.1: Σύγκριση λογισμικών StaMPS και SARscape .....	100
Πίνακας A1: Στοιχεία σεισμών Δυτικής Κρήτης το χρονικό διάστημα -550-2014 με μέγεθος M>5 .....	108
Πίνακας A.2: Διαφορά διανυσμάτων βάσης με πιθανές εικόνες master Πηγή: Eolisa, ESA	110
Πίνακας A3: Ανεπεξέργαστα δεδομένα GPS για τους σταθμούς XRSO, ANOP, GVDS, TUC2, CHAN, PALA και MURT αντίστοιχα.....	114



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διπλωματική εργασία που ακολουθεί έχει ως αντικείμενο την μελέτη της εδαφικής παραμόρφωσης της Δυτικής Κρήτης, μιας περιοχής με έντονη σεισμική δραστηριότητα λόγω της σύγκλισης Αφρικανικής και Ευρασιατικής πλάκας.

Η ανάπτυξη της διαστημικής τεχνολογίας τα τελευταία είκοσι χρόνια έχει συνεισφέρει στη μελέτη των επιφανειακών μετακινήσεων του φλοιού της Γης και καλύπτει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών της Τηλεπισκόπησης. Σε συνδυασμό με γεωλογικά δεδομένα, η γεωδαιτική πληροφορία που συλλέγεται μπορεί να βοηθήσει στη καλύτερη κατανόηση των φυσικών φαινομένων που επηρεάζουν τις κινήσεις του φλοιού της Γης σε κάποια περιοχή.

Υποστόχοι αυτής της εργασίας είναι:

- ✓ Η μελέτη και εμβάθυνση στη θεωρία της Συμβολομετρίας.
- ✓ Η εξοικείωση με τη χρήση του λογισμικού SARscape.
- ✓ Η εξοικείωση με τη χρήση του λογισμικού StaMPS.
- ✓ Η εξαγωγή ταχυτήτων εδαφικής παραμόρφωσης για την περιοχή της Δυτικής Κρήτης.
- ✓ Ο συνδυασμός αυτών με GPS.
- ✓ Η γεωφυσική ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Στο **δεύτερο** κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στη γεωλογία του Ελλαδικού χώρου και κυρίως της περιοχής μελέτης. Ενδιαφέρει κυρίως το τεκτονικό καθεστώς της Ελλάδας και η σεισμικότητα της Δυτικής Κρήτης που εξετάζεται.

Το **τρίτο** κεφάλαιο αποτελεί μια επισκόπηση της θεωρίας των Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος. Αρχικά, αναφέρεται η γεωμετρία λήψης των SAR απεικονίσεων, οι ιδιότητές τους καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά των αντικειμένων-στόχων. Τέλος, παρουσιάζονται μερικές εφαρμογές αυτών των απεικονίσεων.

Στο **τέταρτο** κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη θεωρία της συμβολομετρίας. Παρουσιάζονται οι αρχές αυτής της τεχνολογίας, οι διάφορες μορφές της, τα βήματα και τέλος οι εφαρμογές της.

Στο **πέμπτο** κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν και αναφέρεται λεπτομερέστερα η επεξεργασία των δεδομένων με αυτά, καθώς και η επεξεργασία για τον συνδυασμό των ταχυτήτων με τα GPS.

Τέλος, κλείνοντας την διπλωματική, στο **έκτο** κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σχολιασμός και ερμηνεία των αποτελεσμάτων και οι προτάσεις για πιθανές μελλοντικές εφαρμογές και μελέτες. Γίνεται λόγος επίσης για σύγκριση μεταξύ των δύο λογισμικών βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων.



## 2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Το παρόν κεφάλαιο έχει σκοπό την λεπτομερή παρουσίαση της υπάρχουσας γεωλογικής κατάστασης του Ελληνικού χώρου. Γίνεται εμβάθυνση στα τεκτονικά και σεισμολογικά χαρακτηριστικά της Ελλάδας και εν συνεχεία στα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, δηλαδή της Δυτική Κρήτης.

### 2.1. Τεκτονική Ανάλυση Ελλαδικού χώρου

Ο Ελληνικός χώρος βρίσκεται στα όρια σύγκλισης της Ευρασιατικής με την Αφρικανική πλάκα. Οι πλάκες κινούνται με σχετική ταχύτητα της τάξης των 2,5 εκατοστών το χρόνο, με αποτέλεσμα την καταβύθιση της Αφρικανικής κάτω από την Ευρασιατική. Ως επακόλουθο παρατηρείται έντονη σεισμικότητα στον Ελληνικό χώρο. Αν και οι τεκτονικές διαδικασίες στην Ελλάδα χρονολογούνται στα δέκα εκατομμύρια χρόνια πριν, το σημερινό γεωτεκτονικό περιβάλλον οφείλεται σε γεωδυναμικές διεργασίες, των τελευταίων δύο εκατομμυρίων ετών και συγκεκριμένα των τελευταίων 700.000-1.000.000 ετών (Λυκούδη, 2005).



Εικόνα 2.1: Το Ελληνικό τόξο Πηγή: Διάλεξη: Φυσική της Λιθόσφαιρας, Κυρατζή Α.

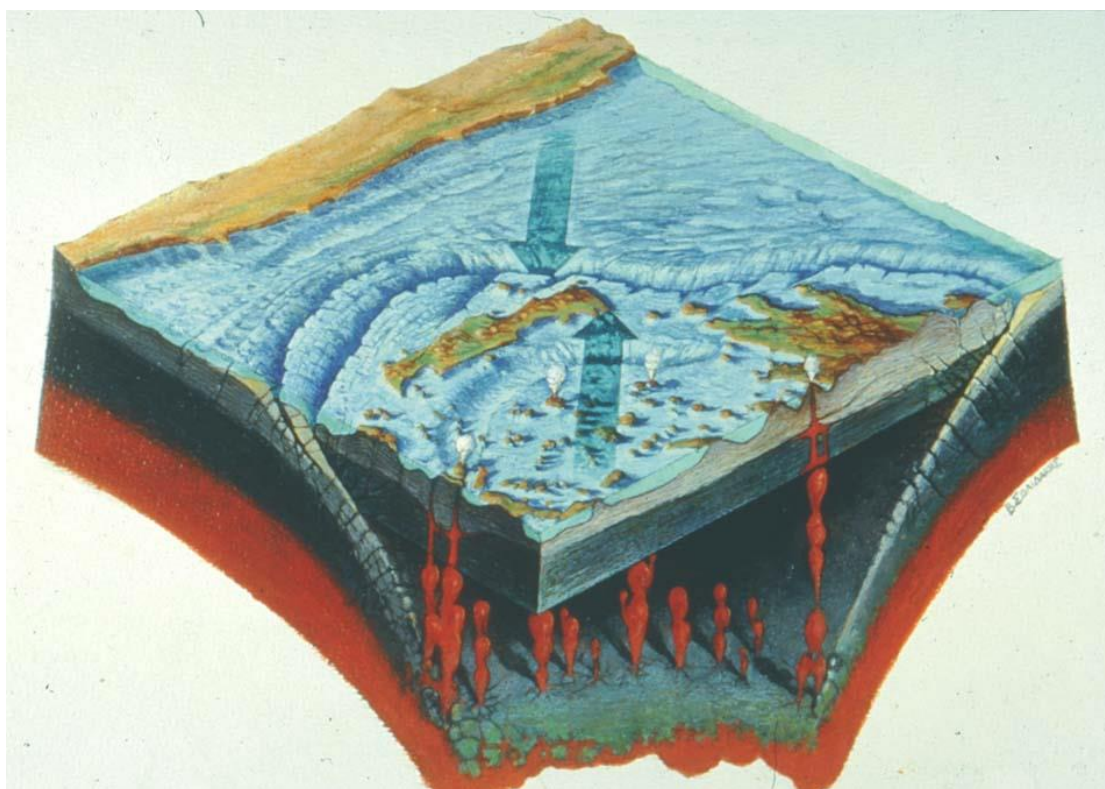
Τα κύρια χαρακτηριστικά της τεκτονικής του Ελλαδικού τόξου (Hellenic arc) είναι: η Ελληνική τάφρος, το Ελληνικό νησιωτικό ιζηματογενές τόξο, η οπισθοτάφρος και το ηφαιστειακό τόξο (εικόνα 2.1).

Η Ελληνική τάφρος (Hellenic trench) δημιουργείται στην επαφή των δύο πλακών (εικόνα 2.2). Αποτελείται από μια σειρά από βαθιές θαλάσσιες λεκάνες (βάθη 2000-5000m) από τη Ρόδο μέχρι την Κεφαλονιά.

Το Ελληνικό νησιωτικό τόξο περιλαμβάνει τα νησιά Ρόδο, Κάρπαθο, Κρήτη και Κύθηρα. Οι συμπιεστικές δυνάμεις των λιθοσφαιρικών πλακών οδήγησαν στη συγκέντρωση ιζημάτων με τριγωνική μορφή (δομή γνωστή ως πρίσμα επαύξεσης).

Οπισθοτάφρος (back-arc basin) καλείται το Κρητικό πέλαγος, δηλαδή μια θαλάσσια λεκάνη μικρότερου βάθους από την τάφρο (έως 2000m). Η λεκάνη αυτή βρίσκεται ανάμεσα στο νησιωτικό και το ηφαιστειακό τόξο.

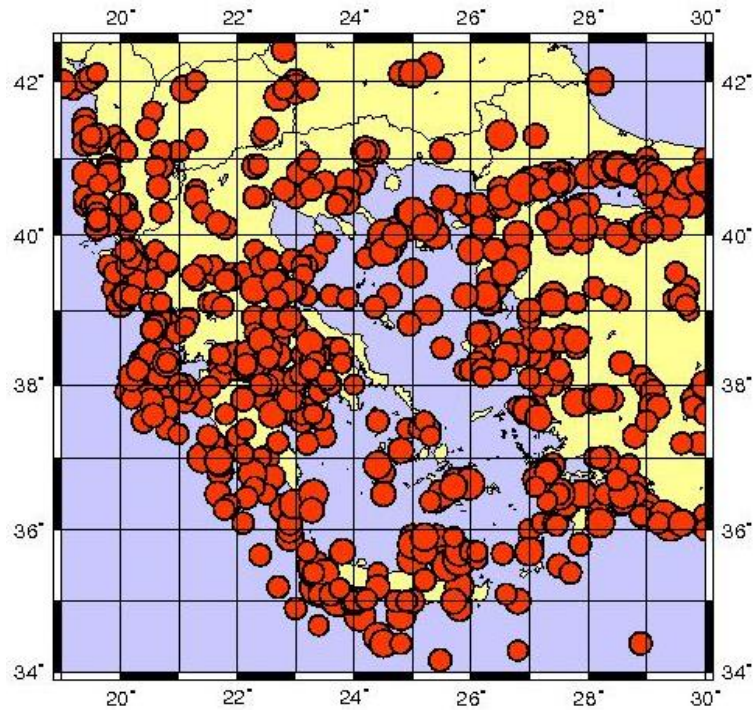
Τέλος, το ηφαιστειακό τόξο βρίσκεται στο εσωτερικό μέρος και περιλαμβάνει τα ηφαίστεια στο Σουσάκι, στα Μέθανα, στη Σαντορίνη, στη Μήλο και στη Νίσυρο. Δημιουργήθηκαν λόγω της ανάτηξης του υλικού της υποβυθιζόμενης Αφρικανικής πλάκας.



Εικόνα 2.2: Βύθιση Αφρικανικής πλάκας στο χώρο του Αιγαίου Πηγή: Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ

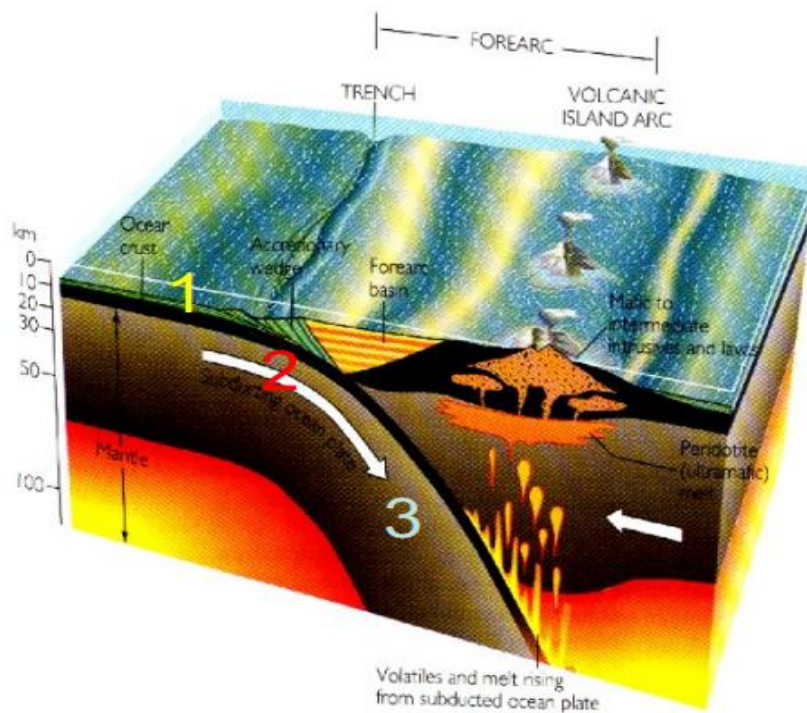
Η Ελλάδα παρουσιάζει έντονη σεισμικότητα. Διαθέτει μέχρι στιγμής 157 διεγνωσμένα ενεργά σεισμικά ρήγματα, που έχουν προκαλέσει συνολικά, μέχρι σήμερα, 570 σειμούς άνω των 6 βαθμών της κλίμακας ρίχτερ. Ο ελληνικός χώρος κατέχει την πρώτη θέση στη Μεσόγειο από άποψη σεισμικότητας και την έκτη θέση σε παγκόσμιο επίπεδο, μετά από χώρες με μεγάλη σεισμικότητα, όπως η Ιαπωνία, οι Νέες Εβρίδες, το Περού, τα νησιά Σολομώντος και η Χιλή. Στην εικόνα 2.3 παρουσιάζεται η γεωγραφική κατανομή των επικέντρων των σειμών που ξεπέρασαν τα 6 ρίχτερ μεταξύ των ετών -550 πΧ και 2014 μΧ. Η πλειοψηφία τους διατάσσεται κατά μήκος της ζώνης Δ. Αλβανία, νησιά Ιονίου πελάγους, Κρήτη, Κάρπαθος, Ρόδος και Ν.Δ. Τουρκία, όπου οι σειμοί είναι επιφανειακοί. Σημαντική σεισμική δραστηριότητα εμφανίζεται στο Β. Αιγαίο και στη Β.Δ. Ανατολία με σειμούς ενδιάμεσου βάθους.





Εικόνα 2.3: Χάρτης σεισμικότητας  $M > 6$  από -550π.Χ. μέχρι 2014 μ.Χ., Πηγή: Βάση δεδομένων Σεισμολογικού σταθμού Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

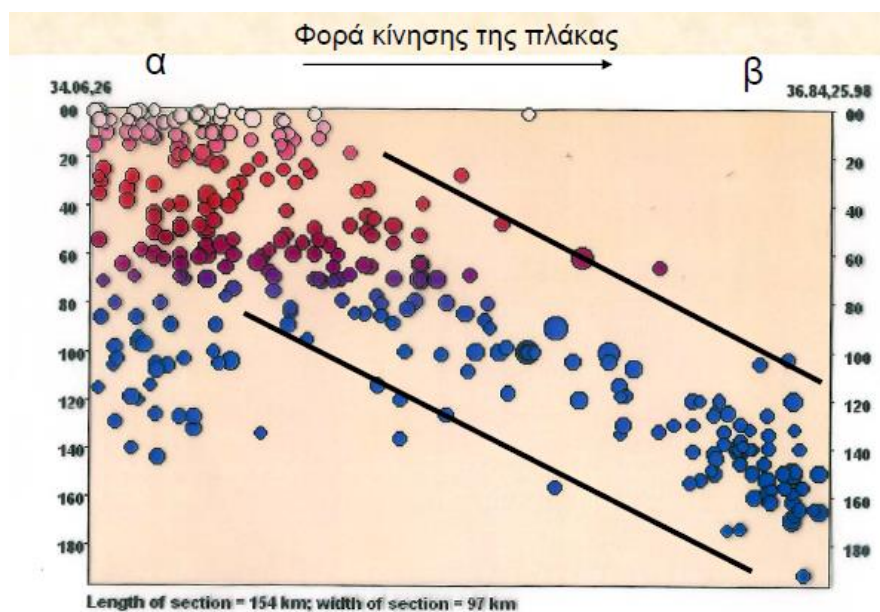
Η σεισμική δραστηριότητα στην πλάκα που καταδύεται είναι αποτέλεσμα τριών διαδικασιών. Στην εικόνα 2.4, στην περιοχή «1», οι σεισμοί γεννιούνται σαν αντίδραση στην κάμψη της λιθόσφαιρας καθώς αυτή αρχίζει να βυθίζεται. Η κύρτωση της πλάκας προς τα κάτω τεντώνει το πάνω μέρος της. Αυτό έχει σαν συνέπεια την δημιουργία κανονικών ρηγμάτων που συνδέονται με τους σεισμούς που συμβαίνουν σε αυτό το τμήμα. Η περιοχή «2» δηλαδή η επαφή μεταξύ της βυθιζόμενης και της υπερκείμενης πλάκας, χαρακτηρίζεται από οριζόντιες συμπιεστικές δυνάμεις και οι σεισμοί εδώ γεννώνται πάνω σε ανάστροφα ρήγματα. Τέλος, στην περιοχή «3», δηλαδή στο βυθισμένο τμήμα της πλάκας, οι σεισμοί που γεννώνται συνδέονται με ανάστροφα ρήγματα. Αυτό συμβαίνει διότι η πλάκα καθώς βυθίζεται παράγεται στο πάνω μέρος της θερμότητα λόγω τριβής που λιώνει σε κάποιο βαθμό το υλικό της και σαν συνέπεια η πυκνότητά του υλικού της πλάκας ελαττώνεται και τείνει να ανέβει.



Εικόνα 2.4: Αιτίες γένεσης σεισμών Πηγή: Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ

## 2.2. Σεισμολογία και Γεωτεκτονικό Περιβάλλον της Κρήτης

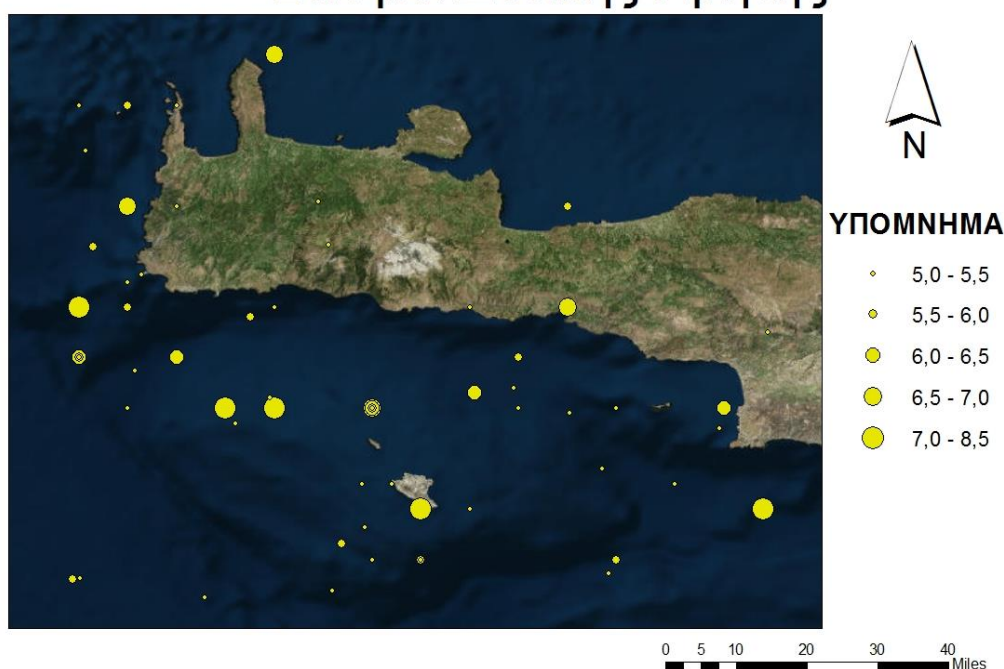
Όπως αναφέρθηκε, στο Νότιο Αιγαίο η σύγκρουση των δύο πλακών γίνεται κοντά στην Κρήτη. Στην εικόνα 2.5 βλέπουμε μία τομή της κατάδυσης της Αφρικανικής πλάκας όπου στο (α) βρίσκεται η Κρήτη και στο (β) το εσωτερικό μέρος του Αιγαίου. Η κατανομή των σεισμών μαρτυρά δομή που φαίνεται να βυθίζεται προς τα βόρεια.



Εικόνα 2.5: Τομή κατάδυσης αφρικανικής πλάκας που προκύπτει από σεισμολογικά δεδομένα Πηγή: Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ

Λόγω της τοποθεσίας της Κρήτης παρατηρείται έντονη σεισμική δραστηριότητα, η οποία για την περιοχή μελέτης φαίνεται στις εικόνες 2.6 και 2.7. Το χρονικό διάστημα -550 έως 2014 στη περιοχή μελέτης συνέβησαν 69 κύριοι σεισμοί με μέγεθος  $M > 5.0$ . Στον πίνακα Α1 του Παραρτήματος παρουσιάζονται τα στοιχεία των κύριων σεισμών το χρονικό διάστημα -550-2014 στη περιοχή της Δυτικής Κρήτης με μέγεθος  $M > 5$ . Στις εικόνες 2.6 παρουσιάζονται οι σεισμοί αυτοί πάνω στο χάρτη της Ελλάδας και της Δυτικής Κρήτης αντίστοιχα.

## Σεισμοί Δυτικής Κρήτης

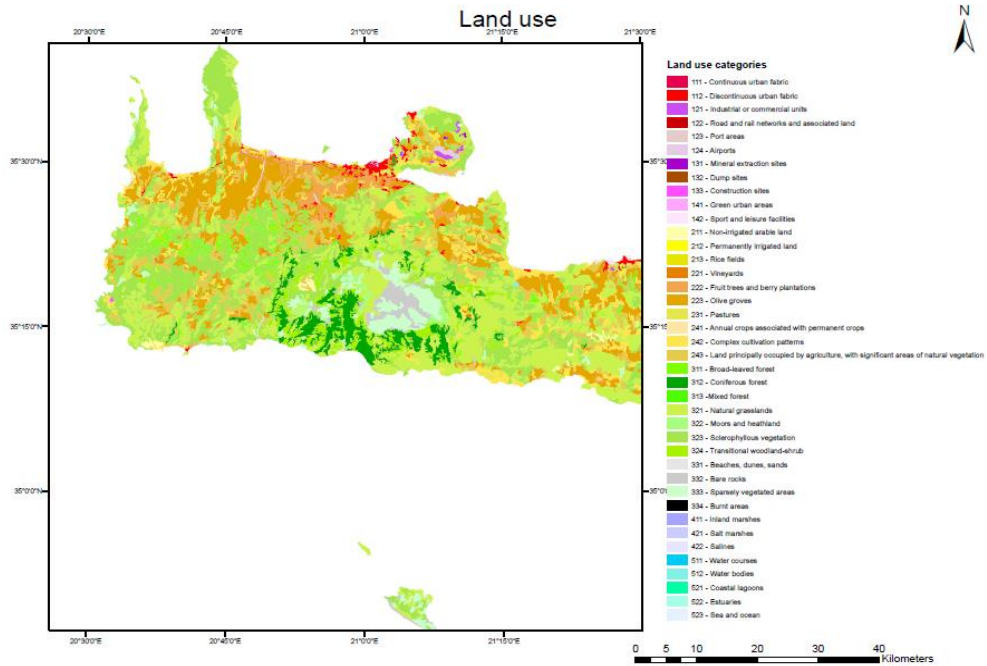


Εικόνα 2.6: Σεισμοί  $M > 5$  από -550 π.Χ. μέχρι 2014 μ.Χ. Πηγή: Σεισμολογικός σταθμός Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

### 2.3.Θεματικοί Χάρτες Περιοχής Μελέτης

Δίνονται μερικοί χάρτες για καλύτερη κατανόηση της περιοχής μελέτης.

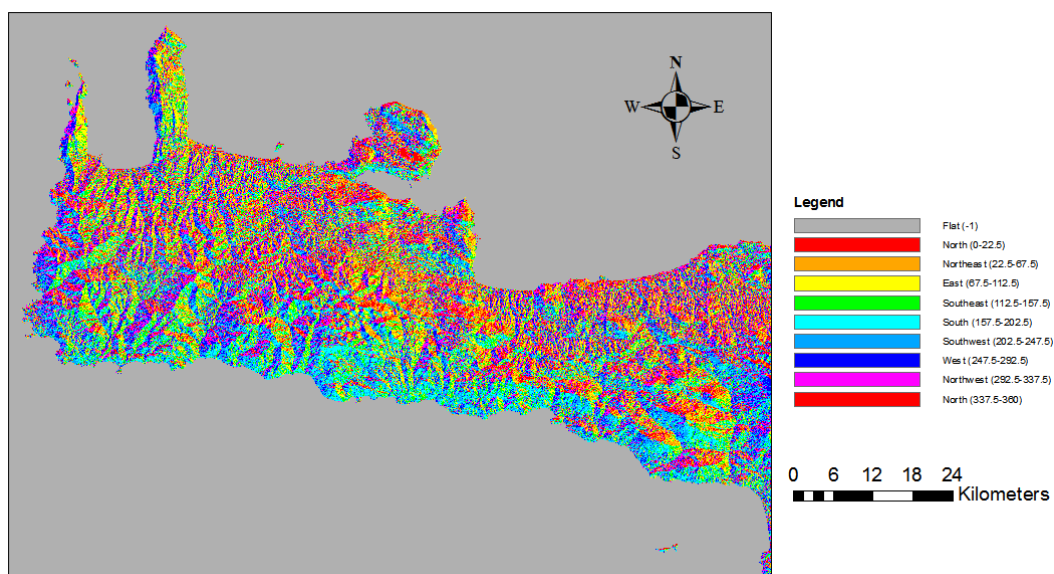
Αρχικά, παραθέτεται ένας χάρτης χρήσεων γης για την περιοχή μελέτης. Εξετάζοντας την μορφολογία της περιοχής διαπιστώνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος είναι ορεινό με κυριότερο ορεινό όγκο την οροσειρά των Λευκών Ορέων. Τα Λευκά Όρη είναι το ψηλότερο βουνό, με μέγιστο υψόμετρο τα 2.453 μέτρα.



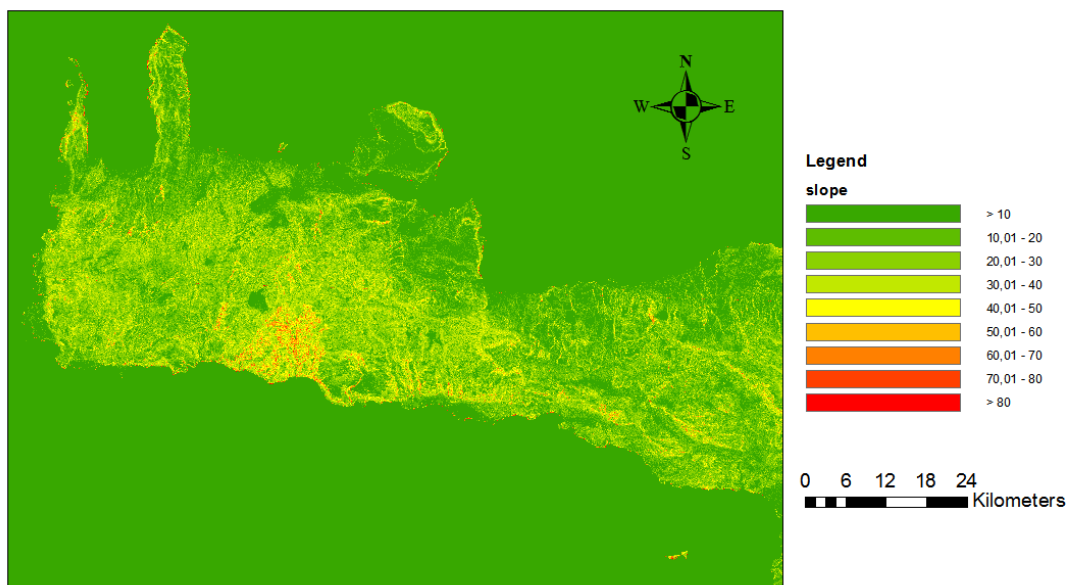
Εικόνα 2.7: Χρήσεις Γης περιοχής μελέτης Πηγή: Corine Land Cover

Από την εικόνα 2.7 παρατηρείται ότι η περιοχή μελέτης έχει ουσιαστικά έναν μεγάλο αστικό ιστό και γι' αυτό χαρακτηρίζεται ένας από τους πιο πυκνοκατοικημένους και πυκνοδομημένους Νομούς του νησιού. Επιπλέον, όμως, υπάρχουν και περιοχές φυσικού κάλλους και πλούτου. Αυξημένες είναι φυσικά και οι καλλιεργούμενες και οι αρδευόμενες εκτάσεις.

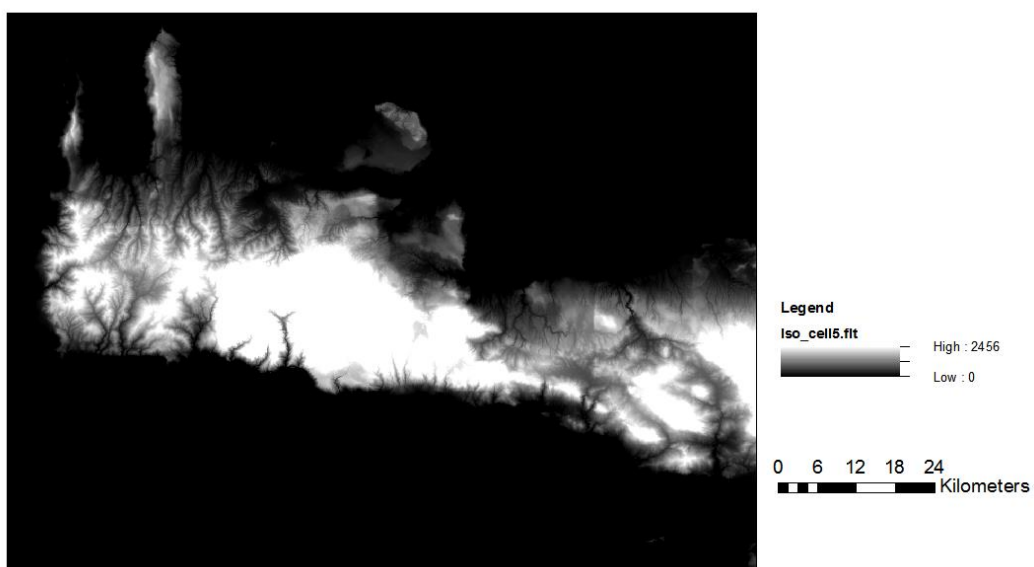
Στη συνέχεια παρατίθενται ένας χάρτης προσανατολισμού πρανών (εικόνα 2.8), ένας χάρτης κλίσης εδάφους (εικόνα 2.9) και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε (εικόνα 2.10).



Εικόνα 2.8: Χάρτης προσανατολισμού πρανών περιοχής μελέτης



Εικόνα 2.9: Χάρτης κλίσεων περιοχής μελέτης



Εικόνα 2.10: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής μελέτης Πηγή: ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.

Ύστερα από μελέτη των παραπάνω χαρτών παρατηρείται ότι οι έντονες κλίσεις των πρανών και τα μεγάλα υψόμετρα βρίσκονται κυρίως στο νότιο κομμάτι της περιοχής μελέτης.



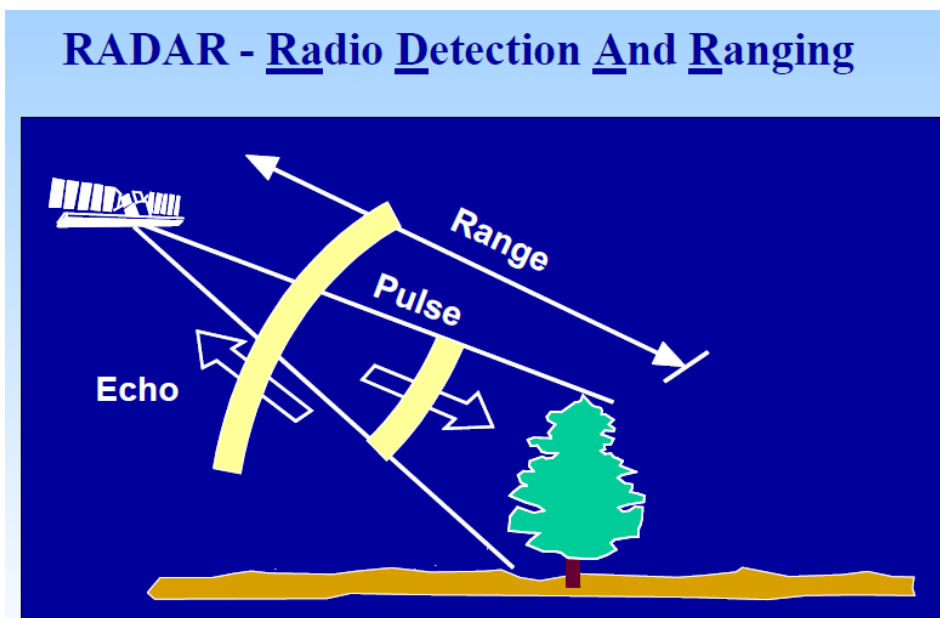
### 3. ΡΑΝΤΑΡ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ (SAR)

Η λέξη ραντάρ RADAR προέρχεται από τις λέξεις Radio Detection and Ranging και σημαίνει ανίχνευση με ηλεκτρομαγνητικά κύματα και μέτρηση αποστάσεως.

#### 3.1.Εισαγωγή στα Συστήματα Ραντάρ

Τα συστήματα ΡΑΝΤΑΡ έχουν τρεις βασικές λειτουργίες (εικόνα 3.1):

- Μεταδίδει ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην περιοχή των μικροκυμάτων προς ένα στόχο
- Λαμβάνει την ποσότητα της μεταδιδόμενης ενέργειας που ανακλάται από κάποιο αντικείμενο
- Καταγράφει τη χρονική καθυστέρηση και \*την ένταση του σήματος που οπισθοσκεδάστηκε. Η χρονική καθυστέρηση βοηθάει στον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ δέκτη και στόχου και η ένταση στην αναγνώριση των διαφορετικών στόχων.



Εικόνα 3.1: Τρόπος λειτουργίας ραντάρ Πηγή: Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada

Συνήθως η κεραία ενός ραντάρ στέλνει και λαμβάνει παλμούς μικροκυμάτων στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα με μήκη κύματος από  $10^4$  mm έως 1 cm, δηλαδή σε φάσμα συχνοτήτων από 300 MHz έως 30 GHz.

Η αρχική ιδέα του ραντάρ αναπτύχθηκε περίπου το 1887 από τον φυσικό Hertz, ο οποίος διαπίστωσε ότι τα ραδιοκύματα ανακλούνται από ορισμένα υλικά, ηλεκτρικά αγωγίμα. Έπειτα έγιναν πολλά πειράματα για την ανάπτυξη συστημάτων ραντάρ που θα ανίχνευαν αντικείμενα στην πορεία διάδοσης των μικροκυμάτων. Ιδιαίτερη ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής υπήρξε κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου για εφαρμογή στον έγκαιρο εντοπισμό εχθρικών αεροσκαφών, σε μεγάλη απόσταση, αρκετά πριν τον οπτικό τους εντοπισμό. Το 1958, επινοήθηκαν στις ΗΠΑ τα πρώτα τρισδιάστατα συστήματα ραντάρ

έρευνας αέρος. Το 1960, κατασκευάστηκε το πρώτο αμερικάνικο ραντάρ συμπίεσης παλμών, το οποίο ήταν ένα εναέριο σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης. Στην περίοδο από το 1970 μέχρι και τις αρχές της δεκαετίας του 1990 δημιουργήθηκαν και δοκιμάστηκαν από πολιτικούς φορείς, π.χ. από το Καναδικό Κέντρο Τηλεπισκόπησης και το Jet Propulsion Laboratory της NASA, τα πρώτα πειραματικά συστήματα SAR, που λειτούργησαν αρχικά σε αεροπλάνα και αργότερα σε δορυφόρους. (Δεληκαράογλου, 2005)

Τα ραντάρ που χρησιμοποιούνται για τηλεπισκοπικές εφαρμογές χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Ραντάρ πλευρικής απεικόνισης (Side-looking Imaging Radars, SIR)
- Αλτιμετρικά ραντάρ (Nadir-looking Radars)
- Ραντάρ διασκορπισμού (Scatterometers)

Επίσης, τα συστήματα ραντάρ μπορούν να χαρακτηριστούν ως:

- Ενεργά, δηλαδή με την ίδια αντένα εκπέμπουν και λαμβάνουν παλμούς ή
- Παθητικά, τα οποία μετρούν τη φυσική ακτινοβολία που εκπέμπεται από διάφορα φυσικά και άλλα αντικείμενα και την ενέργεια ειδικών στόχων από άλλες πηγές

Αυτά που ενδιαφέρουν την συγκεκριμένη μελέτη, λόγω του ότι είναι δυνατή η δυσδιάστατη απεικόνιση, είναι τα ραντάρ πλευρικής απεικόνισης και ιδιαίτερα τα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος.

### **3.2.Εισαγωγή στα Συστήματα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (SAR)**

Τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος έχουν αποκτήσει μεγάλο γεωδαιτικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια τόσο για την παραγωγή μοντέλων εδάφους (DTM – digital terrain model) όσο και για την παρακολούθηση μικρομετακινήσεων της γήινης επιφάνειας.

Τα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος ανήκουν στην κατηγορία των ενεργών ραντάρ, δηλαδή έχουν μια αντένα που εκπέμπει και λαμβάνει τους παλμούς. Το πλεονέκτημα αυτών είναι ότι δεν επηρεάζονται από τον ηλιακό φωτισμό. Έτσι υπάρχει δυνατότητα απεικόνισης ανεξάρτητης της νεφοκάλυψης και των καιρικών συνθηκών αλλά και κατά τη διάρκεια όλου του 24ώρου.

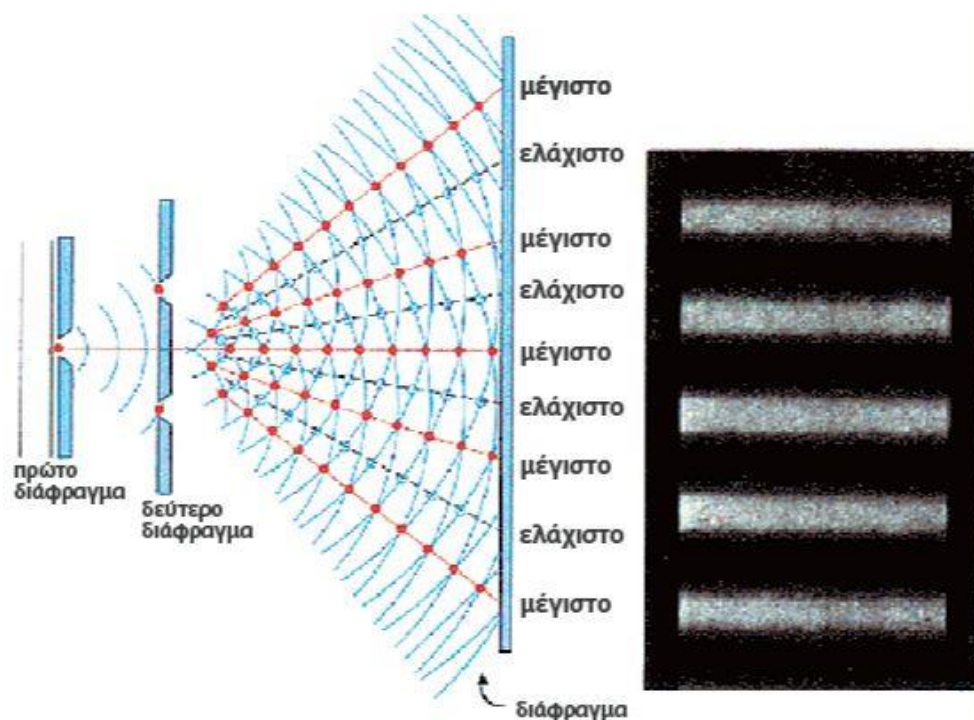
#### **3.2.1. Αρχή Λειτουργίας SAR**

Τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος εφαρμόζουν μια τεχνική η οποία συνθέτει την μέτρηση μιας αντένας μεγάλου μήκους με το συνδυασμό των σημάτων που λαμβάνονται από ένα ραντάρ ενώ αυτό κινείται κατά μήκος της διαδρομής πτήσης του.

Η αρχή της συμβολομετρίας για παραγωγή Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) και ανίχνευση τεκτονικών παραμορφώσεων παρουσιάζεται με το πείραμα των διπλών οπών του Young. Ο **Young** τοποθέτησε μπροστά από μια πηγή μονοχρωματικής ακτινοβολίας ένα πέτασμα με δύο οπές και μπροστά από το πέτασμα αυτό τοποθέτησε άλλο ένα χωρίς οπές (εικόνα 3.2).



Αν υποθεθεί ότι η πηγή βρίσκεται επί του άξονα συμμετρίας των δύο οπών, τότε η ακτινοβολία που περνάει από τις οπές βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία φάσης. Έτσι η ακτινοβολία που προέρχεται από την μια οπή διανύει διαφορετική απόσταση μέχρι την πρόσπτωσή της σε ένα σημείο σε σχέση με την ακτινοβολία που προέρχεται από την δεύτερη οπή. Μόνο πάνω στον άξονα συμμετρίας η απόσταση είναι η ίδια. Τα δύο κύματα αυτά δημιουργούν σε κάθε σημείο μια ένταση που είναι το άθροισμα των εντάσεων των δύο κυμάτων, δηλαδή παρατηρείται διαφορά φάσης. Αλλού δημιουργείται πλήρη συμφωνία φάσης (μέγιστη ένταση) και αλλού πλήρη διαφωνία (μηδενική ένταση). Αυτή η διαδοχή εντάσεων παρουσιάζεται στο δεξί μέρος της εικόνας 3.2.

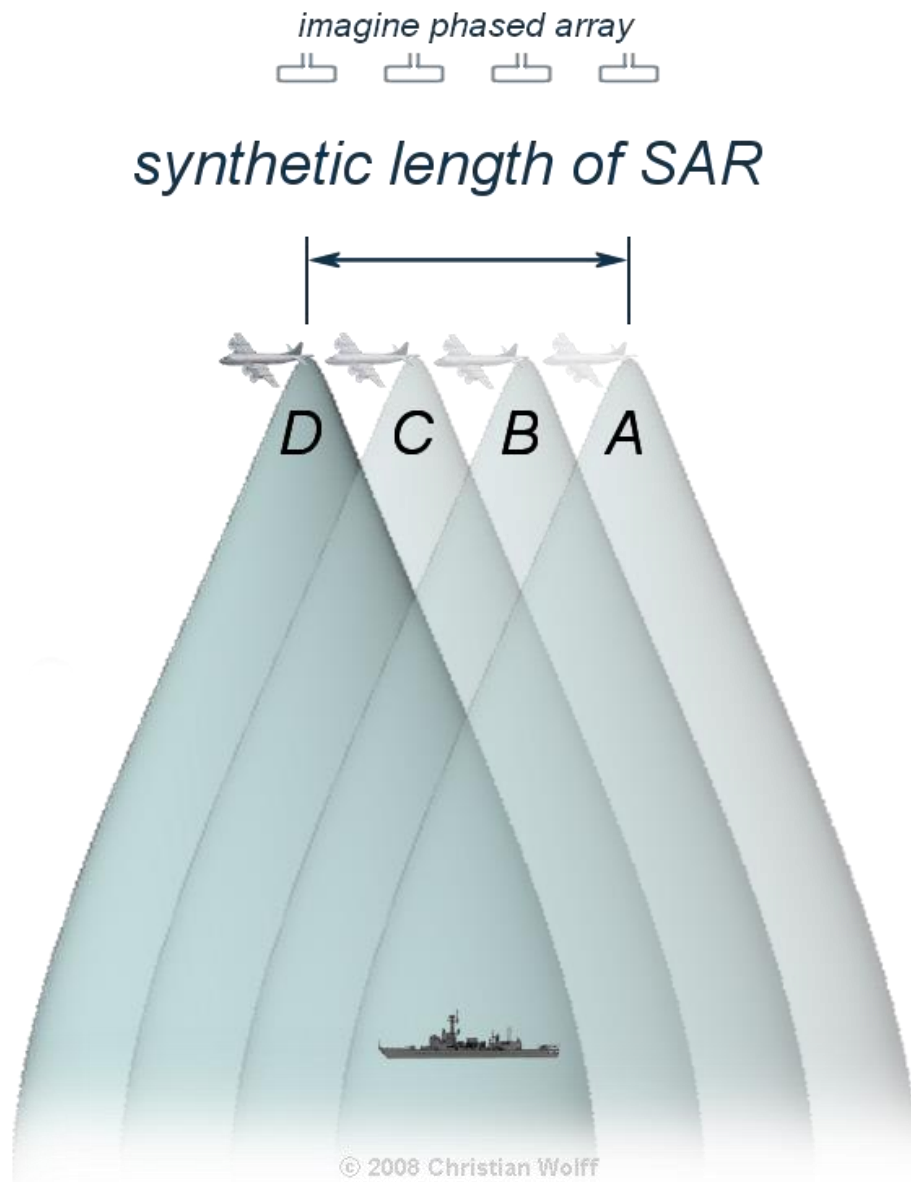


Εικόνα 3.2: Διάταξη πειράματος Young Πηγή: Βάρβολης, 2010

Εάν η οθόνη δεν ήταν επίπεδη, τότε αυτό θα είχε επίδραση στον τρόπο που αλλάζουν οι τιμές της έντασης, άρα και της διαφοράς φάσης. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η ύπαρξη ανάγλυφου μεταβάλλει τη διαφορά απόστασης από τις οπές, άρα και τη διαφορά φάσης. Ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλονται οι φάσεις επί της οθόνης, περιέχει την πληροφορία για αυτό το ανάγλυφο. Αυτή η παρατήρηση αποτελεί και τη βάση της Συμβολομετρίας.

Το σύστημα SAR εκμεταλλεύεται το **φαινόμενο Doppler** του ραντάρ σημάτων που παράγεται από την προς τα εμπρός κίνηση του δορυφόρου για να συνθέσουν μια μεγάλη κεραία. Δηλαδή, οι διαδοχικοί χρόνοι μεταξύ της εκπομπής και της λήψης μεταφράζονται σε διαφορετικές θέσεις της κινούμενης πλατφόρμας. Ένας "συνεκτικός" συνδυασμός των σημάτων που έχουν ληφθεί επιτρέπουν την δημιουργία μια φανταστικής κεραίας με μήκος πολύ μεγαλύτερο απλό το μήκος της φυσικής κεραίας (εικόνα 3.3). Αυτό επιτρέπει υψηλή ανάλυση κατά τη διεύθυνση του αζιμούθιου στην τελική εικόνα παρά την πρακτικά μικρή κεραία. Καθώς κινείται ραντάρ, ένα παλμός μεταδίδεται σε κάθε θέση. Η ηχώ επιστροφής περνά μέσα από το δέκτη και καταγράφεται. Το σύστημα SAR απαιτεί ένα σύνθετο

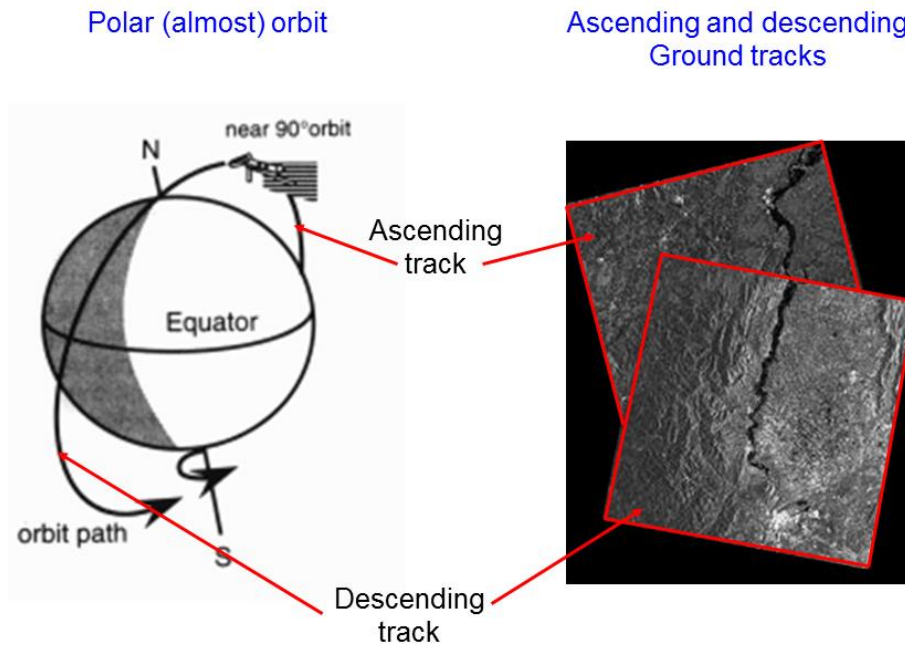
ενσωματωμένο επί του σκάφους σύστημα πλοήγησης και ελέγχου, με ακρίβεια θέσης που παρέχεται από τον εξοπλισμό Doppler και εξοπλισμό αδρανειακής πλοήγησης.



Εικόνα 3.3: Σχηματισμός συνθετικού ανοίγματος Πηγή: Christian Wolff, 2008

Η διαφορά μεταξύ των ραντάρ συνθετικού και πραγματικού ανοίγματος είναι η χωρική διακριτική τους ικανότητα κατά τη διεύθυνση της γραμμής πτήσης. Στα ραντάρ πραγματικού ανοίγματος αυτή προσδιορίζεται από το εύρος δέσμης της κεραίας και είναι ανάλογη της απόστασης μεταξύ δέκτη και στόχου. Τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος χρησιμοποιούν επεξεργασία σήματος για να συνθέσουν ένα άνοιγμα κεραίας το οποίο είναι εκατοντάδες φορές μεγαλύτερο από το πραγματικό άνοιγμα της. Η χωρική διακριτική ικανότητα αυτών των συστημάτων κατά μήκος της γραμμής πτήσης είναι ανεξάρτητη από την απόσταση στόχου και δέκτη (1-2 μέτρα για αερομεταφερόμενα και 5-50 μέτρα για δορυφορικά ραντάρ).

Τέλος, όσον αφορά τη λήψη των απεικονίσεων πρέπει να αναφερθεί ότι οι δορυφόροι που είναι κατάλληλοι για SAR απεικονίσεις πραγματοποιούν **πολικές τροχιές**, δηλαδή περνούν και από τις δύο πολικές περιοχές της Γης, την Αρκτική και την Ανταρκτική. Έτσι το είδος της τροχιάς άρα και της απεικόνισης μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε κατά την καθοδική τροχιά (Βορρά προς Νότο), είτε κατά την ανοδική (Νότο προς Βορρά), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Η διεύθυνση κατά την οποία ένα εικονοληπτικό σύστημα SAR εκπέμπει και λαμβάνει την ακτινοβολία καλείται διεύθυνση παρατήρησης (Look direction ή Line Of Sight - LOS).



Σχήμα 3.1: Γεωμετρία τροχιών δορυφόρου

Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραμόρφωση που ανιχνεύει ένα σύστημα SAR είναι σε κατεύθυνση Line of Sight, δηλαδή στη διεύθυνση που ορίζει η κεραία με το έδαφος.

### 3.2.2. Χωρική Ανάλυση

Τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, επιτρέπουν μεγάλη ανάλυση στη διεύθυνση του αζιμούθιου στην τελική εικόνα παρόλη την μικρή αντένα.

Συγκρίνοντας με τα ραντάρ πραγματικού ανοίγματος, τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος συνθετικά μεγαλώνουν το μήκος της αντένας για να μεγαλώσουν την **ανάλυση κατά τη διεύθυνση του αζιμούθιου**. Η τελική αζιμουθιακή ανάλυση δίνεται μισή από την ανάλυση των πραγματικών ραντάρ όπως φαίνεται παρακάτω στις εξισώσεις και στο σχήμα 3.2:

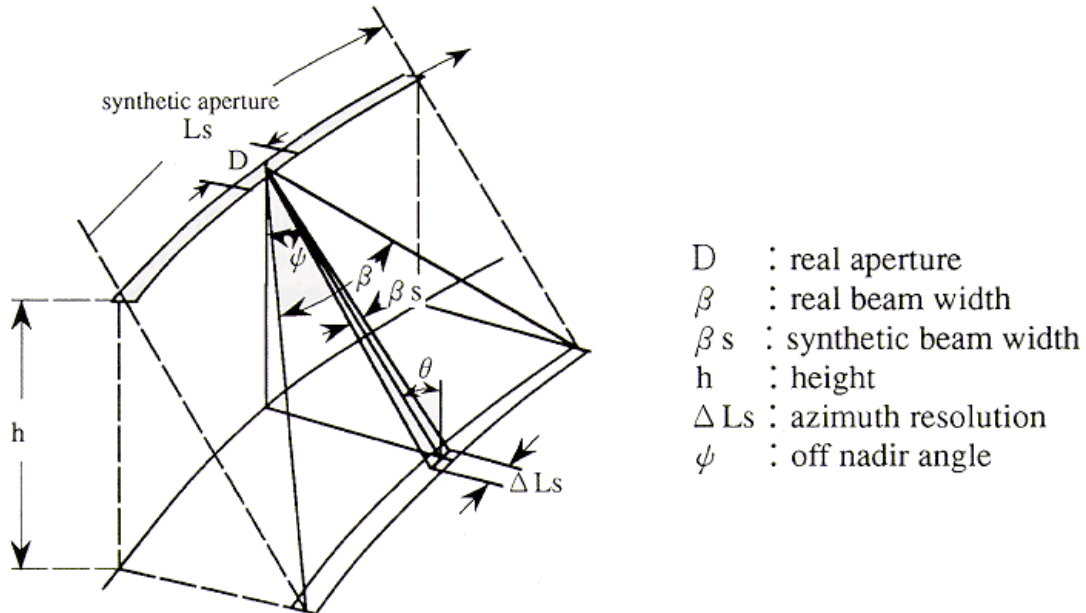
$$\text{Πραγματικό εύρος δέσμης: } \beta = \frac{\lambda}{D}$$

$$\text{Πραγματική διακριτική ικανότητα: } \Delta L = \beta * R = L_s \text{ (μήκος συνθετικού ανοίγματος)}$$

$$\text{Συνθετικό εύρος δέσμης: } \beta_s = \frac{\lambda}{2} * L_s = \frac{D}{2R}$$

$$\text{Συνθετική διακριτική ικανότητα: } \Delta L_s = \beta_s * R = \frac{D}{2}$$

Όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος,  $D$  το μήκος της κεραίας και  $R$  η πλάγια απόσταση στόχου – κεραίας.



Σχήμα 3.2: Σχηματική απεικόνιση αξιμουθιακής χωρικής ανάλυσης Πηγή: SAR-Guidebook, sarmap 2009

Η **χωρική ανάλυση στην πλάγια διεύθυνση** είναι η ικανότητα του ραντάρ να ξεχωρίζει δυο διαφορετικά αντικείμενα που απέχουν κάποια ελάχιστη απόσταση. Αν τα αντικείμενα είναι κατάλληλα διαχωρισμένα, κάθε ένα θα βρίσκεται σε διαφορετικό κελί και θα είναι διακριτό. Αν όχι, η επιστροφή του ραντάρ θα είναι ένας πολύπλοκος συνδυασμός των δυο διαφορετικών επιστροφών ενέργειας των δύο αντικειμένων (σχήμα 3.3).

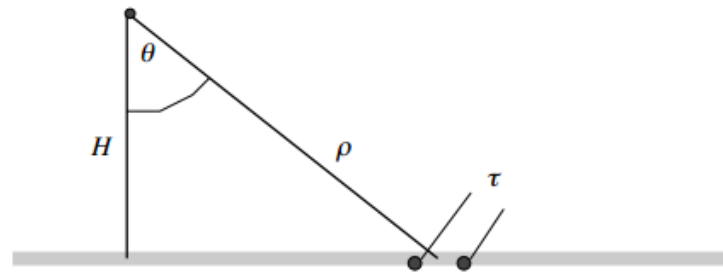
Σημειώνεται ότι η ανάλυση στην πλάγια διεύθυνση είναι άπειρη για την κάθετη γωνία θέασης και βελτιώνεται όσο η γωνία θέασης αυξάνεται. Επίσης είναι ανεξάρτητη από το ύψος του δορυφόρου  $H$ . Η ανάλυση μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση του εύρους ζώνης του ραντάρ. Μικρότερο μήκος κύματος θα επιτρέψει μεγαλύτερο εύρος ζώνης επειδή το εύρος ζώνης είναι μόνο ένα μικρό κλάσμα της φέρουσας συχνότητας.

$$\text{Διακριτική ικανότητα πλάγιας διεύθυνσης: } \Delta r = \frac{c * \tau}{2}$$

$$\text{Διακριτική ικανότητα στην διεύθυνση του εδάφους: } R_r = \frac{c\tau}{2 \sin \theta}$$

Όπου  $C$  η ταχύτητα του φωτός,  $\theta$  η γωνία θέασης και  $\tau$  ο χρόνος του παλμού

### Range Resolution (end view)

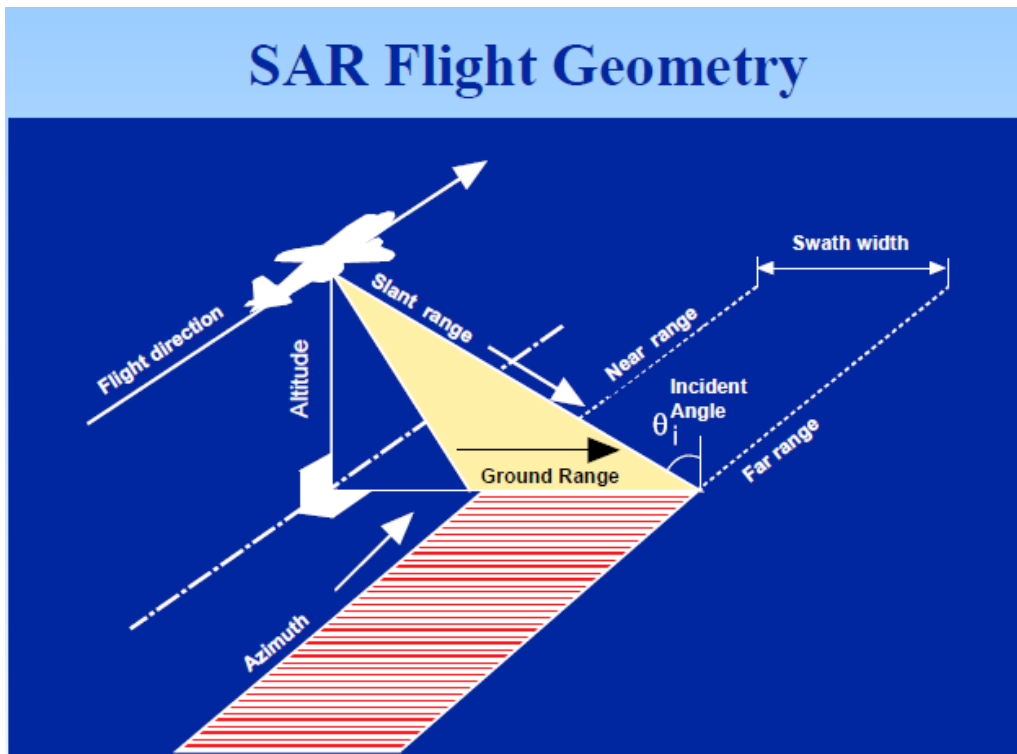


$\theta$	-	look angle
$H$	-	spacecraft height
$B$	-	bandwidth of radar
$\tau$	-	pulse length $1/B$

Σχήμα 3.3: Σχηματική απεικόνιση πλάγιας χωρικής ανάλυσης Πηγή: Τμήμα Γεωγραφίας, UCL University

### 3.3.Γεωμετρία Λήψης Απεικόνισης SAR

Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η γεωμετρία λήψης ενός συστήματος SAR. Το σύστημα αυτό κινείται πάνω στη γραμμή πτήσης, δηλαδή στη διεύθυνση του αζιμουθίου. Η εδαφική απόσταση (Ground Range) είναι η κάθετη απόσταση από την τροχιά του εδάφους σε ένα δεδομένο αντικείμενο στη γης επιφάνεια. Το πλάτος λωρίδας (swath width) εκφράζει την έκταση της σκηνής ραντάρ πάνω στο έδαφος. Η πλάγια απόσταση (slant range) είναι το μήκος μεταξύ του δορυφόρου και του αντικειμένου-στόχου. Γωνία πρόσπτωσης (Incidence angle) ονομάζεται η γωνία που ορίζεται από την δέσμη του ραντάρ και την κάθετη προς την επιφάνεια του αντικειμένου-στόχου. Η γωνία αυτή μεγαλώνει όσο απομακρυνόμαστε από το ίχνος της τροχιάς. Η εγγύς πλάγια απόσταση (near range) αναφέρεται στο σημείο της εικόνας ραντάρ που βρίσκεται πιο κοντά στην τροχιά του δορυφόρου. Αντίθετα, η απώτερη πλάγια απόσταση (far range) ονομάζεται το σημείο της εικόνας που βρίσκεται πιο μακριά από το ίχνος της τροχιάς (nadir track). Τέλος, γωνία θέασης (Look angle) καλείται η γωνία μεταξύ της δέσμης και του κατακορύφου επιπέδου στο σημείο της κεραίας.



Εικόνα 3.4: Γεωμετρία λήψης SAR Πηγή: Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada

Για κάθε εφαρμογή, η γεωμετρία λήψης που μας εξυπηρετεί είναι διαφορετική ανάλογα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις της. Για το λόγο αυτό υπάρχουν πολλές διαφορετικές πλατφόρμες για SAR απεικονίσεις που φαίνονται στον πίνακα 3.1.

Αισθητήρας	Χρόνος Λειτουργίας	Τρόπος λήψης	Κανάλι (Συχνότητα)	Χωρική ανάλυση (μέτρα)	Ινστιτούτο
ERS-1/2	1991-2000/1995-2011	Stripmap	C (VV)	25	European Space Agency
J-ERS-1	1992-1998	Stripmap	L (HH)	44	Japan Aerospace Exploration Agency
Radarsat 1	1995-σήμερα	Stripmap	X (quad)	24	Canada Space Agency
Envisat ASAR	2002-2012	Stripmap, ScanSAR	C (dual)	35	European Space Agency
ALOS PALSAR	2006-2011	Stripmap, ScanSAR	L (quad)	44	Japan Aerospace Exploration Agency

TerraSAR-X	2007-σήμερα	Stripmap, ScanSAR, Spotlight	X (quad)	11	Infoterra, Germany
Radarsat 2	2007-σήμερα	Stripmap, ScanSAR	C (quad)	24	Canada Space Agency
COSMO- SkyMed	2007-2010	Stripmap, ScanSAR, Spotlight	X (quad)	15	ASI, Italia
RISAT	2012-σήμερα	Stripmap, ScanSAR, Spotlight	C (quad)	25	Indian Space Agency
ALOS 2	2014	Stripmap, ScanSAR, Spotlight	X (dual)		Japan Aerospace Exploration Agency
Sentinel 1A	2014	Stripmap, ScanSAR (TOPSAR)	C	25	European Space Agency

Πίνακας 3.1: Παράμετροι των βασικών SAR συστημάτων

Κάθε αισθητήρας είναι κατάλληλος για διαφορετικού είδους εφαρμογές ανάλογα με το μήκος κύματος που εκπέμπει. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες ERS, Radarsat και Envisat μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή χαρτών υγρασίας εδάφους ενώ ο αισθητήρας TerraSAR-X για αναγνώριση τεχνητών στόχων στην επιφάνεια της Γης.

### 3.3.1. Παράμετροι που Επηρεάζουν τις Απεικονίσεις SAR

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα συστήματα ραντάρ μεταδίδουν και λαμβάνουν ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς. Το σήμα που επιστρέφει, δίνει πληροφορίες για το πλάτος και τη φάση του σήματος. Γενικά, οι απεικονίσεις ραντάρ είναι μια εικόνα δύο διαστάσεων όπου κάθε εικονοστοιχείο αντιπροσωπεύεται από ένα μιγαδικό αριθμό με τιμές από 0 έως 255. Η SAR απεικόνιση που τα εικονοστοιχεία είναι μιγαδικοί αριθμοί είναι γνωστή ως single look complex – SLC. Το πραγματικό (Re) και το φανταστικό (Im) μέρος του μιγαδικού αριθμού μας δίνουν το πλάτος (Amplitude) και τη φάση (Phase). Οι εικόνες SAR, καταχρηστικά θεωρούνται «εικόνες», εφόσον περιέχεται σε αυτές και η φάση. Υπάρχει η δυνατότητα να εμφανιστεί αποκλειστικά μόνο η ανακλαστικότητα και αυτές οι εικόνες ονομάζονται εικόνες «εύρους» (amplitude).

Το **πλάτος** είναι το μέτρο της ισχύς του σήματος και κυρίως της έντασης ή το ύψος ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που αναλύονται παρακάτω. Δίνεται από τον τύπο:

$$Amplitude = \sqrt{Im^2 + Re^2}$$

Η **φάση** είναι μία ιδιότητα ενός περιοδικού φαινομένου που αναφέρεται στο σημείο εκκίνησης σε σχέση με ένα αυθαίρετο σημείο προέλευσης. Σε τηλεπισκοπικά ραντάρ, η έννοια της φάσης συνήθως αναφέρεται στην ταλάντωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο και είναι ένα άθροισμα όλων των φάσεων των

σκεδαστών που βρίσκονται μέσα σε αυτό. Η τιμή της δεν έχει ιδιαίτερη σημασία από μόνη της αλλά όταν άνω των δύο απεικονίσεων συνδυάζονται μεταξύ τους. Δίνεται από τον τύπο:

$$phase = \tan^{-1} (Im/Re)$$

Γενικά, η οπισθοσκέδαση των ραντάρ εξαρτάται από διάφορους παράγοντες:

- 1) **Μήκος κύματος ραντάρ.** Το μήκος κύματος του σήματος μπορεί να κυμαίνεται από 0,3cm μέχρι 2m. Οι μπάντες που χρησιμοποιούνται κυρίως για SAR απεικονίσεις είναι οι L, C και X. Αναλόγως την εφαρμογή της απεικόνισης επιλέγεται το κατάλληλο φασματικό κανάλι. Το κάθε φασματικό κανάλι αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη συχνότητα και μήκος κύματος (πίνακας 3.2).

Κανάλι	Συχνότητα (GHz)	Μήκος κύματος (cm)	Εφαρμογή
Ka	26.5-40	0.75-1.18	Υψηλής ακρίβειας απεικονίσεις
K	18-26.5	1.18-1.67	Αστρονομικές παρατηρήσεις (Δεν χρησιμοποιείται πολύ σήμερα)
Ku	12.5-18	1.67-2.40	Παρακολούθηση χιονισμένων περιοχών
X	8-12.5	2.40-3.75	Παρακολούθηση χιονισμένων περιοχών/ Υψηλής ακρίβειας απεικονίσεις/ Μικρομετακινήσεις πάγων
C	4-8	3.75-7.5	Μικρομετακινήσεις πάγων
S	2-4	7.5-15	Μικρομετακινήσεις πάγων/ραντάρ καιρού
L	1-2	15-30	Δασικές εφαρμογές/ στρατιωτική τηλεμετρία
UHF	0.3-1	30-100	Παρακολούθηση στόχων
P	0.28-0.39	77-107	Δασικές εφαρμογές
VHF	0.03-0.30	100-10000	

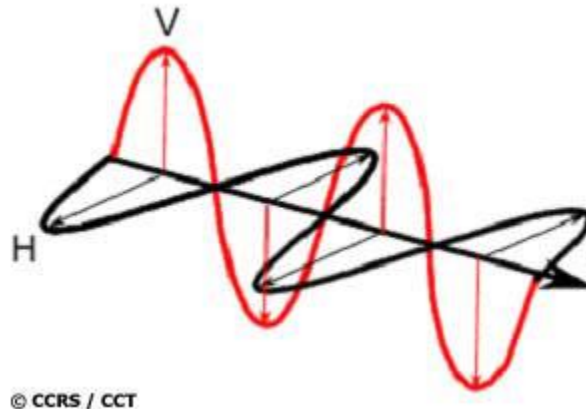
Πίνακας 3.2: Φασματικά κανάλια Πηγή: *Moreira et al., 2013*

- 2) **Χαρακτηριστικά αντικειμένων-στόχων.** Αυτά είναι οι διηλεκτρικές ιδιότητες των σκεδαστών, το σχήμα τους, η επιφανειακή τραχύτητα και η διαπεραστικότητα τους και αναλύονται στο κεφάλαιο 3.5.
- 3) **Πόλωση** των παλμών του σήματος. Όταν αναφερόμαστε σε μικροκυματική ακτινοβολία, είναι σημαντική η πόλωσή της. Η πόλωση αναφέρεται στον προσανατολισμό του ηλεκτρικού πεδίου. Τα περισσότερα ραντάρ έχουν σχεδιαστεί για τη μετάδοση της ακτινοβολίας είτε οριζόντια (H) είτε κάθετα (V) πολωμένα (σχήμα 3.4). Η κεραία του ραντάρ λαμβάνει την επιστρεφόμενη ενέργεια είτε οριζόντια είτε κάθετα πολωμένη ή μερικά λαμβάνουν και τα δύο. Έτσι υπάρχουν οι εξής συνδυασμοί:



- HH: για οριζόντια μετάδοση και οριζόντια λήψη
- VV: για κάθετη μετάδοση και κάθετη λήψη
- HV: για οριζόντια μετάδοση και κάθετη λήψη
- VH: για κάθετη μετάδοση και οριζόντια λήψη

Τα δύο πρώτα αναφέρονται ως όμοια-πολωμένοι συνδυασμοί, αφού λαμβάνουν και στέλνουν πολώσεις με τον ίδιο προσανατολισμό, και τα δύο τελευταία ως αντίθετα-πολωμένοι.



Σχήμα 3.4: Οριζόντια (H) και κάθετη (V) πόλωση Πηγή: Canada Centre for Remote Sensing

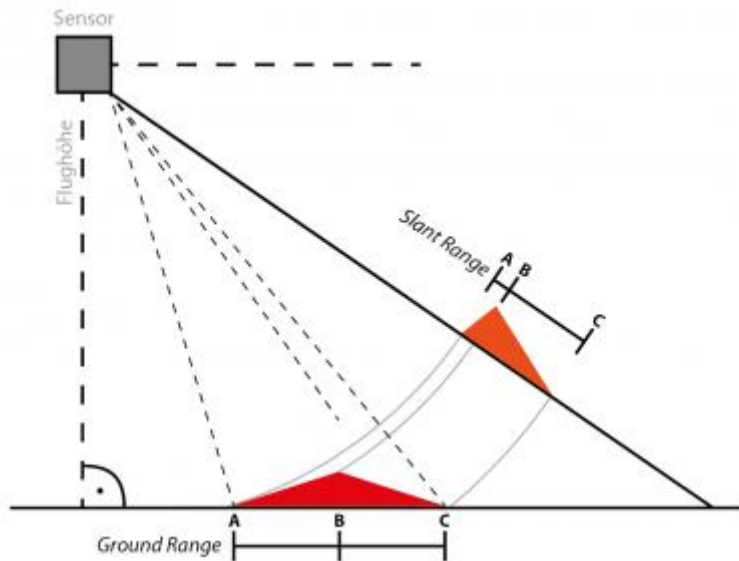
- 4) **Τοπική γωνία πρόσπτωσης.** Τέλος, εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης της δέσμης του ραντάρ στο κάθε αντικείμενο. Όταν η γωνία αυτή είναι μικρή, το επιστρεφόμενο σήμα είναι ισχυρό και επομένως εμφανίζονται πιο ανοιχτοί τόνοι.

### 3.3.2. Παραμορφώσεις SAR Απεικονίσεων

Λόγω της πλευρικής γεωμετρίας λήψης των SAR απεικονίσεων εμφανίζονται μερικές παραμορφώσεις. Σε επίπεδη επιφάνεια δεν παρατηρούνται προβλήματα. Σε επιφάνειες με έντονο ανάγλυφο (βουνά, δέντρα κλπ.) υπάρχουν περιπτώσεις μη ορθής απεικόνισης όλων των σημείων. Οι παραμορφώσεις αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι το ραντάρ μετρά κεκλιμένες αποστάσεις και γι' αυτό υπάρχουν διαφορετικές κλίμακες μέσα στην εικόνα που εξαρτώνται από την απόσταση του κάθε σημείου από το ίχνος της τροχιάς του δορυφόρου. Όσο πιο κοντά βρίσκεται ένα σημείο στο ίχνος αυτό, τόσο πιο συμπιεσμένο φαίνεται σε σύγκριση με τα σημεία των μακρινών αποστάσεων. Όλες οι παρακάτω παραμορφώσεις μπορούν να διορθωθούν εν μέρει με τη χρήση ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

#### Σμίκρυνση (Foreshortening)

Η Σμίκρυνση (foreshortening) σε μια εικόνα ραντάρ προκαλεί τη συμπίεση της εικόνας σε διεύθυνση εγκάρσια στο ίχνος της τροχιάς του δορυφόρου (σχήμα 3.5). Αυτό οδηγεί οπτικά στο να φαίνονται ίσες επιφάνειες ως άνισες στο επίπεδο των κεκλιμένων αποστάσεων (slant-range).



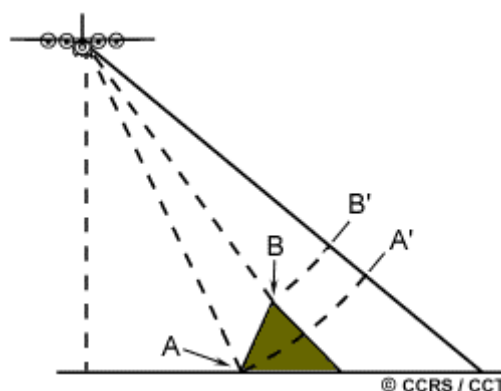
Σχήμα 3.5: Γεωμετρία σμίκρυνσης Πηγή: Gis wiki, FAU Erlangen-Nürnberg

Το φαινόμενο της σμίκρυνσης γίνεται μέγιστο όταν μια απότομη πλαγιά είναι κάθετη στη δέση του ραντάρ. Σε αυτήν την περίπτωση, η γωνία πρόσπτωσης είναι μηδέν και έτσι η βάση και η κορυφή της πλαγιάς απεικονίζονται στο ίδιο σημείο και καταλαμβάνουν την ίδια θέση στην εικόνα.

Όσο αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης, τόσο μειώνεται το φαινόμενο της σμίκρυνσης. Όταν αυτή πλησιάζει τις 90 μοίρες, τότε το φαινόμενο εξαλείφεται αλλά εμφανίζεται το πρόβλημα της σκίασης που αναλύεται παρακάτω. Έτσι, για την επιλογή της κατάλληλης γωνίας πρόσπτωσης πρέπει να γίνει μια εξισορρόπηση μεταξύ των δύο φαινομένων.

### Πτύχωση (Layover)

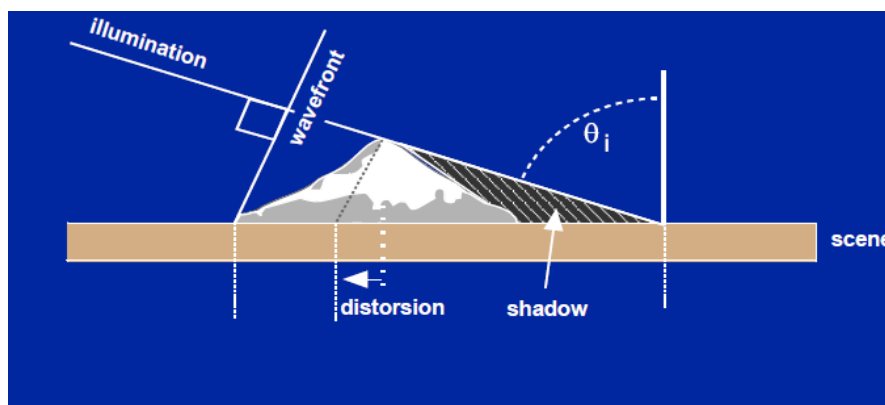
Το φαινόμενο της πτύχωσης συμβαίνει όταν η ανακλώμενη ενέργεια από το ψηλότερο σημείο ενός αντικειμένου λαμβάνεται πριν την επιστροφή από το χαμηλότερο σημείο του αντικειμένου. Έτσι, το αντικείμενο αυτό εμφανίζεται ανεστραμμένο. Θα μπορούσε να είναι η ακραία περίπτωση της σμίκρυνσης (σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6: Γεωμετρία πτύχωσης Πηγή: Natural Resources Canada, 2013

## Σκίαση (Shadow)

Το φαινόμενο της σκίασης παρατηρείται σε σημεία στα οποία δεν υπάρχει σήμα επιστροφής από το ραντάρ, δηλαδή δεν φωτίζονται από αυτό. Συνήθως το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε πλαγιές βουνών με μεγάλες κλίσεις και έχουν προσανατολισμό αντίθετο από την κατεύθυνση λήψης του δορυφόρου (σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7: Γεωμετρία σκίασης Πηγή: Raney, 1998

Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία θέασης, τόσο εντονότερο γίνεται το φαινόμενο.

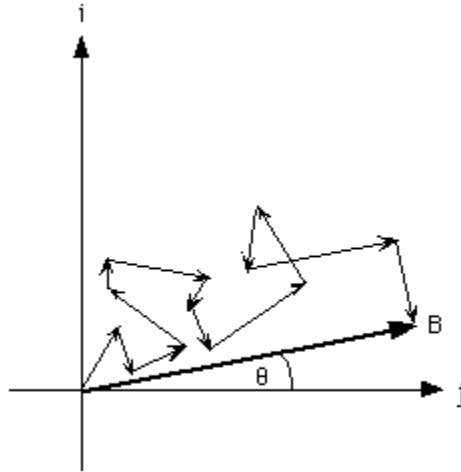
Πολλές φορές, η σκίαση βοηθάει στην κατανόηση της κατεύθυνσης του φωτισμού του ραντάρ καθώς επίσης και στη λήψη μερικών πληροφοριών για τη σκηνή, όπως το ύψος μερικών αντικειμένων.

### 3.4.Ιδιότητες Απεικονίσεων SAR

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται μερικές ιδιότητες των απεικονίσεων SAR, η κηλίδωση των εικόνων καθώς και οι διαφορετικοί τρόποι που οι αισθητήρες του δορυφόρου συλλέγουν πληροφορία.

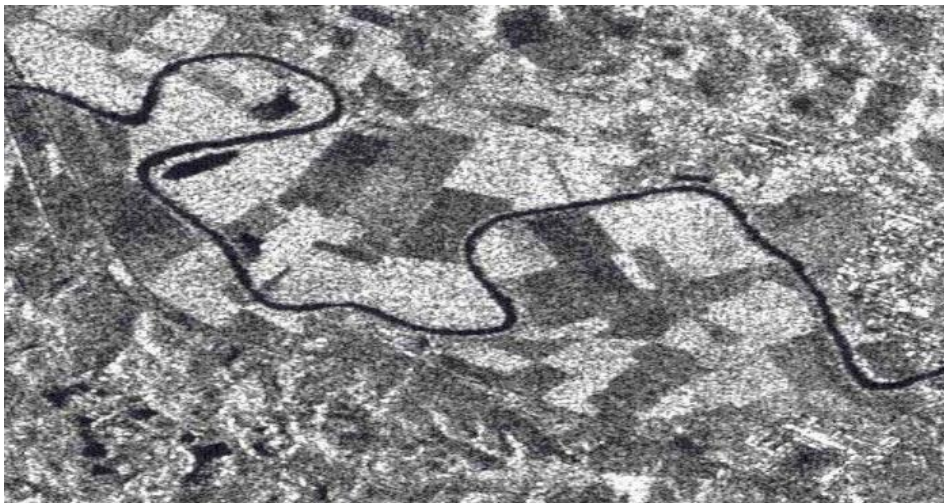
#### 3.4.1. Κηλίδωση (Speckle)

Το φαινόμενο της κηλίδωσης μπορεί να χαρακτηριστεί κάτι σαν θόρυβος στις εικόνες SAR. Αυτό οφείλεται στην πολλαπλή σκέδαση των στοιχειωδών σκεδαστών που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους (σχήμα 3.8). Ουσιαστικά, ανάμεσα σε γειτονικά εικονοστοιχεία εμφανίζονται μεγάλες μεταβολές του τόνου του γκρι (εικόνα 3.5). Αυτό σημαίνει ότι αν σε ένα εικονοστοιχείο υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί σταθεροί σκεδαστές τότε το επιστρεφόμενο σήμα είναι ένα άθροισμα των συνεισφορών όλων αυτών των σκεδαστών.



Σχήμα 3.8: Το φαινόμενο της κηλίδωσης Πηγή: *sartar,2009*

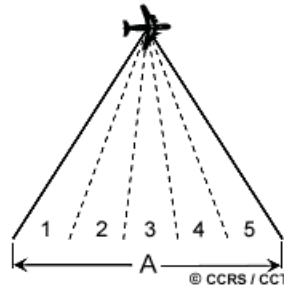
Το φαινόμενο της κηλίδωσης είναι πιο έντονο όσο αυξάνεται ο αριθμός των σκεδαστών μέσα σε ένα εικονοστοιχείο, δηλαδή απεικονίζεται μεγαλύτερη επιφάνεια του εδάφους μέσα σε αυτό.



Εικόνα 3.5: Απεικόνιση όπου παρουσιάζεται το φαινόμενο της κηλίδωσης Πηγή: *Καραθανάση Β.,2006*

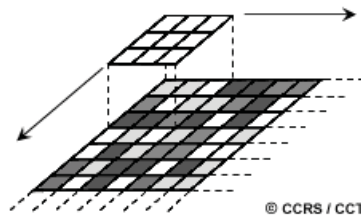
Όπως είναι λογικό, η κηλίδωση μειώνει την ποιότητα της απεικόνισης, γι' αυτό και επιδιώκουμε την μείωσή αυτού του φαινομένου. Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται με δύο τρόπους

- 1) Επεξεργασία πολλών όψεων (multi-look). Στην επεξεργασία αυτή, το εύρος δέσμης χωρίζεται σε περισσότερες ζώνες με μικρότερο εύρος και έτσι δημιουργούνται ανεξάρτητες απεικονίσεις. Κάθε μια ονομάζεται look. Το μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι αν έχουμε  $N$  απεικονίσεις για την ίδια περιοχή με μειωμένη κηλίδωση, η διαχωριστική ικανότητα της κάθε μίας είναι  $N$  φορές μειωμένη (σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9: Επεξεργασία πολλών όψεων Πηγή: Canadian Centre for Remote Sensing

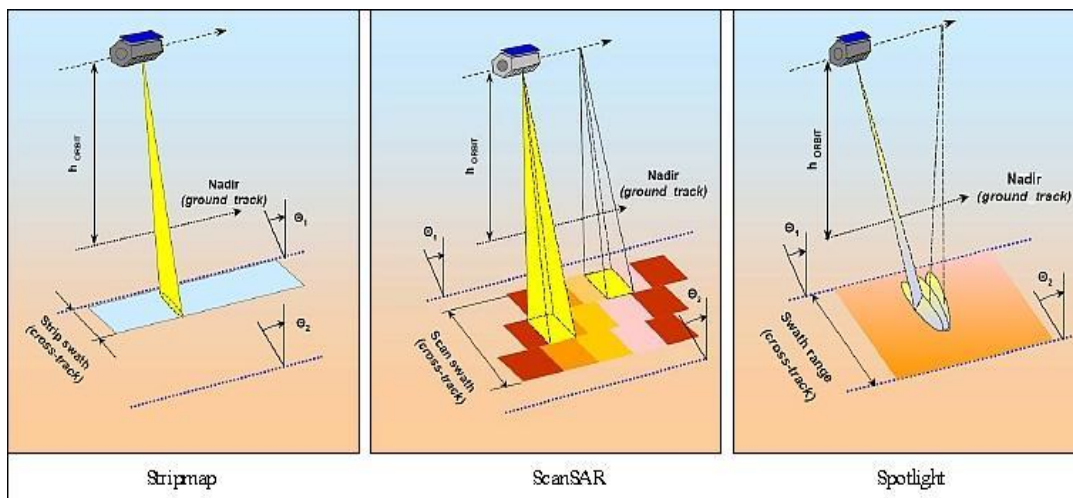
- 2) Τεχνικές εξομάλυνσης-φιλτραρίσματος. Αυτή είναι μια άλλη τεχνική που χρησιμοποιείται για την εξάλειψη του φαινομένου της κηλίδωσης. Όπως και η επεξεργασία πολλών όψεων, έτσι και το φιλτράρισμα οδηγεί στην μείωση της χωρικής ανάλυσης αφού εξομαλύνουν την απεικόνιση (σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10: Τεχνικές φιλτραρίσματος Πηγή: Canadian Centre for Remote Sensing

### 3.4.2. Τρόποι Λήψης

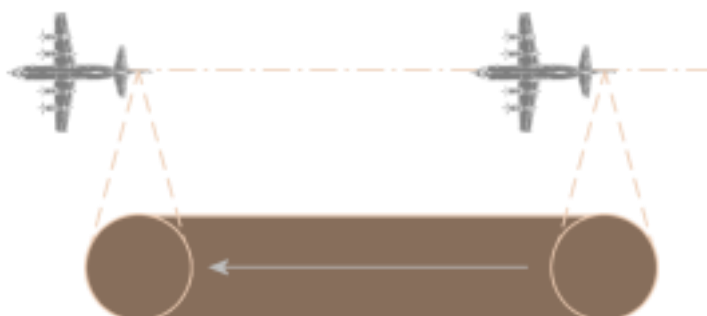
Ένα σύστημα ραντάρ μπορεί να συλλέξει πληροφορία με διάφορους τρόπους, οι οποίοι έχουν να κάνουν με τον τρόπο φωτισμού του εδάφους. Οι τρόποι αυτοί είναι: Stripmap, ScanSAR και Spotlight και αναλύονται παρακάτω (εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.6: Τρόποι λήψης SAR Πηγή: eoPortal Directory, ESA 2014

### Stripmap mode

Όταν ο δέκτης είναι σε λειτουργία Stripmap, τότε το σύστημα έχει την ευελιξία να επιλέγει την λωρίδα απεικόνισης με το να αλλάζει την γωνία πρόσπτωσης. Η λειτουργία αυτή είναι η πιο συνηθισμένη. Η κάθε λωρίδα του εδάφους φωτίζεται με συνεχή και σταθερό ρυθμό και το εύρος δέσμης έχει σταθερή διεύθυνση (σχήμα 3.11).

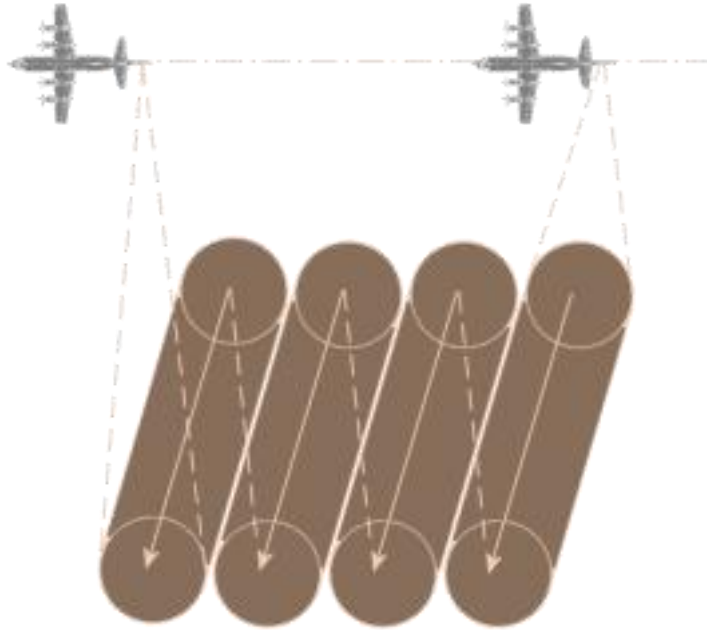


Σχήμα 3.11: Γεωμετρία λειτουργίας Stripmap Πηγή: [www.radartutorial.eu](http://www.radartutorial.eu)

### ScanSAR mode

Σε λειτουργία Stripmap το σύστημα περιορίζεται σε μια στενή λωρίδα. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί χρησιμοποιώντας την αρχή ScanSAR, η οποία επιτυγχάνει την διεύρυνση της λωρίδας με την δημιουργία υπο-λωρίδων (sub-swaths), οι οποίες συνδυάζονται με σκοπό τον σχηματισμό μιας απεικόνισης με μεγάλο πλάτος λωρίδας (σχήμα 3.12).

Στην τεχνική αυτή ο χρόνος λειτουργίας μοιράζεται σε πάνω από μια υπο-λωρίδα για να εξασφαλίσει την πλήρη κάλυψη μιας εικόνας και γι' αυτό το λόγο το οπισκεδαζόμενο σήμα προέρχεται από ορισμένους παλμούς και όχι όλους όπως στο Stripmap. Επομένως, οι λιγότεροι παλμοί για την σύνθεση μιας εικόνας συνεπάγεται την μείωση της διακριτικής ικανότητας αυτού του τρόπου λειτουργίας.

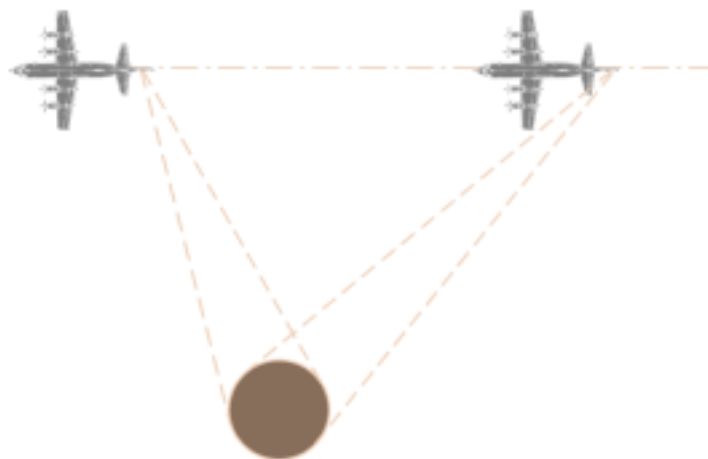


Σχήμα 3.12: Γεωμετρία λειτουργίας ScanSAR Πηγή: [www.radartutorial.eu](http://www.radartutorial.eu)

Το πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η εκτεταμένη γεωγραφική κάλυψη με βαθμονομημένα ραδιομετρικά δεδομένα, γι' αυτό δεν δίνεται έμφαση στην μειωμένη χωρική ανάλυση.

### **Spotlight mode**

Κατά τη διάρκεια της συλλογής δεδομένων λειτουργίας Spotlight, ο αισθητήρας κατευθύνει τη δέσμη της κεραίας κατά τη διεύθυνση του αζιμούθιου του ώστε να φωτίζει συνεχώς το εδάφος επίθεμα που πρόκειται να απεικονιστεί. Η λειτουργία Spotlight προσφέρει καλύτερη ανάλυση στη διεύθυνση του αζιμούθιου από αυτήν που είναι επιτεύξιμη σε λειτουργία Stripmap χρησιμοποιώντας την ίδια φυσική κεραία. Επίσης, η Spotlight απεικόνιση παρέχει τη δυνατότητα απεικόνισης μιας σκηνή σε πολλαπλές γωνίες θέασης από ένα μόνο πέρασμα. Τέλος, αυτός ο τρόπος λήψης επιτρέπει την αποτελεσματική απεικόνιση των πολλαπλών μικρότερων σκηνών ενώ η λειτουργία Stripmap δημιουργεί εικόνες μιας μεγάλης λωρίδας εδάφους (σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13: Γεωμετρία λειτουργίας Spotlight Πηγή: [www.radartutorial.eu](http://www.radartutorial.eu)

### 3.5.Χαρακτηριστικά Αντικειμένων-Στόχων

Η απεικόνιση των διάφορων αντικειμένων σε μια εικόνα SAR εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Τα διάφορα αντικείμενα εμφανίζονται σε τόνους του γκρι, από άσπρο μέχρι μαύρο, ανάλογα με την οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία. Όταν η ένταση της ακτινοβολίας αυτής είναι μεγάλη τότε έχουμε φωτεινούς τόνους, αλλιώς πιο σκούρους. Αυτό έχει να κάνει με παραμέτρους του συστήματος ραντάρ (πόλωση, συχνότητα σήματος) καθώς επίσης και με τις ιδιότητες των στόχων-αντικειμένων (σχήμα, τραχύτητα, διηλεκτρικές ιδιότητες, διαπεραστικότητα). Παρακάτω αναλύουμε τα χαρακτηριστικά των αντικειμένων-στόχων που επηρεάζουν την απεικόνιση:

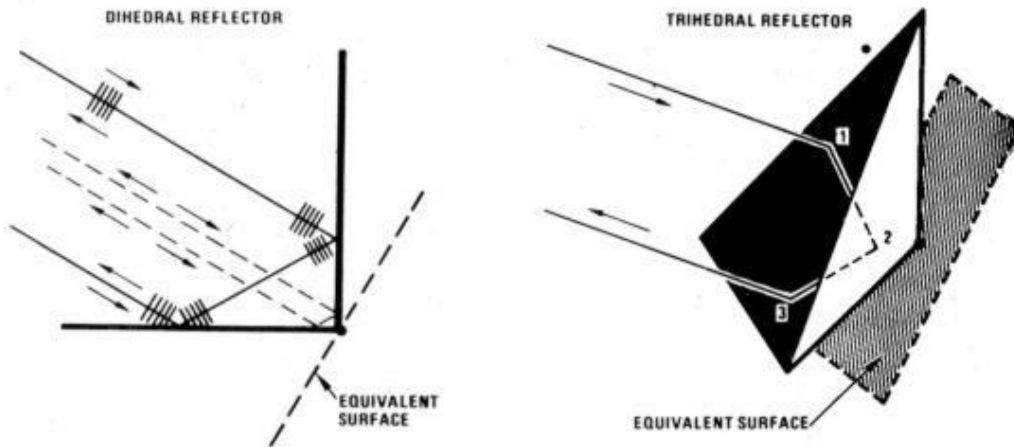
#### Σχήμα (double bounce)

Μερικές φορές μικρά αντικείμενα εμφανίζονται πολύ φωτεινά σε εικόνες ραντάρ. Αυτό συμβαίνει λόγω του φαινομένου της διπλής αναπήδησης.

Γενικά, οι επιφάνειες με κλίση προς το ραντάρ έχουν ισχυρότερη οπισθοσκέδαση από επιφάνειες οι οποίες έχουν κλίση αντίθετη από το ραντάρ και έχουν την τάση να εμφανίζονται φωτεινότερες στην εικόνα. Μερικές περιοχές που δεν φωτίζονται από το ραντάρ, όπως η πίσω πλευρά του βουνού που βρίσκεται σε σκιά, εμφανίζονται σκοτεινές (σχήμα 3.14).



# CORNER REFLECTORS

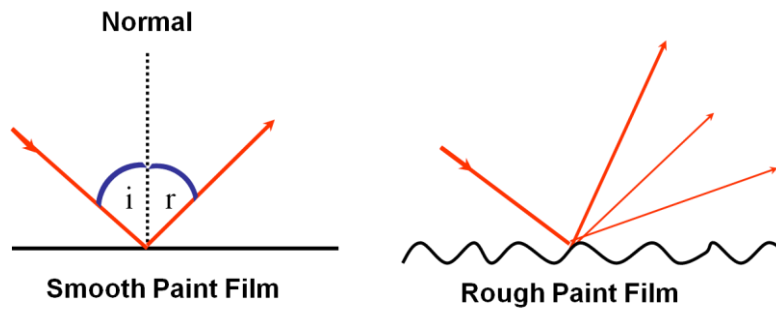


Σχήμα 3.14: Διπλή αναπήδηση Πηγή: Τομέας Τηλεπισκόπησης, Santa Barbara University

Το φαινόμενο της διπλής αναπήδησης εμφανίζεται όταν, για παράδειγμα, οι δρόμοι της πόλης και τα κτίρια παρατάσσονται κατά τέτοιο τρόπο (βλ. εικόνα 3.1) ώστε οι παλμοί του ραντάρ να αναπηδήσουν στον δρόμο, στη συνέχεια στο κτίριο (διπλή αναπήδηση-double bounce) και απευθείας πίσω προς το ραντάρ. Τότε τα κτίρια φαίνονται πολύ φωτεινά (λευκό) στις εικόνες ραντάρ. Δρόμοι και αυτοκινητόδρομοι είναι επίπεδες επιφάνειες και έτσι εμφανίζονται σκοτεινές. Τα κτίρια που δεν παρατάσσονται έτσι ώστε οι παλμοί του ραντάρ να αντανακλώνται κατ'ευθείαν πίσω, θα εμφανιστούν με ανοιχτό γκρι χρώμα.

## Επιφανειακή Τραχύτητα

Η επιφάνεια του επιπέδου που φωτίζεται από την δέσμη του ραντάρ παίζει μεγάλο ρόλο στους τόνους με τους οποίους αυτή θα απεικονιστεί. Όσο πιο λεία είναι, τόσο πιο μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται και το επιστρεφόμενο σήμα έχει μικρή ένταση και ως συνέπεια έχουμε σκούρους τόνους. Αντίθετα, όσο πιο τραχεία είναι η επιφάνεια τόσο πιο ιστροπικά σκεδάζει την ακτινοβολία με αποτέλεσμα το σήμα επιστροφής να έχει μεγάλη ένταση και να έχουμε φωτεινούς τόνους (σχήμα 3.15).



Σχήμα 3.15: Επιφανειακή τραχύτητα

## Διηλεκτρικές ιδιότητες

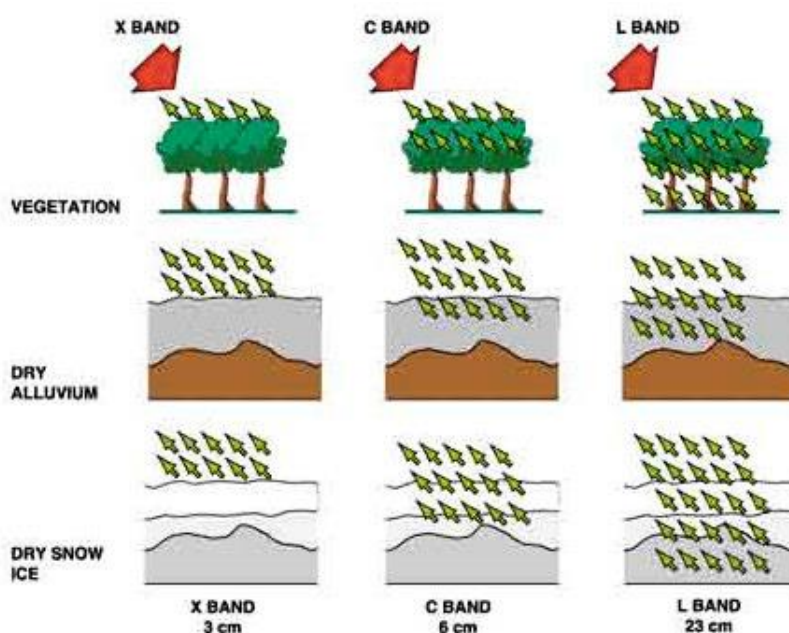
Η οπισθοσκέδαση εξαρτάται επίσης από τις διηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου: η διηλεκτρική σταθερά του μετάλλου και του νερού είναι υψηλή (80), ενώ για τα περισσότερα άλλα υλικά είναι σχετικά χαμηλή περίπου από 3 έως 8 σε ξηρές συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι σε έδαφος με υγρασία ή σε περιοχές με βλάστηση μπορεί να υπάρχει μια αύξηση στην ανακλαστικότητα του σήματος.

Μια άλλη εφαρμογή του SAR είναι ο εντοπισμός της υγρασίας του εδάφους και βασίζεται στο φαινόμενο που περιγράφηκε παραπάνω και σχετίζεται με τις διηλεκτρικές ιδιότητες του κάθε στόχου. Η εφαρμογή αυτή βασίζεται στη μεγάλη αντίθεση μεταξύ των διηλεκτρικών ιδιοτήτων των ξηρών και υγρών εδαφών. Όταν το έδαφος είναι βρεγμένο, η διηλεκτρική σταθερά του είναι περίπου 2,5 και σε περίπου 25 έως 30 υπό κορεσμένες συνθήκες. Αυτό μεταφράζεται σε μια αύξηση της ανακλώμενης ενέργειας.

## Διαπερατικότητα (penetration)

Η διαπερατικότητα των διαφόρων αντικειμένων-στόχων εξαρτάται από τη συχνότητα και την πόλωση της ακτινοβολίας. Μερικές φορές τα κύματα μπορεί να διεισδύουν στη βλάστηση και, σε ξηρές συνθήκες, και εντός του εδάφους (για παράδειγμα σε ξηρό χιόνι ή άμμο). Αυτό σημαίνει ότι μπορεί σε μια δασική περιοχή το σήμα να οπισθοσκεδάζεται από τα φύλλα, από τα κλαδιά, από τον κορμό ή από το έδαφος (εικόνα 3.7).

Η διείσδυση της ακτινοβολίας μέσα στο στόχο γίνεται ισχυρότερη καθώς μεγαλώνει το μήκος κύματος. Όσον αφορά την πόλωση, τα κάθετα-πολωμένα κύματα (VH / HV) έχουν μικρότερη διαπερατικότητα από τα όμοια-πολωμένα (HH / VV). Συνεπώς, αναλόγως την εφαρμογή για την οποία χρησιμοποιείται η SAR απεικόνιση επιλέγεται και το κατάλληλο φασματικό κανάλι.

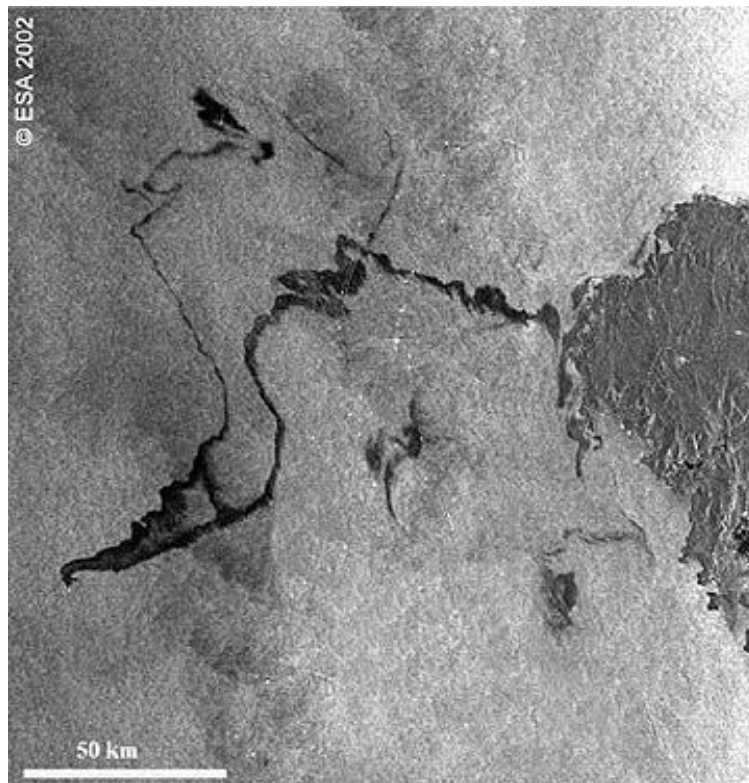


Εικόνα 3.7: Διαπερατικότητα Πηγή: Sarmar, August 2009

### 3.6.Εφαρμογές SAR Απεικονίσεων

Λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων των Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος, οι απεικονίσεις του είναι πολύ διαδεδομένες για διεπιστημονικές εφαρμογές στη γεωλογία, οικολογία, ωκεανογραφία, γεωργία και την υδρολογία. Μερικές από τις βασικές εφαρμογές των απεικονίσεων αυτών είναι:

- Μελέτη των κινήσεων και των αλλαγών μεγέθους των πάγων ώστε να κατανοηθεί η κλιματική αλλαγή.
- Εκτίμηση του εδάφους για την πιθανότητα ή την εύρεση φυσικών πόρων, π.χ. πετρέλαιο.
- Μέτρηση κίνησης της επιφάνειας τη Γης για καλύτερη κατανόηση σεισμών και ηφαιστειών.
- Αναγνώριση και παρακολούθηση πετρελαιοκηλίδων.
- Εντοπισμός κινούμενων πάγων.
- Εκτίμηση υγιούς βλάστησης.
- Χωροταξικός και πολεοδομικός σχεδιασμός.
- Παρακολούθηση αλλαγών χρήσεων γης.
- Τοπογραφία εδάφους (εξαγωγή οριζοντιογραφικών χαρακτηριστικών, παραγωγή Ψ.Μ.Ε.).
- Καταστροφές από σεισμό.



Εικόνα 3.8: Αναγνώριση πετρελαιοκηλίδας Πηγή:ESA 2002



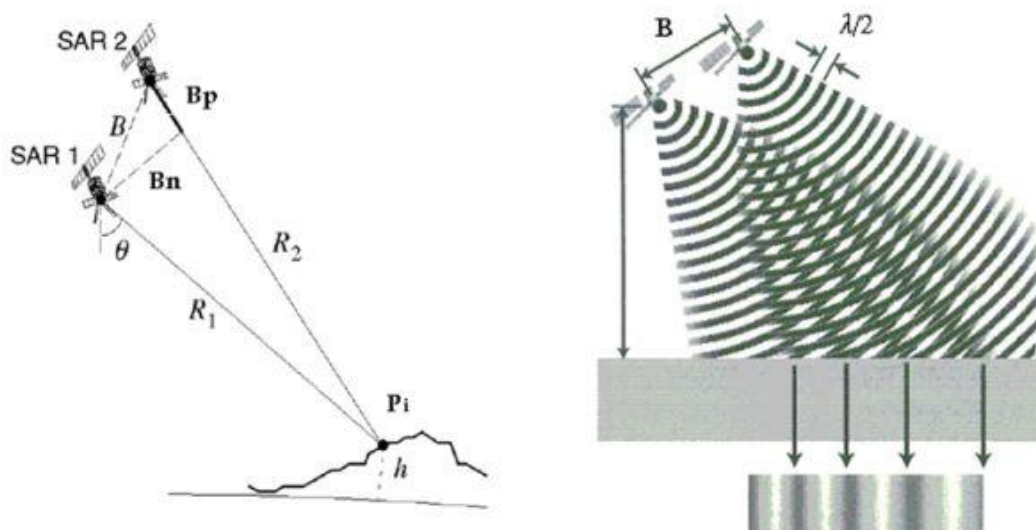
## 4. ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ SAR ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ

Τα τελευταία χρόνια, ένα από τα πιο σημαντικά και εξελιγμένα εργαλεία της Τηλεπισκόπησης θεωρείται η τεχνική της Συμβολομετρίας. Χρησιμοποιείται κυρίως για την παρακολούθηση των διαφόρων παραμορφώσεων του εδάφους. Παρακάτω αναλύονται η βασικές αρχές της τεχνικής αυτής, οι διάφορες μορφές της, τα βήματα που ακολουθούνται για την εξαγωγή αποτελεσμάτων και τέλος αναλύονται μερικές εφαρμογές της.

### 4.1. Αρχές της Συμβολομετρίας

Η τεχνική της Συμβολομετρίας βασίζεται στον συνδυασμό τουλάχιστον δύο εικόνων, οι οποίες προκύπτουν από διαφορετικές θέσεις ή χρόνους για την ίδια σκηνή, αφού γίνουν απαραίτητες διορθώσεις.

Η γεωμετρία της συμβολομετρίας απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 4.1. Ως SAR1 και SAR2 είναι οι δύο δορυφόροι που απεικονίζουν από δύο διαφορετικές θέσεις την ίδια περιοχή. Ως  $R_1$  και  $R_2$  συμβολίζονται οι αντίστοιχες αποστάσεις προς τον στόχο. Η απόσταση  $B$  καλείται διάνυσμα βάσης και είναι η απόσταση μεταξύ των δύο αισθητήρων. Το διάνυσμα βάσης αναλύεται σε δύο συνιστώσες: μια παράλληλη στη διεύθυνση των αποστάσεων της απεικόνισης και μια κάθετη σε αυτή ( $B_n$ ).



Σχήμα 4.1: Γεωμετρία λήψης συμβολομετρίας Πηγή: Luzi G., 2010. *Ground Based SAR Interferometry: a Novel Tool for Geoscience: Chapter 1 in book "Geoscience and Remote Sensing New Achievements"*

Η πρώτη από τις δύο απεικόνισεις SAR ονομάζεται κύρια (master) και η δεύτερη δευτερεύουσα (slave). Κάθε εικονοστοιχείο μιας εικόνας SAR περιέχει πληροφορία για το εύρος και τη φάση του κύματος του παλμού του ραντάρ, που εκφράζεται από τη μιγαδική σχέση:

$$z(x,y) = I(x,y) e^{i\Phi(x,y)}$$

όπου  $(x,y)$ : οι συντεταγμένες του εικονοστοιχείου για το απεικονιζόμενο σημείο του εδάφους,

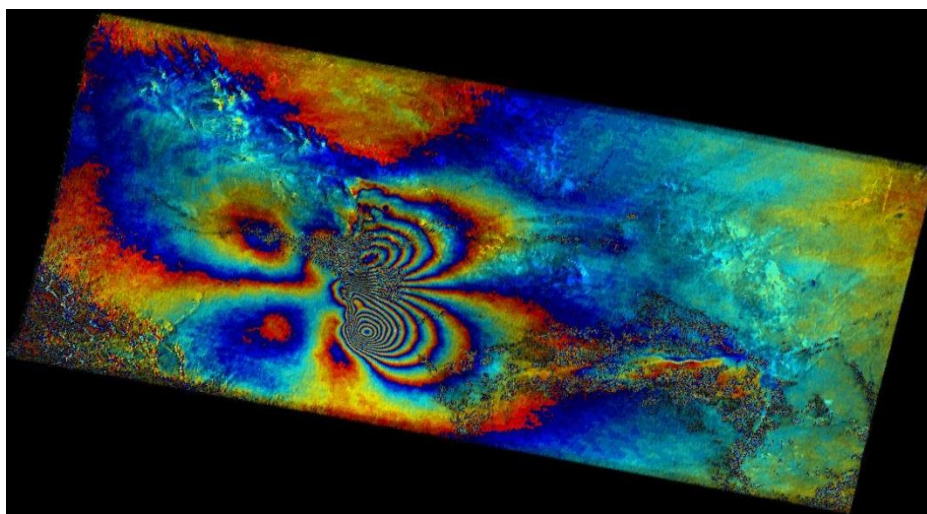
$z$ : η μιγαδική τιμή του εικονοστοιχείου,

$I$ : το εύρος του σήματος στο σημείο που εκφράζεται από την ένταση του εικονοστοιχείου,

$\Phi$ : η φάση του ανακλώμενου σήματος από το αντίστοιχο σημείο και

$i=\sqrt{-1}$ : η φανταστική μονάδα.

Από τον πολλαπλασιασμό κάθε σημείου μιας SAR απεικόνισης με το συζυγή μιγαδικό μιας δεύτερης δίνει ένα διάγραμμα κροσσών συμβολής ή συμβολόγραμμα, το οποίο αποτελεί και το βασικό προϊόν της συμβολομετρίας (εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα κροσσών συμβολής Πηγή: Fringe Workshop, ESA, 2005

Κάθε κροσσός συμβολής αντιπροσωπεύει τη μετακίνηση της επιφάνειας ίση με το μισό μήκος κύματος του σήματος του ραντάρ προς το δορυφόρο. Δηλαδή, κάθε πλήρης φασματικός κύκλος των χρωμάτων αντιπροσωπεύει πρόσθετα  $\lambda/2$  εκατοστά μετακίνησης της επιφάνειας προς την κατεύθυνση του δορυφόρου, π.χ. σχεδόν 3 cm για τον αισθητήρα SAR του ERS. Οι κροσσοί συμβολής καταγράφονται ως τιμές στο διάστημα  $[0,2\pi]$ .

Το σήμα που σκεδάζεται από ένα στόχο στην επιφάνεια της Γης και λαμβάνεται από ένα σύστημα Ραντάρ σε μία απόσταση  $R$  έχει συμβολομετρικό πλάτος ( $A$ ), το οποίο είναι το γινόμενο του πλάτους των δύο SAR απεικονίσεων και συμβολομετρική φάση ( $\phi$ ), η οποία είναι η διαφορά των φάσεων των δύο SAR απεικονίσεων. Αυτό που ενδιαφέρει στο συμβολόγραμμα είναι η διαφορά φάσης ενός στόχου από διαφορετικές θέσεις στο διάστημα έχοντας αποστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  από τον κάθε δορυφόρο. Η διαφορά φάσης εκφράζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = 4\pi/\lambda (R_1 - R_2) = 4\pi/\lambda * \Delta R$$

Στη συμβολομετρική φάση  $\Phi$  συνεισφέρουν διάφοροι παράγοντες και έτσι ισχύει:

$$\Phi = \Phi_{\text{καμπυλότητα της Γης}} + \Phi_{\text{τοπογραφίας}} + \Phi_{\text{εδαφικής παραμόρφωσης}} + \Phi_{\text{τροχιακά σφάλματα}} + \Phi_{\text{επιδράσεις ιονόσφαιρας}} + \Phi_{\text{επιδράσεις τροπόσφαιρας}} + \text{άλλοι θόρυβοι,}$$

Όπου  $\Phi_{\text{καμπυλότητα της Γης}}$ : προκαλεί μεταβολές της γωνίας παρατήρησης κατά μήκος της διεύθυνσης των αποστάσεων, γίνεται πρώτος προσδιορισμός και απαλοιφή φάσης σε μια υποτιθέμενη επίπεδη Γη

$\Phi_{\text{τοπογραφίας}}$ : για εξάλειψη χρησιμοποιούνται κατάλληλα ΨΜΕ

$\Phi_{\text{εδαφικής παραμόρφωσης}}$ :

$\Phi_{\text{τροχιακά σφάλματα}}$ : για την εξάλειψή τους χρησιμοποιούνται μοντέλα κατά την επεξεργασία

$\Phi_{\text{επιδράσεις ιονόσφαιρας}}$  και  $\Phi_{\text{επιδράσεις τροπόσφαιρας}}$ : για εξάλειψη απαιτούνται συμπληρωματικά δεδομένα από άλλες παρατηρήσεις

Τέλος, η συσχέτιση (coherence) είναι μια βασική παράμετρος στην τεχνική της συμβολομετρίας και δείχνει τον βαθμό συσχετισμού των δύο απεικονίσεων. Η τιμή αυτή κυμαίνεται από 0 έως 1. Όταν παίρνει την τιμή 0 τότε υπάρχει μηδενική συσχέτιση και όταν έχει τιμή 1 τότε υπάρχει πλήρη ταύτιση των απεικονίσεων. Εκφράζεται από τον τύπο:

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

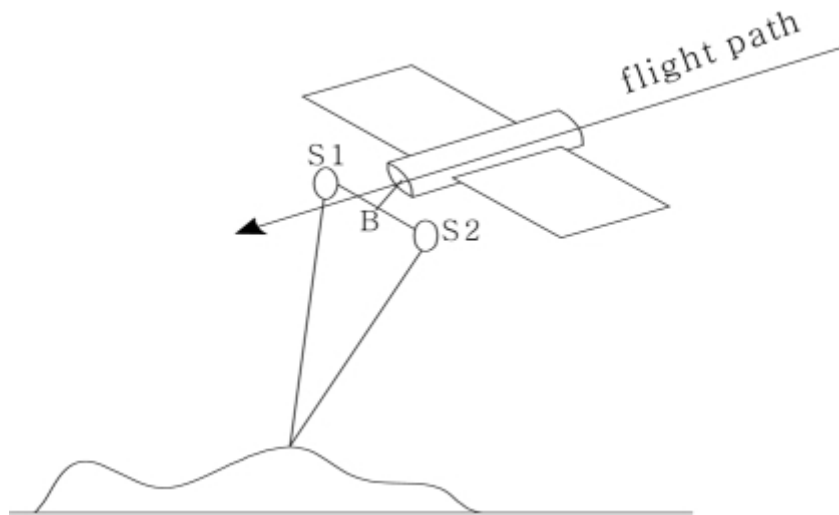
Όπου  $y_1, y_2$  τα συζυγή εικονοστοιχεία των δύο απεικονίσεων και  $E\{\}$  ο χωρικός μέσος όρος.

## 4.2.Μορφές Συμβολομετρίας

Η τεχνική της συμβολομετρίας μπορεί να εφαρμοστεί με πολλές διαφορετικές μορφές που διακρίνονται είτε με βάση την γεωμετρική διάταξη του διανύσματος βάσης, δηλαδή του διανύσματος που διαχωρίζει τις θέσεις της κεραίας στο συμβολομετρικό ζεύγος, είτε με κριτήριο την συχνότητα επανάληψης των περασμάτων της πλατφόρμας του ραντάρ. Ξεχωρίζουν οι παρακάτω κατηγορίες:

#### 4.2.1. Συμβολομετρία κατά Πλάτος (across track interferometry)

Η γεωμετρία του συστήματος ραντάρ στην κατά πλάτος Συμβολομετρία φαίνεται στο σχήμα 4.2. Οι δύο κεραίες S1 και S2 είναι τοποθετημένες στην πλατφόρμα του αεροσκάφους σε διεύθυνση κάθετη στη τροχιά πτήσης. Τα δεδομένα SAR λαμβάνονται την ίδια στιγμή, δηλαδή η πρωτεύουσα και η δευτερεύουσα εικόνα λαμβάνονται ταυτόχρονα από δύο ελαφρώς διαφορετικές τοποθεσίες. Αυτός ο τρόπος λήψης δεδομένων είναι κατάλληλος για την παραγωγή τοπογραφικών χαρτών. Η γραμμή βάσης, δηλαδή η απόσταση μεταξύ των δύο κεραιών, είναι κάθετη στη τροχιά πτήσης



Σχήμα 4.2: Γεωμετρία κατά πλάτος συμβολομετρίας Πηγή: Zou Wei-bao, 2009

Η Συμβολομετρία κατά πλάτος υλοποιείται κυρίως με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- Συμβολομετρία απλής-μονής διέλευσης (single-pass)

Στην περίπτωση αυτή, οι δύο κεραίες είναι τοποθετημένες στην ίδια πλατφόρμα με σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Με αυτό τον τρόπο μια εικόνα ραντάρ λαμβάνεται μετά από ένα απλό πέρασμα της πλατφόρμας του αισθητήρα πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος. Μια ειδική τέτοια περίπτωση αποτελούσε η ειδική αποστολή του διαστημικού λεωφορείου (*Shuttle Radar Topographic Mission, SRTM*) που μετέφερε ένα ειδικό μηχανισμό δύο αντενών που χρησιμοποιήθηκαν, σε μια 11-ήμερη πτήση το 2000, για τη λεπτομερή χαρτογράφηση του 80% του πλανήτη από μετρήσεις SAR. [Δεληκαράογλου, 2005]

- Συμβολομετρία διπλής διέλευσης (two pass)

Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται μόνο μια κεραία σε δύο διαφορετικές θέσεις. Δηλαδή, η πλατφόρμα του αισθητήρα πρέπει να περάσει πάνω από την ίδια περιοχή ενδιαφέροντος στην ίδια κατεύθυνση κατά μήκος της ίδιας τροχιάς ή μιας παράλληλης στην πρώτη. Μια ειδική τέτοια περίπτωση είναι όταν γίνεται ταυτόχρονη χρήση δύο δορυφόρων που κινούνται σε τροχιές "σχηματισμού" – τις λεγόμενες τροχιές συνεργασίας (*tandem orbits*) – όπου οι δορυφόροι κινούνται σε μικρές προκαθορισμένες αποστάσεις μεταξύ τους στην ίδια ή σε ελαφρά παράλληλες τροχιές (π.χ. στην περίπτωση των δορυφόρων ERS-1 και ERS-2 ή ERS-2 και ENVISAT) [Δεληκαράογλου, 2005].



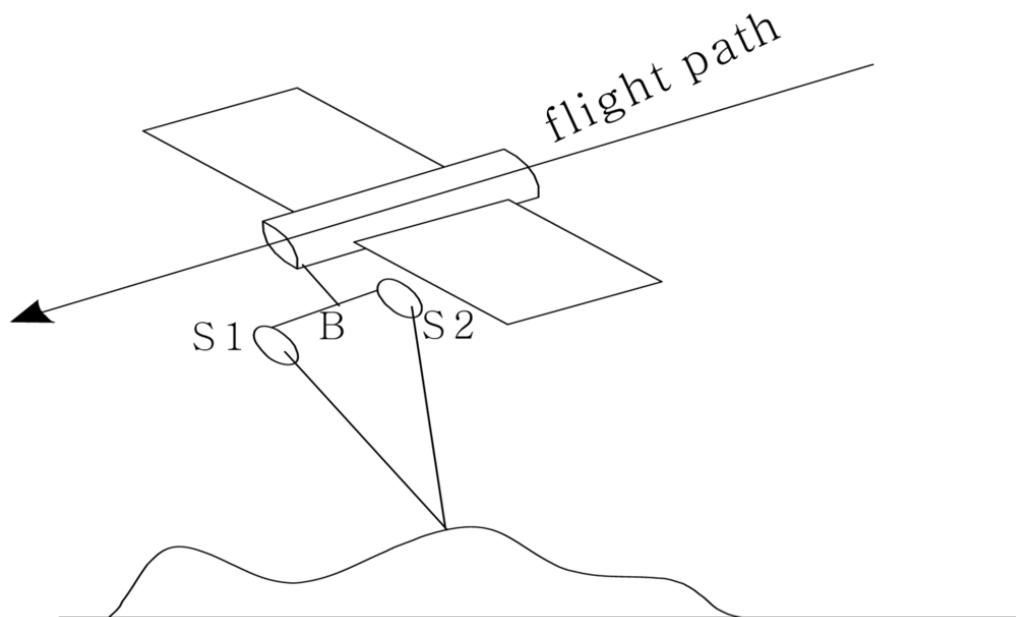
#### 4.2.2. Συμβολομετρία κατά Μήκος (along track interferometry)

Στην περίπτωση της συμβολομετρίας κατά μήκος, η γραμμική βάση υλοποιείται κατά μήκος της τροχιάς του αισθητήρα SAR. Έτσι οι δύο κεραίες τοποθετούνται πάνω στην πλατφόρμα μεταφοράς του ραντάρ με διεύθυνση παράλληλη στη γραμμή πτήσης. Συνήθως χρησιμοποιείται σε αερομεταφερόμενα ραντάρ, αν και τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται αυτού του είδους η Συμβολομετρία στους δορυφόρους TanDEM-X/TerraSAR-X. Η διαφορά φάσης από τη μετακίνηση του στόχου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\varphi = 4\pi/\lambda * u / V * B_{AT}$$

Όπου  $V$ : ταχύτητα πλατφόρμας,  $\lambda$ : μήκος κύματος,  $u$ : ταχύτητα στόχου,  $B_{AT}$ : η συνιστώσα της βάσης στη διεύθυνση πτήσης.

Η γεωμετρία της κατά μήκος συμβολομετρίας φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Γεωμετρία κατά μήκος συμβολομετρίας Πηγή: Zou Wei-bao, 2009

#### 4.2.3. Διαφορική Συμβολομετρία

Στην περίπτωση της Διαφορικής Συμβολομετρίας, στόχος είναι η αφαίρεση της τοπογραφίας από την φάση, ώστε να απομονωθεί μόνο η φάση που σχετίζεται με πραγματική διαφοροποίηση της θέσης κάθε στόχου μεταξύ των δύο λήψεων.

Η τεχνική αυτή, η οποία έχει σχετικά χαμηλό κόστος, αναπτύχθηκε με στόχο την παρακολούθηση γεωδυναμικών φαινομένων, μιας και μπορεί να ανιχνεύσει πολύ μικρές υψομετρικές αλλαγές της τάξης του  $\pm 1\text{cm}$  ή λιγότερο στην πλάγια διεύθυνση (LOS-Line Of Sight).

Μια επέκταση της Συμβολομετρίας διπλής διέλευσης είναι η Διαφορική Συμβολομετρία. Για την αφαίρεση της φάσης της τοπογραφίας, χρησιμοποιείται είτε λεπτομερές Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους είτε επιπρόσθετες απεικονίσεις SAR ή με άλλες τεχνικές όπως αυτή των σταθερών σκεδαστών. Υπάρχουν τρία είδη κοινών μεθόδων στη διαφορική Συμβολομετρία, 2-pass, 3-pass, και 4-pass. Στην περίπτωση της μεθόδου 2-pass, η προσομοιωμένη φάση της τοπογραφίας παράγεται από ένα συμβατικό DEM. Στις μεθόδους 3-pass ή 4-pass βασίζονται στη χρησιμοποίηση 3 και 4 συμβολομετρικών ζευγαριών αντίστοιχα. Στις μεθόδους αυτές παράγονται 2 συμβολογραφήματα μεταξύ της εικόνας αναφοράς και των άλλων, από τα οποία το ένα περιέχει τη διαφορική φάση και το δεύτερο χρησιμοποιείται ως αναφορά για την αφαίρεση της φάσης της τοπογραφίας.

#### **4.2.4. Συμβολομετρία Πλήρως Πολωμένων Απεικονίσεων (PolInSAR)**

Στην τεχνική της Συμβολομετρίας πλήρως πολωμένων απεικονίσεων αξιοποιούνται η τεχνική της πολωσιμετρίας και η τεχνική της κλασσικής συμβολομετρίας και ουσιαστικά βασίζεται στην αξιοποίηση πολλών συμβολογραφήματων που προκύπτουν από απεικονίσεις με διάφορες πολώσεις. Η πολωσιμετρία SAR απεικονίσεων είναι η τεχνική που αναπτύχθηκε για την αξιοποίηση του πίνακα σκέδασης που προκύπτει από πλήρως πολωμένα δεδομένα και αποτελεί εργαλείο για την εξαγωγή γεωφυσικών χαρακτηριστικών από SAR απεικονίσεις και την ταξινόμηση του εδάφους.

Η συγκεκριμένη τεχνική βρίσκει εφαρμογή κυρίως στην εξαγωγή των δασικών παραμέτρων όπως το ύψος των δέντρων και τη παρακολούθηση μεταβολών/καταστροφών σε δασικές περιοχές καθώς επίσης και στην παρακολούθηση πάγων και γεωργικών καλλιεργειών. Επίσης άλλες εφαρμογές που μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνική αυτή είναι η ενίσχυση της αντίθεσης μεταξύ διαφόρων στόχων και εδαφών και η ταξινόμηση του εδάφους από SAR απεικονίσεις. Τέλος, θεωρείται κατάλληλη για υδρολογικές μελέτες (εδαφική υγρασία, εντοπισμό πλημμυρών) καθώς επίσης και για μελέτη ωκεανών. Η διαδικασία περιγράφεται λεπτομερώς από τους *Cloude και Parathanassiou (1998)*.

#### **4.2.5. Χρονοσειρές**

Χρονοσειρά ονομάζεται η επεξεργασία και εκμετάλλευση μιας σειράς N εικόνων SAR για την ίδια περιοχή μελέτης και για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την αναγνώριση περιοχών (εικονοστοιχεία) που δείχνουν συσχτισμένη μετατόπιση (displacement) με την πάροδο του χρόνου και το προϊόν της τεχνικής αυτής είναι χάρτης ετήσιου ρυθμού εδαφικής μετατόπισης για χρονικό διάστημα που θα επιλεχθεί. Δύο από τις πιο δημοφιλείς προσεγγίσεις είναι η Μέθοδος των σταθερών σκεδαστών και η μέθοδος των υποσυνόλων μικρών βάσεων.

- Μέθοδος Σταθερών Σκεδαστών (Persistent Scatterer's technique)

Η μέθοδος των σταθερών σκεδαστών βασίζεται στην επιλογή μερικών σημείων-εικονοστοιχείων τα οποία χρησιμοποιούνται σαν σταθεροί στόχοι και τα χαρακτηριστικά οπισθοσκέδασης τους παραμένουν αμετάβλητα με την πάροδο του χρόνου. Τα σημεία αυτά είναι μεμονωμένα εδαφικά ή δομικά στοιχεία και κυρίως πρόκειται για ανθρωπογενή στοιχεία όπως κτίσματα, γέφυρες, φράγματα.

Το 1999, ερευνητές στο πολυτεχνείο του Μιλάνο ανέπτυξαν μια προσέγγιση με πολλές εικόνες, η οποία ψάχνει στο σύνολο των εικόνων για αντικείμενα του εδάφους με συνεπείς και σταθερές ανακλάσεις του σήματος του δορυφόρου. (Ferretti et al., 2000) Αυτά τα αντικείμενα μπορεί να είναι στο μέγεθος του εικονοστοιχείου ή και πιο μικρά και να υπάρχουν σε όλες τις εικόνες. Από το 1999 πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν παρουσιαστεί, όπως για παράδειγμα: Ferretti et al. (2001), Colesanti et al. (2003), Mora et al. (2003), Hooper et al. (2004).

Αυτή η τεχνική είναι πιο συνηθισμένη σε δομημένες περιοχές με πολλές κατασκευές, ώστε να υπάρχουν σημεία που παραμένουν ραδιομετρικά σταθερά (κτίρια) και κυρίως για την παρακολούθηση παραμορφώσεων με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Έτσι, μπορούμε να παρατηρήσουμε καθίζηση εδάφους, κατολισθήσεις, μεμονωμένες κατασκευές, ρήγματα, ηφαιστεια και τέλος μπορεί να διευκολυνθεί και ο σχεδιασμός κατασκευαστικών έργων, προσδιορίζοντας σταθερούς διαδρόμους για αυτά.

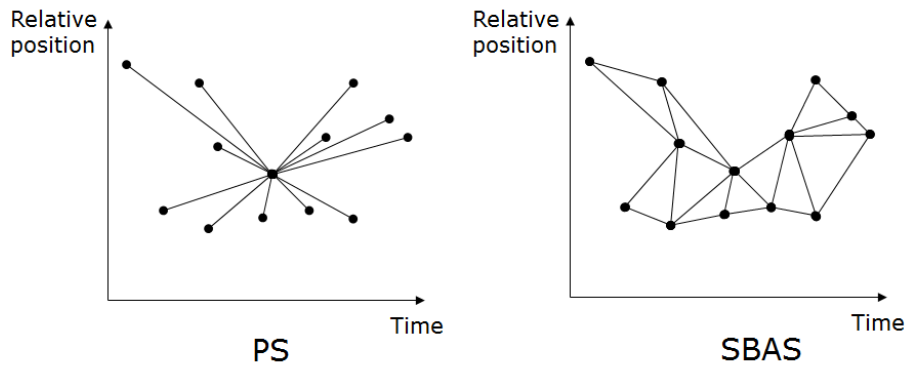
Στη μέθοδο αυτή επιλέγεται μια κύρια εικόνα και με αυτήν συνδυάζονται όλες οι  $n$  υπόλοιπες ώστε να δημιουργηθούν  $n-1$  συμβολογράμματα (σχήμα 4.4). Η κύρια αυτή εικόνα υπολογίζεται να είναι κοντά στο μέσο χρονικό και χωρικό όρο των εικόνων, αν και σίγουρα θα δημιουργηθούν συμβολογραφήματα με μεγάλη χωρική και χρονική απόσταση. Ο αριθμός των εικόνων παίζει μεγάλο ρόλο για την ύπαρξη συνάφειας μεταξύ των εικόνων.

Με τη μέθοδο αυτή μπορούν να προσδιοριστούν παραμορφώσεις σε επίπεδο χιλιοστού, καθώς η μέγιστη ανιχνεύσιμη παραμόρφωση εξαρτάται από το μήκος κύματος του δέκτη και την χρονική απόσταση μεταξύ των εικόνων. Πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι δεν γίνονται οι διαδικασίες του φιλτραρίσματος και της αποκατάστασης φάσης, μια διαδικασία δύσκολη που εισάγει πολλά σφάλματα στο αποτέλεσμα.

- Μέθοδος υποσυνόλων μικρών βάσεων (small baseline subset- SBAS)

Η μέθοδος SBAS είναι μια τεχνική της διαφορικής συμβολομετρίας για παρακολούθηση της χρονικής εξέλιξης των παραμορφώσεων της επιφάνειας της Γης. (Berardino, 2002) Βασίζεται σε κατάλληλο συνδυασμό των διαφορικών συμβολογραφημάτων που παράγονται από τα ζεύγη δεδομένων που χαρακτηρίζονται από μικρή γραμμή βάσης και ταυτόχρονα μικρή χρονική διαφορά λήψης. Έτσι δημιουργείται ένα δίκτυο με τα συμβολογραφήματα που συνδυάζονται και γίνονται τα κατάλληλα βήματα με σκοπό την κατασκευή χαρτών που δείχνουν την εδαφική παραμόρφωση.

Στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 4.4) παρουσιάζεται η διαφορά στον συνδυασμό συμβολογραφημάτων ανάμεσα στις δύο τεχνικές που παρουσιάστηκαν παραπάνω.



Σχήμα 4.4: Δίκτυα συμβολογραφημάτων τεχνικής PS και SBAS Πηγή: sarmap

Σαν μέθοδος δεν είναι τόσο ευαίσθητη στον αριθμό των εικόνων, όπως η μέθοδος των σταθερών σκεδαστών, διότι εκμεταλλεύεται την χωρικά διασκορπισμένη συνάφεια και όχι την συνάφεια μόνο στα σημεία των σκεδαστών. Παρ' όλα αυτά, όσο περισσότερες εικόνες, τόσο καλύτερα αποτελέσματα, διότι γίνεται καλύτερη εκτίμηση και αφαίρεση της ατμοσφαιρικής συνιστώσας.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτής είναι πιο ομοιογενή, καθώς επίσης μπορούν να εντοπιστούν παραμορφώσεις που δεν ακολουθούν μια γραμμική τάση, αλλά μια τάση άλλης μορφής.

Η διαδικασία, όπως αυτή πραγματοποιείται με το λογισμικό SARscape περιγράφεται λεπτομερέστερα στο κεφάλαιο 5.2.

### 4.3.Βήματα Συμβολομετρίας

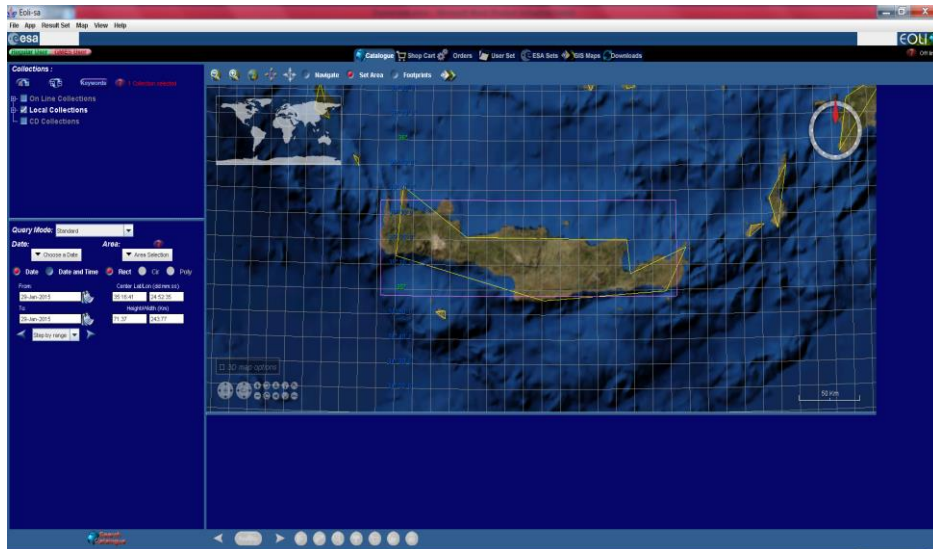
Ως συμβολομετρική διαδικασία καλείται το σύνολο των βημάτων για την εξαγωγή αποτελεσμάτων και χαρτών κατάλληλων για την εφαρμογή, για την οποία χρησιμοποιείται η συμβολομετρία.

#### 4.3.1. Προ-επεξεργασία

Το στάδιο της προ-επεξεργασίας ξεκινά με την παραγγελία των raw δεδομένων από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) μέσω μιας πλατφόρμας κατάλληλης για εξαγωγής καταλόγων με τις επιλεγείσες SAR απεικονίσεις (εικόνα 4.2). Σημαντικό για την επιτυχία της διαδικασίας είναι η επιλογή κατάλληλων συμβολομετρικών ζευγαριών με υψηλή συσχέτιση.

Μετά την απόκτηση των δεδομένων γίνεται η εστίαση των ανεπεξέργαστων (raw) εικόνων, ώστε να δημιουργηθούν οι SLC (Single Look Complex). Στα ανεπεξέργαστα δεδομένα, η ενέργεια του σήματος από ένα στόχο εξαπλώνεται σε εύρος και αζιμούθιο, και ο σκοπός της εστίασης είναι να συγκεντρώσει αυτή τη διεσπαρμένη ενέργεια σε ένα εικονοστοιχείο στην εικόνα εξόδου. Μετά από την εστίαση λαμβάνονται οι SLC (Single Look Complex) της κύριας και της δευτερεύουσας απεικόνισης.

Τέλος, οι δύο SLC εικόνες γίνονται Multi-looked με την επεξεργασία πολλών όψεων. Στη διαδικασία αυτή γίνεται μια αναδειγματοληψία, η οποία μειώνει το θόρυβο – βελτιώνεται η ραδιομετρική ακρίβεια της εικόνας αλλά ταυτόχρονα μειώνεται και η χωρική της ανάλυση. Για τον δορυφόρο ERS1 και ERS2 χρησιμοποιούνται 1 παράθυρο στην πλάγια διεύθυνση (range) και 5 στη διεύθυνση του αζιμούθιου (azimuth).

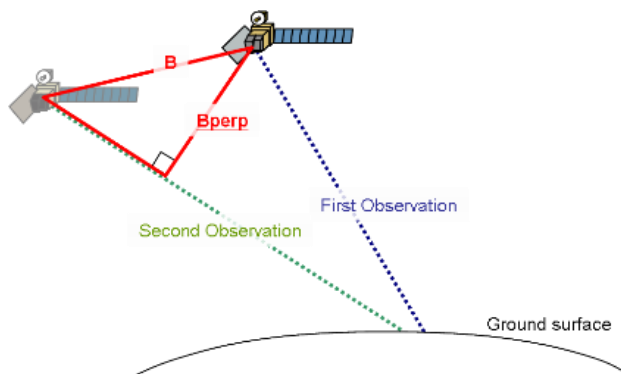


Εικόνα 4.2: Πλατφόρμα παραγγελίας δεδομένων Πηγή: Eolisa, 2014

#### 4.3.2. Υπολογισμός διανύσματος βάσης (Baseline estimation)

Ο υπολογισμός του διανύσματος βάσης είναι πολύ σημαντικός για την διαδικασία της συμβολομετρίας. Διάνυσμα βάσης καλείται η απόσταση μεταξύ των δύο θέσεων του αισθητήρα SAR λόγω των δύο διαφορετικών λήψεων (σχήμα 4.5).

Το διάνυσμα βάσης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις ακριβείς θέσεις των δορυφόρων και της κινηματικής συμπεριφοράς τους, οι οποίες προέρχονται κυρίως από το Department of Earth Observation and Space Systems του Πανεπιστημίου Delft. Υπολογίζονται όλα τα πιθανά ζευγάρια που μπορούν να δώσουν ένα συμβολόγραμμα και συνήθως προτιμάται να επιλέγεται μικρό εύρος στην τιμή της βασικής συμβολομετρικής γραμμής, ώστε να αποφεύγονται μεγάλες χρονικές και γεωμετρικές αποσυσχετίσεις.



Σχήμα 4.5: Διάνυσμα βάσης

Όσο αυξάνεται το διάνυσμα βάσης μεταξύ των λήψεων, τόσο αυξάνεται η αβεβαιότητα προσδιορισμού του υψομέτρου. Το μήκος του διανύσματος βάσης αποτελεί ένα μέτρο της αναμενόμενης συνάφειας των δύο SAR απεικονίσεων. Η πολύ μικρή συνάφεια και κατ' επέκταση η αδυναμία δημιουργίας του συμβολογράμματος παρατηρείται όταν το μήκος της βάσης είναι μεγαλύτερο από αυτό της κρίσιμης βάσης. Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα όρια της βάσης για τις διάφορες εφαρμογές της συμβολομετρίας.

Εφαρμογή	Διάνυσμα βάσης
Γενικό όριο	< 600m
ΨΜΕ	150m<B<600m
Ανίχνευση αλλαγών επιφανείας	30m<B<70m
Μετακίνηση επιφανείας	<5m

Πίνακας 4.1 : Χαρακτηριστικές βάσεις για συμβολομετρικές εφαρμογές του ERS-1, Πηγή : *Data selection and interferometric baselines (Gens, 2006)*

#### 4.3.3. Φασματική Επεξεργασία (Filtering)

Για την σωστή δημιουργία συμβολογράμματος είναι απαραίτητη σε αυτή τη φάση της διαδικασίας η φασματική επεξεργασία των εικόνων. Η επεξεργασία αυτή γίνεται και στις δυο κατευθύνσεις (αζιμούθιο, πλάγια διεύθυνση) και περιλαμβάνει το φιλτράρισμα της φασματικής μετατόπισης (spectral shift) και του κοινού εύρους της συχνότητας Doppler.

Η διαφορετική γωνία πρόσπτωσης, δηλαδή η διαφορετική θέση λήψης των δύο απεικονίσεων SAR, προκαλεί τη συμπίεση της φασματικής ανακλαστικότητας της μιας απεικόνισης ως προς την άλλη ως προς τη διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων. Εφόσον είναι γνωστή η κάθετη συνιστώσα της γραμμής βάσης, μπορεί να υπολογιστεί η μετατόπιση του φάσματος ανακλαστικότητας μέσω του τύπου:

$$\Delta f = \frac{f * B_{\perp}}{R * \tan(\theta - \alpha)}$$

Για την δημιουργία συμβολογράμματος χρησιμοποιείται μόνο η πληροφορία που είναι κοινή στα διαγράμματα φασματικής ανακλαστικότητας και στις δύο απεικονίσεις SAR. Το τμήμα που δεν είναι κοινό, δεν μπορεί να αξιοποιηθεί επειδή είναι θόρυβος και θα πρέπει να φιλτραριστεί.

Επίσης, στη διεύθυνση του αζιμούθιου, σημαντικό είναι και το φιλτράρισμα της συχνότητας Doppler για τον ακριβή προσδιορισμό της συχνότητας του κεντροειδούς Doppler. Οι διαδικασίες αυτές βοηθούν το επόμενο στάδιο της συμπροσαρμογής.

#### 4.3.4. Συμπροσαρμογή Απεικονίσεων (Coregistration)

Η συμπροσαρμογή των δύο εικόνων αποτελεί ένα από τα βασικότερα στάδια της διαδικασίας της συμβολομετρίας. Πρόκειται για το στάδιο που επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια των SAR προϊόντων (Zou et al., 2009).

Στο σημείο αυτό καλείται η δευτερεύουσα εικόνα (slave) να αποκτήσει την ίδια γεωμετρία με την κύρια απεικόνιση (master). Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τον υπολογισμό των μετατοπίσεων μεταξύ master και slave, ώστε να υπολογιστούν οι παράμετροι μετασχηματισμού με τους οποίους θα γίνει η αλλαγή της γεωμετρίας της slave. Έτσι, κάθε αντικείμενο της γήινης επιφάνειας αντιστοιχεί στο ίδιο εικονοστοιχείο και στις δύο εικόνες. Η ακρίβεια πρέπει να είναι καλύτερη του 0,2 εικονοστοιχείου ώστε τελικά να μην μειώνεται η συμβολομετρική συσχέτιση περισσότερο από 5%.

Το πρώτο βήμα της συμπροσαρμογής των εικόνων είναι ο προσδιορισμός της μεταβολής της θέσης κάθε εικονοστοιχείου της slave ως προς την master απεικόνιση. Το βήμα αυτό γίνεται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο καλείται μικρής ακρίβειας (coarse) και το δεύτερο μεγάλης ακριβείας (fine). Στην χοντρική συμπροσαρμογή, η ακρίβεια είναι περίπου 1-2 εικονοστοιχείων στις δύο διευθύνσεις και ο πιο συνηθισμένος αλγόριθμος είναι αυτός του συντελεστή συσχέτισης (cross-correlation). Στο στάδιο της απόλυτης συμπροσαρμογής (fine), η ακρίβεια που επιτυγχάνεται είναι υποψηφιδική (sub pixel) με μικρότερα παράθυρα και για αυτήν έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί αρκετοί αλγόριθμοι.

Στο δεύτερο βήμα της συμπροσαρμογής περιλαμβάνεται ο επαναπροσδιορισμός των τιμών του πλάτους και της φάσης των εικονοστοιχείων της δευτερεύουσας εικόνας. Η διαδικασία αυτή γίνεται με πολλούς αλγορίθμους παρεμβολής, όπως του εγγύτερου γείτονα, διγραμμική, κυβική συνέλιξη, sinc κλπ.

#### **4.3.5. Δημιουργία Διαγράμματος Κροσσών Συμβολής (Συμβολόγραμμα) (Interferogram Generation)**

Μετά τη διαδικασία της συμπροσαρμογής, δημιουργείται το συμβολόγραμμα πολλαπλασιάζοντας το κάθε εικονοστοιχείο της master εικόνας με τον συζυγή μιγαδικό της άλλης.

Ένα συμβολόγραμμα είναι μια εικόνα που σχηματίζεται από την διαφορά δύο εικόνων φάσης SAR της ίδιας περιοχής και είναι καταγεγραμμένες όλες οι γεωμετρικές διαφορές που προκύπτουν λόγω ατμόσφαιρας και φυσικής γήινης επιφάνειας.

$$\phi = \phi_{\text{flat}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{orbit}} + \phi_{\text{mov}} + \phi_{\text{atm}}$$

όπου  $\phi_{\text{flat}}$  είναι ο όρος της επίπεδης γης που αφαιρείται, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 4.3.6.. Ο δεύτερος όρος εκφράζει την επίδραση της τοπογραφίας. Για την εξάλειψή του χρησιμοποιείται ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους, το οποίο αφαιρείται από ένα συνθετικό συμβολόγραμμα που παράγεται από τις δύο απεικονίσεις. Με τα διαθέσιμα τροχιακά δεδομένα που προσδιορίζουν με ακρίβεια την τροχιά του δορυφόρου μπορεί να αφαιρεθεί ο παράγοντας  $\phi_{\text{orbit}}$ . Ο όρος  $\phi_{\text{atm}}$  επηρεάζεται κυρίως από τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας και θεωρείται ως σφάλμα σε εφαρμογές στις οποίες δεν προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας. Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις είναι δύσκολα προσδιορίσιμες και για τη διόρθωσή τους χρησιμοποιούνται πολλά συμβολογράμματα, στα οποία εντοπίζονται σταθεροί σκεδαστές με μηδενική συμβολομετρική φάση ώστε να καθορισθεί ο όρος αυτός.

Κροσσός συμβολής καλείται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που έχουν ίδια τιμή φάσης στην εικόνα. Κάθε κροσσός συμβολής αντιπροσωπεύει τη μετακίνηση της επιφάνειας ίση με το μισό μήκος κύματος του σήματος του ραντάρ προς το δορυφόρο. Δηλαδή, κάθε πλήρης φασματικός κύκλος των χρωμάτων αντιπροσωπεύει πρόσθετα  $\lambda/2$  εκατοστά μετακίνησης της επιφάνειας προς την κατεύθυνση του δορυφόρου, π.χ. σχεδόν 3 cm για τον αισθητήρα SAR του ERS. Οι κροσσοί συμβολής καταγράφονται ως τιμές στο διάστημα  $[0,2\pi]$ .

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η παραγωγή του συμβολογράμματος εξαρτάται από την ποιότητα της συμπροσαρμογής, τα στοιχεία της τροχιάς, τη διεύθυνση παρατήρησης και η τοπική κλίση της επιφάνειας του εδάφους. Επίσης, σημαντικό είναι οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των σκεδαστών να μένουν αμετάβλητες καθώς και η χωρική κατανομή τους.

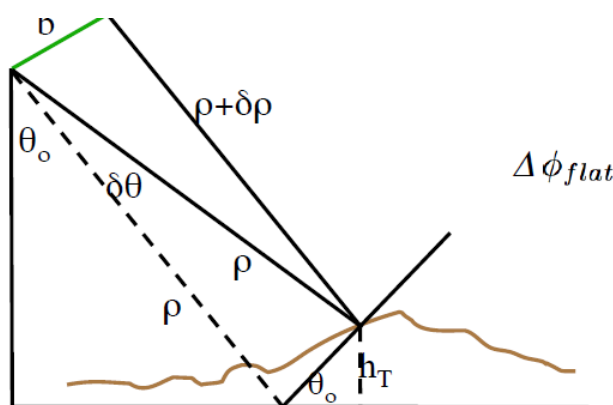
#### 4.3.6. Αφαίρεση του όρου της Επίπεδης Γης (Flat earth removal)

Στο στάδιο αυτό αφαιρείται και ο όρος επίπεδης Γης (Geudtner, 1996) με αποτέλεσμα την εξομαλυμένη συμβολομετρική φάση (flattened interferometric phase). Το στάδιο αυτό είναι σημαντικό κυρίως για τον μετέπειτα σωστό μετασχηματισμό της φάσης σε υψόμετρο (§4.3.10).

Η διαδικασία αφαίρεσης του όρου επίπεδης γης καλείται Flattening και αφαιρούνται οι κροσσοί συμβολής της επίπεδης γης ώστε οι κροσσοί συμβολής που θα μείνουν να ακολουθούν την τοπική τοπογραφία. Η φάση λόγω της επίπεδης γης δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta\phi_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda} b_{\perp} \frac{h_T}{\rho \sin\theta_0}$$

Όπου οι όροι φαίνονται στο σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Όρος φάσης επίπεδης γης Πηγή: Paul A Rosen, NASA, 2011

Μετά από το στάδιο αυτό θα αφαιρεθεί ο όρος  $\phi_{flat}$  οπότε θα ισχύει:

$$\phi = \phi_{topo} + \phi_{orbit} + \phi_{mov} + \phi_{atm}$$

δηλαδή η φάση θα ισούται με τις φάσεις που προέρχονται από την τοπογραφία, την εδαφική παραμόρφωση, τα τροχιακά σφάλματα και την ατμόσφαιρα.



#### 4.3.7. Φιλτράρισμα του Συμβολογράμματος (Adaptive filtering)

Μετά τη διαδικασία της δημιουργίας των συμβολογραμμάτων ακολουθεί η εφαρμογή προσαρμοσμένων φίλτρων. Αυτό γίνεται με σκοπό την βελτίωση της ευκρίνειας των κροσσών συμβολής και την μείωση των θορύβων που υπάρχουν λόγω του φαινομένου της κηλίδωσης, της αποσυσχέτισης των απεικονίσεων και του θορύβου που προκαλείται από το RADAR.

Η μείωση της τυπικής απόκλισης της φάσης επιτυγχάνεται με χωρικό φιλτράρισμα και η πιο διαδεδομένη τεχνική είναι αυτή του φιλτραρίσματος κατά συχνότητα σε χωρική βάση με τη βοήθεια του οποίου επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση της ισχύος του σήματος (Goldstein & Werner, 1998).

Τα χωρικά φίλτρα λειτουργούν βάσει ενός παραθύρου στο πεδίο του χώρου το οποίο καθορίζει τον βαθμό εξομάλυνσης των κροσσών συμβολής και την αποτελεσματικότητα του φίλτρου. Όσο πιο μικρό το μέγεθος του παραθύρου, τόσο πιο ομαλή θα είναι η εξομάλυνση και θα επηρεαστούν λιγότερο οι κροσσοί συμβολής. Σημαντικός είναι και ο ορισμός ενός κατωφλιού στην τιμή του θορύβου, ώστε να μην δημιουργούνται τεχνητοί κροσσοί συμβολής, οι οποίοι προκύπτουν σε περιοχές με πολύ θόρυβο.

#### 4.3.8. Δημιουργία Εικόνας Συνάφειας (Coherence generation)

Συμβολομετρική συσχέτιση ή συνάφεια  $\gamma$  καλείται η αναλογία μεταξύ συνεκτικών και μη συνεκτικών αθροισμάτων και εκφράζει το βαθμό ομοιότητας των δύο απεικονίσεων του ζευγαριού:

$$\gamma = \frac{|\sum s_1(x) * s_2(x)^*|}{\sqrt{\sum |s_1(x)|^2 * \sum |s_2(x)|^2}}$$

Όπου  $s_1(x)$  και  $s_2(x)$  αντιστοιχούν στις τιμές των εικονοστοιχείων των δύο SAR συμπροσαρμοσμένων απεικονίσεων και ο τελεστής \* αναφέρεται στον συζυγή μιγαδικό της δεύτερης απεικόνισης.

Η εκτιμώμενη συνάφεια είναι μια συνάρτηση της συστηματικής χωρικής αποσυσχέτισης, του επιπρόσθετου θορύβου και της χρονικής αποσυσχέτισης μεταξύ των δύο απεικονίσεων. Μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 1, όπου το 0 δηλώνει την πλήρη αποσυσχέτιση στην περιοχή, ενώ το 1, το οποίο είναι και αδύνατο να προκύψει, σημαίνει πλήρη ταύτιση με αποτέλεσμα την μη ύπαρξη θορύβου και την βέλτιστη ευκρίνεια των κροσσών συμβολής.

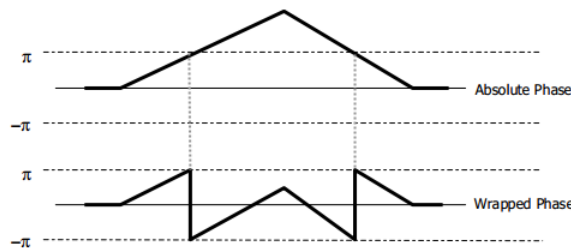
Ουσιαστικά, η δημιουργία μιας εικόνας συνάφειας έχει στόχο να προσδιοριστεί η ποιότητα της μέτρησης, δηλαδή της συμβολομετρικής φάσης, και να εξάγει θεματικές πληροφορίες για ένα αντικείμενο στο έδαφος σε συνδυασμό με τον συντελεστή οπισθοσκέδασης. Συνήθως, φάσεις με τιμές συσχέτισης μικρότερες του 0.2 απορρίπτονται και δεν υπεισέρχονται στις παρακάτω διαδικασίες.

#### 4.3.9. Αποκατάσταση της Φάσης (Phase unwrapping)

Στο συμβολόγραμμα, η φάση παίρνει τιμές στο διάστημα  $[-\pi, \pi)$ , χωρίς να είναι γνωστός ο αριθμός των ακεραίων κύκλων φάσης ( $2\pi$ ) του σήματος. Στο στάδιο της αποκατάστασης της φάσης υπολογίζεται ο άγνωστος αριθμός  $n$  της σχέσης:  $\phi_{unwrapped} = \phi_{int} + n * 2\pi$  (εικόνα 4.3). Τα συμβολογράμματα αφού υποστούν την διαδικασία αυτή ονομάζονται στη συνέχεια ξετυλιγμένα συμβολογράμματα (unwrapped interferograms).

Η διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης είναι σχετικά απλή όταν πρόκειται για τμήματα των εικόνων SAR, στα οποία υπάρχει υψηλή συνάφεια φάσης μεταξύ των δύο εικόνων. Σε περιοχές με υψηλούς θορύβους, με παραποιημένο σήμα, με χαμηλή συνάφεια φάσης καθώς επίσης και σε περιπτώσεις κακής δειγματοληψίας στην καταγραφή πρωτογενών δεδομένων, π.χ. εξαιτίας απότομων κλίσεων το εδάφους, η διαδικασία αυτή δυσκολεύει.

Βασική υπόθεση των αλγορίθμων αποκατάστασης φάσης είναι η διαφορά της εκτυλιγμένης φάσης μεταξύ δύο διαδοχικών εικονοστοιχείων να μην είναι μεγαλύτερη από  $\pi$ , δηλαδή:  $[\phi_i - \phi_{i-1}] < \pi$ . Παρ' όλ' αυτά, πολλές φορές εμφανίζονται άλματα φάσης (phase jumps) μεγαλύτερα του  $\pi$  που οδηγούν σε εμφάνιση υπολειμματικής φάσης (residual phase), τα οποία προέρχονται λόγω φαινομένων αναστροφής και σκίασης. Το αποτέλεσμα, λοιπόν, εξαρτάται από την επιλογή της διαδρομής και αν αυτή θα περνάει από τέτοια κρίσιμα σημεία.



Εικόνα 4.3: Διάγραμμα αποκατάστασης φάσης Πηγή: Sarmar, August 2009

Έχουν αναπτυχθεί πολλοί αλγόριθμοι εκτύλιξης, οι οποίοι καθορίζουν τον τρόπο και τη διαδρομή της εκτύλιξης. Μερικοί από αυτούς είναι οι μέθοδοι τοπικής ανάπτυξης (region growing- Xu and Cumming, 1996), ελαχίστων τετραγώνων (Least square), minimum cost flow (Constantini, 1996), fringe detection (Lin et al., 1992) καθώς επίσης και υβριδικές μέθοδοι, οι οποίες διακρίνονται σε αυτές που προκύπτουν από σύνθεση αλγορίθμων (synthesis algorithm - Zebker and Lu, 1998; Fornano and Sansosti, 1999) και σε αυτές των επικαλυπτόμενων παραθύρων (hybrid phase unwrapping with overlapping windows - Schwarz, 2004).

#### 4.3.10. Μετατροπή της Φάσης σε Υψόμετρο (Phase to height conversion)

Η τελευταία διαδικασία της συμβολομετρίας, που αποτελεί και στόχο της είναι η εξαγωγή της υψομετρικής πληροφορίας, δηλαδή η μετατροπή της αποκατεστημένης φάσης σε υψόμετρα στο σύστημα του ραντάρ. Για το στάδιο αυτό, απαιτείται η γνώση τουλάχιστον

ενός σημείου γνωστών συντεταγμένων. Με τη βοήθεια των σημείων αυτών γίνεται η μετατροπή των σχετικών υψομέτρων που υπολογίζονται σε απόλυτα υψόμετρα.

Πριν την μετατροπή της φάσης σε υψόμετρα, απαραίτητος κρίνεται ο επαναπροσδιορισμός της θέσης και του προσανατολισμού της βάσης και των τροχιακών δεδομένων με τη χρήση των σημείων γνωστών συντεταγμένων. (Small et al., 1993).

Τα σημεία που απαιτούνται για τη διαδικασία αυτή είναι σημεία εύκολα εντοπίσιμα, όπως τεχνητοί στόχοι, γωνίες υδάτινων επιφανειών, κορυφογραμμές και άλλα αναγνωρίσιμα σημεία σε απεικονίσεις SAR. Τα καλύτερα σημεία γνωστών συντεταγμένων είναι οι τεχνητοί τριγωνικοί ανακλαστήρες, οι οποίοι όμως έχουν μεγάλο κόστος κατασκευής και τοποθέτησης.

Η μετατροπή της φάσης σε υψόμετρο θα γίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi \Delta h * B_{\perp}}{\lambda R \sin\theta}$$

η οποία θεωρεί την επιφάνεια της γης επίπεδη. Αυτή η θεώρηση εισάγει πολλά σφάλματα, γι' αυτό και στη μελέτη Geudtner et al (1996) προτείνεται η θεώρηση της γης σαν μια επιφάνεια ελλειψοειδούς.

Τέλος, μερικά λογισμικά δέχονται και άλλα αρχεία σαν βοηθητικά πέρα από ένα ή περισσότερα σημεία γνωστών συντεταγμένων. Για παράδειγμα, το λογισμικό SARscape έχει ενσωματώσει αλγόριθμο που απαιτεί ΨΜΕ για την εξαγωγή της υψομετρικής πληροφορίας.

#### 4.3.11. Γεωκωδικοποίηση (Geocoding)

Γεωκωδικοποίηση καλείται το τελευταίο στάδιο της συμβολομετρίας, στο οποίο μετατρέπεται η απεικόνιση SAR από τη γεωμετρία που ήδη έχει σε μια χαρτογραφική προβολή. Γίνεται διάκριση μεταξύ της διαδικασίας πάνω στο ελλειψοειδές, στην οποία δεν χρησιμοποιείται Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους και στη διαδικασία γεωκωδικοποίησης στο έδαφος, στην οποία χρησιμοποιείται ΨΜΕ.

Ο μόνος ενδεδειγμένος τρόπος για τη διαδικασία αυτή είναι η προσέγγιση Doppler. Τα SAR δεδομένα προκαλούν μη γραμμικές συμπιέσεις και γι' αυτό δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλά πολυώνυμα για την μετατροπή σε χαρτογραφικό σύστημα όπως συμβαίνει σε οπτικές εικόνες.

Για κάθε εικονοστοιχείο πρέπει να ισχύουν τα εξής:

$$R^2 = |S - P|^2 = (S_x - P_x)^2 + (S_y - P_y)^2 + (S_z - P_z)^2$$

Και

$$f_D = \frac{2 * f_0 * (v_p - v_s) * R_s}{c * |R_s|}$$

Όπου  $R_s$ : η πλάγια απόσταση

$S, P$ : τα διανύσματα θέσης πλατφόρμας και στόχου

$v_p, v_s$ : οι ταχύτητες της πλατφόρμας και του στόχου

$c$ : η ταχύτητα του φωτός

$f_D$ : η συχνότητα Doppler

Με τη βοήθεια αυτών των εξισώσεων υπολογίζονται η σχέση μεταξύ του δέκτη και κάθε οπισθοσκεδαζόμενου σημείου και οι σχετικές τους ταχύτητες και επομένως λαμβάνονται υπόψη τα τοπογραφικά σφάλματα (πτύχωση, σμίκρυνση) καθώς επίσης και η επίδραση της περιστροφής της Γης.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η γεωαναφορά είναι το τελικό στάδιο της συμβολομετρίας, ώστε να μετασχηματιστούν όλα τα τελικά προϊόντα σε μια συγκεκριμένη χαρτογραφική προβολή. Για την βελτίωση των τελικών προϊόντων απαιτείται καλή ποιότητα γεωαναφοράς των απεικονίσεων ώστε να μην εισαχθούν περαιτέρω σφάλματα στη διαδικασία.

#### **4.4.Εφαρμογές της Συμβολομετρίας**

Η τεχνική της συμβολομετρίας, την τελευταία δεκαετία έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα, γι' αυτό και χρησιμοποιείται ευρέως από την επιστημονική κοινότητα. Μερικές από τις εφαρμογές που βρίσκει η τεχνική αυτή παρουσιάζονται παρακάτω.

##### **Ανακατασκευή του Ψηφιακού Μοντέλου Επιφανείας**

ΨΜΕ είναι η ψηφιακή αναπαράσταση των υψομέτρων της επιφάνειας μιας περιοχής. Τα Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους αποτελούν πρωταρχικής σημασίας δεδομένα, αναγκαία για ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών σε τομείς όπως το περιβάλλον, η ενέργεια, οι υδραυλικές μελέτες ο έλεγχος πλημμυρών, οι μελέτες τεχνικών έργων κλπ.

Τα πρώτα χρόνια που αξιοποιήθηκε η τεχνική της Συμβολομετρίας για την παραγωγή ΨΜΕ τα αποτελέσματα δεν ήταν ενθαρρυντικά διότι οι ακρίβειες που επιτεύχθηκαν ήταν ιδιαίτερα μικρές (μερικά δεκάδες μέτρα). Σήμερα όμως, είναι δυνατή η δημιουργία ΨΜΕ παγκόσμιας κλίμακας με μέγεθος εικονοστοιχείου 12m με ακρίβεια που φτάνει στα 2m (απόλυτη: ακρίβεια που προκύπτει από τη σύγκριση των δεδομένων με άλλα δεδομένα αναφοράς καλύτερης ακρίβειας) ή 10m (σχετική: ακρίβεια μεταξύ των τιμών των δεδομένων στο ίδιο σύνολο δεδομένων) από την αξιοποίηση των δεδομένων των αποστολών TerraSAR – X / TANDEM - X.

Για παράδειγμα στην εικόνα 4.4, το παρακάτω ΨΜΕ της Ελβετίας καλύπτει περιοχή περίπου 41.000 τετραγωνικά χιλιόμετρα και ύψη από 200μ έως 4650μέτρα. Κατασκευάστηκε από 70 σκηνές ERS, 22 descending και 13 ascending και έχει προβληθεί στο Ελβετικό χαρτογραφικό σύστημα με απόσταση καννάβου 25 μέτρα.



Εικόνα 4.4: Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας Ελβετίας Πηγή: Sarmap, August 2009

#### **Παρακολούθηση τεκτονικών μικρομετακινήσεων**

Η συστηματική μελέτη των σεισμικά ενεργών ρηγμάτων απαιτεί τη μέτρηση και την παρακολούθηση των μακροπρόθεσμων παραμορφώσεων της επιφάνειας της Γης που προκαλούνται κατά τη διάρκεια διαφόρων σεισμών και των βραχυπρόθεσμων παραμορφώσεων που συνδέονται με τη σεισμική δραστηριότητα κατά μήκος συγκεκριμένων ρηγμάτων.

Από περίπου το 1990 με την εμφάνιση των δορυφορικών συστημάτων ραντάρ, η τεχνική της Συμβολομετρίας SAR χρησιμοποιείται σαν ένα νέο μέσο για την μελέτη των ενεργών τεκτονικών μικρομετακινήσεων και παραμορφώσεων. Η χρήση της παρέχει νέες δυνατότητες παρακολούθησης των αλλαγών της γήινης επιφάνειας σε χρονικά διαστήματα από μέρες σε έτη με ακρίβειες της τάξης των μερικών χιλιοστών. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι η τεχνική αυτή παρέχει τις εν λόγω δυνατότητες παρακολούθησης των μεταβολών της επιφάνειας ουσιαστικά σε ολόκληρη την έκταση της περιοχής μελέτης και όχι σε μεμονωμένα συγκεκριμένα σημεία, όπως με άλλες γεωδαιτικές τεχνολογίες (GPS). Έτσι υιοθετείται μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την περιοχή μελέτης.

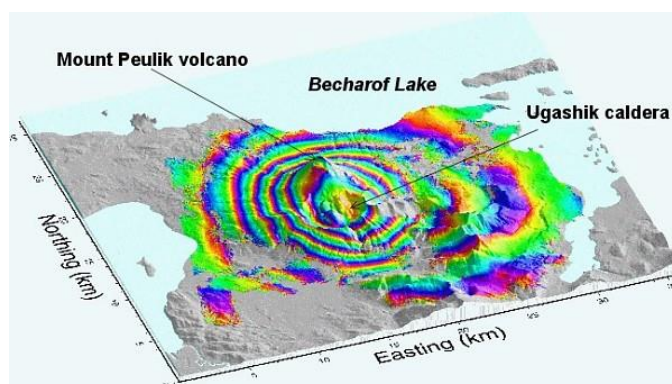
#### **Μελέτη Καθιζήσεων**

Καθιζήσεις ή άλλες σημαντικές παροδικές ή μόνιμες παραμορφώσεις των εδαφών δημιουργούνται συχνά από την εκτεταμένη εξόρυξη ορυκτών, την άντληση νερού ή ενεργειακών κοιτασμάτων (π.χ. πετρελαίου, φυσικού αερίου) από το υπέδαφος και πολλές φορές οδηγούν σε καταστρεπτικές συνέπειες. Οι μετρήσεις Συμβολομετρίας SAR επιτρέπουν την παρακολούθηση της διαχρονικής συμπεριφοράς των εδαφών σε περιοχές που επηρεάζονται από τέτοιες ανθρωπογενείς επιδράσεις. Τέτοιο παράδειγμα είναι η άντληση υδάτων σε περιοχές, οι οποίες με την βοήθεια της συμβολομετρίας παρουσιάζουν καταβύθιση του εδάφους μερικά εκατοστά.

#### **Μελέτες Ηφαιστειών**

Οι περιοχές που βρίσκονται κοντά σε ενεργά ηφαιστεια υφίστανται συνεχείς παραμορφώσεις του γήινου φλοιού. Η τεχνική της δορυφορικής Συμβολομετρίας έχει δείξει ότι μπορεί να παράγει μια συνολική εικόνα της παραμόρφωσης της γήινης επιφάνειας ολόκληρης της περιοχής ενδιαφέροντος και όχι απλά μεμονωμένων σημείων. Έτσι μπορεί να διαπιστωθεί αν υπάρχει κάποια καθίζηση ή ανύψωση της περιοχής πλησίον του ηφαιστείου. Αν για παράδειγμα, διαπιστωθεί ένα «φούσκωμα» γύρω από ηφαιστειο αυτό

πολύ πιθανό να οφείλεται σε συσσώρευση μάγματος κάτω από την επιφάνεια της Γης. Τέτοιες πληροφορίες αποτελούν σημαντικούς παράγοντες πρόγνωσης ηφαιστειακών εκρήξεων ή άλλων επικίνδυνων καταστάσεων εξ αιτίας των πολύπλοκων γεωλογικών και γεωφυσικών διεργασιών που τις προκαλούν (εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5: Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας Ελβετίας Πηγή: Peulik volcano, Alaska, 1996-1998, USGS

#### 4.5.Λογισμικά

Για την επεξεργασία SAR απεικονίσεων και την εξαγωγή συμβολομετρικών προϊόντων υπάρχουν σήμερα πολλά λογισμικά, είτε ελεύθερα είτε εμπορικά. Μια λίστα αυτών φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 4.2:

Λογισμικό	Ελεύθερο / Εμπορικό	Developed by	Website
DIAPASON	Εμπορικό	French Space Agency (CNES) - Altamira	<a href="http://www.altamira-information.com/html/index.php">http://www.altamira-information.com/html/index.php</a>
GAMMA SAR	Εμπορικό	Gamma Remote Sensing	<a href="http://www.gamma-rs.ch">www.gamma-rs.ch</a>
IMAGINE InSAR	Εμπορικό	Leica Geosystems	<a href="http://imagine-insar-enhancement.software.informer.com/">http://imagine-insar-enhancement.software.informer.com/</a>
SARscape	Εμπορικό	Sarmap s.a.	<a href="http://www.sarmap.com">www.sarmap.com</a>
ROI_PAC (DInSAR)	Ελεύθερο	NASA's Jet Propulsion Laboratory and Caltech	<a href="http://www.openchannelfoundation.org/projects/ROI_PAC/">www.openchannelfoundation.org/projects/ROI_PAC/</a>
Doris (DInSAR)	Ελεύθερο	Delft University of Technology	<a href="http://doris.tudelft.nl/">http://doris.tudelft.nl/</a>
StaMPS	Ελεύθερο	Stanford Uni., Delft Uni., Uni. Of Iceland	<a href="http://radar.tudelft.nl/~ahoop/stamps/index.html">http://radar.tudelft.nl/~ahoop/stamps/index.html</a>
RAT (Radar Tools)	Ελεύθερο	Technical University of Berlin	<a href="http://radartools.berlios.de/">http://radartools.berlios.de/</a>
Pulsar	Εμπορικό	Phoenix Systems for UNIX based platforms.	<a href="http://www.phoenixsystems.co.uk">http://www.phoenixsystems.co.uk</a>

Πίνακας 4.2: Λογισμικά που χρησιμοποιούνται για Συμβολομετρία

#### **4.6. Παράγοντες που Επηρεάζουν την Συμβολομετρία**

Σαφώς η ακρίβεια της τεχνικής της συμβολομετρίας που παρουσιάστηκε παραπάνω, επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, μερικοί από τους οποίους αναφέρονται και αναλύονται παρακάτω:

##### Τροχιά

Η θέση και η ταχύτητα της πλατφόρμας κάθε χρονική στιγμή καθορίζεται από την ακριβή γνώση της τροχιάς του. Από τη γνώση των τροχιακών δεδομένων καθορίζεται η τιμή της γεωμετρικής γραμμής βάσης. Συνεπώς, εμφανίζονται σφάλματα λόγω ανακρίβειας του προσδιορισμού της τροχιάς του δορυφόρου.

##### Ατμόσφαιρα

Η επίδραση της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας επηρεάζει σημαντικά την συμβολομετρική διαδικασία, λόγω συστατικών όπως σύννεφα, θερμοκρασία, υδρατμοί και πίεση. Ειδικότερα, σημαντικός παράγοντας είναι η ύπαρξη υδρατμών στην τροπόσφαιρα. Όσο αυξάνεται η πίεση, η θερμοκρασία και η υγρασία στην ατμόσφαιρα, τόσο αυξάνεται και η χρονική καθυστέρηση της φάσης.

Για την απαλοιφή της ατμόσφαιρας χρησιμοποιούνται πολλές προσεγγίσεις, οι οποίες μπορούν να μειώσουν την επίδραση της ατμόσφαιρας μέχρι και 40%. Μπορεί να γίνει σωστή επιλογή των δεδομένων SAR, ώστε να μην υπάρχει μεγάλη χρονική διαφορά μεταξύ των εικόνων επομένως να μην έχουν μεταβληθεί σημαντικά οι ατμοσφαιρικές συνθήκες. Άλλη μέθοδος είναι η χρησιμοποίηση επίγειων μετεωρολογικών δεδομένων, δεδομένων GPS ή μετεωρολογικών μοντέλων. Τέλος, η μέθοδος Stacking μειώνει την επίδραση της ατμόσφαιρας ομαλοποιώντας στατιστικά ανεξάρτητα συμβολογράμματα.

##### Επεξεργασία

Η επεξεργασία των απεικονίσεων που γίνεται από τα διάφορα λογισμικά επηρεάζει το τελικό προϊόν της συμβολομετρίας. Βασικά στάδια, στα οποία πρέπει να δοθεί μεγάλη σημασία, λόγω του ότι υπεισέρχονται μεγάλα σφάλματα τα οποία επηρεάζουν το αποτέλεσμα είναι το φιλτράρισμα λόγω κηλίδωσης, η αποκατάσταση φάσης, η σωστή διαδικασία της συμπροσαρμογής των εικόνων (coregistration) και τα σφάλματα λόγω αφαίρεσης της τοπογραφίας.

##### Γραμμή βάσης (Χωρική αποσυσχέτιση)

Γραμμή βάσης όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι η απόσταση μεταξύ των δύο διαφορετικών λήψεων. Όσο μεγαλώνει η απόσταση αυτή, τόσο διαφορετικές είναι οι γεωμετρικές λήψεις. Η γραμμή βάσης πρέπει να είναι μικρότερη από την κρίσιμη βάση, η οποία αποτελεί το όριο ώστε να μπορεί να γίνει η διαδικασία της συμβολομετρίας. Η κρίσιμη βάση εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης, το μήκος κύματος, την πλάγια απόσταση και τη διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση της πλάγιας απόστασης.

Επίσης, η γραμμή βάσης σχετίζεται με την συνάφεια μεταξύ των εικόνων. Όσο πιο διαφορετικές είναι οι γεωμετρίας λήψης των εικόνων, τόσο λιγότερη συνάφεια θα υπάρχει.

Τέλος, στη διαδικασία της συμπροσαρμογής (coregistration) (κεφάλαιο 4.3.4) συνδυάζονται τα εικονοστοιχεία της πρωτεύουσας με τα αντίστοιχα της δευτερεύουσας εικόνας. Το σφάλμα που απομένει μετά την διαδικασία αυτή είναι περίπου ανάλογο της ομοιότητας της γεωμετρίας των δύο εικόνων. Αποτέλεσμα της λανθασμένης συμπροσαρμογής είναι η λάθος αντιστοιχία των εικονοστοιχείων των δύο εικόνων και επομένως οι χαμηλές τιμές συνάφειας άρα και λανθασμένα αποτελέσματα.

#### Χρονική αποσυσχέτιση

Η χρονική αποσυσχέτιση είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζει έντονα την διαδικασία της συμβολομετρίας και οφείλεται στο γεγονός ότι αλλάζει η σκέδαση των στόχων. Αυτό εξαρτάται άμεσα από το είδος της περιοχής ενδιαφέροντος και από την εφαρμογή της συμβολομετρίας.

Για εφαρμογές διαφορικής συμβολομετρίας επιλέγονται εικόνες με μεγάλες χρονικές διαφορές μεταξύ τους (χρόνια) επειδή σκοπός της τεχνικής είναι η διαχρονική μελέτη παραμόρφωσης του εδάφους. Για εφαρμογές με σκοπό την εξαγωγή υψομετρικής πληροφορίας, οι εικόνες πρέπει να εμφανίζουν μικρή χρονική διάρκεια μεταξύ τους για τον περιορισμό του φαινομένου.

Η χρονική αποσυσχέτιση είναι σχεδόν ανύπαρκτη σε χέρσες περιοχές με χαμηλή υγρασία. Σε δασικές περιοχές με υψηλό ποσοστό υγρασίας, ο παράγοντας αυτός επηρεάζει αρνητικά την συμβολομετρία και η χρονική αποσυσχέτιση μπορεί να εμφανιστεί ακόμα και αν οι εικόνες έχουν μικρή χρονική απόσταση μεταξύ τους. Στις δασικές περιοχές προτείνεται να χρησιμοποιούνται εικόνες που έχουν ληφθεί ίδιες εποχές ώστε να εμφανίζονται τα ίδια χαρακτηριστικά (κλαδιά, πράσινο κλπ). Τέλος, σε περιοχές με πάγους, η χρονική αποσυσχέτιση είναι μικρή για μικρό χρονικό διάστημα, αλλά μεγαλώνει όσο αυξάνεται η χρονική απόσταση μεταξύ των εικόνων λόγω μετακινήσεων και τήξης του πάγου.



## 5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η επεξεργασία που έγινε στην παρούσα διπλωματική εργασία και αφορά στην περιοχή μελέτης. Για την επεξεργασία των δορυφορικών απεικονίσεων και την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκαν δύο λογισμικά, το SARscape και το StaMPS [Hooper, 2006].

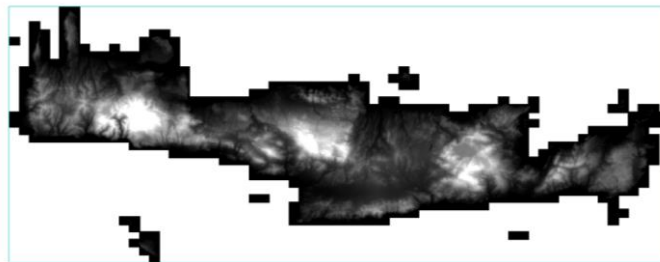
### 5.1. Δεδομένα

Για την έναρξη της επεξεργασίας έπρεπε αρχικά να αποκτηθούν τα δεδομένα, τα οποία είναι οι απεικονίσεις από το δορυφορικό σύστημα ERS1 και ERS2 από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος καθώς επίσης και ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.

- Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους:

Ένα ακριβές Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) είναι απαραίτητο σε πολλά σημεία της επεξεργασίας. Για την επιτυχή έκβαση της επεξεργασίας, χρησιμοποιήθηκε ένα DEM που λήφθηκε από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. με μεγάλη ακρίβεια, μιας και το άλλο διαθέσιμο ήταν της αποστολής SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), το οποίο για την Ελλάδα έχει χωρική ανάλυση 90m και είναι διαθέσιμο στο διαδίκτυο από το International Centre of Tropical Agriculture.

Το DEM που δόθηκε από το ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε είναι χωρικής ανάλυσης 5μέτρα\*5μέτρα στο σύστημα ΕΓΣΑ'87 και φαίνεται στην εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1: Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας Κρήτης Πηγή: ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε, 2014

Λόγω του ότι οι δορυφορικές απεικονίσεις είναι ανάλυσης 20\*20, το DEM γίνεται αναδειγματοληψία (resampling) με επιθυμητό μέγεθος εικονοστοιχείου 20 μέτρα μέσω του λογισμικού ArcGIS και κόβεται στην περιοχή μελέτης για μείωση του χώρου και χρόνου επεξεργασίας.

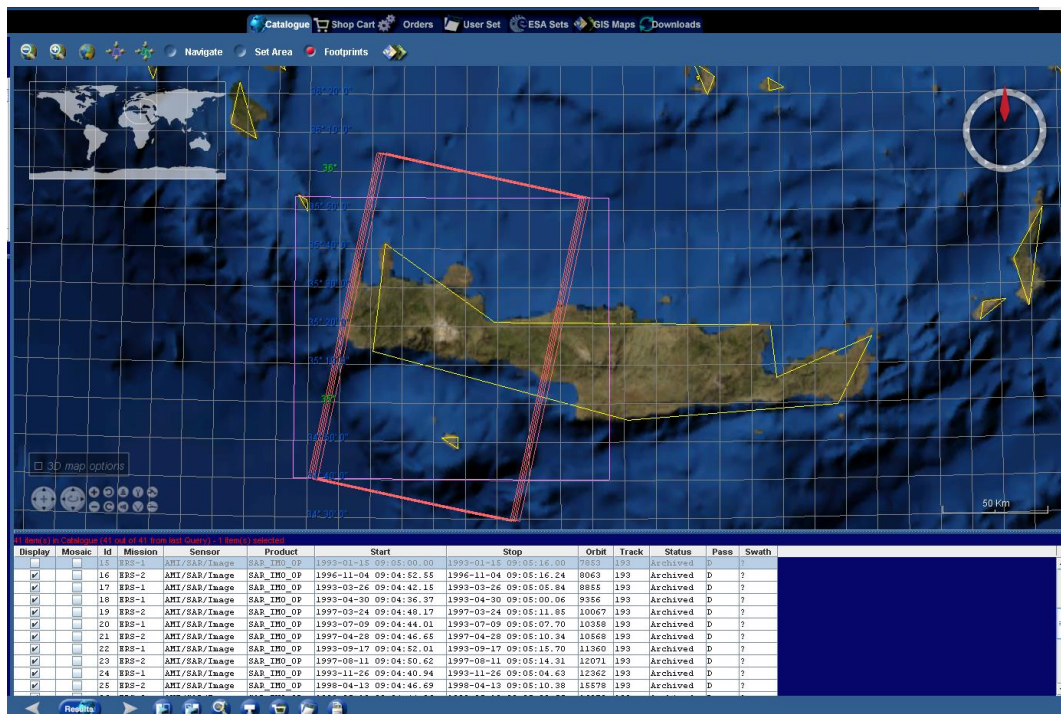
- SAR απεικονίσεις:

Η περιοχή μελέτης για την παρούσα διπλωματική εργασία είναι η Δυτική Κρήτη, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2. Έτσι έγινε η παραγγελία 11 απεικονίσεων από τον ERS1 και 28 από τον ERS2 για την τροχιά 193 από το 1992 έως το 2001 που διακόπηκε η λειτουργία των δορυφόρων. Η αναζήτηση των δεδομένων έγινε από την εφαρμογή Eolisa του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA) και εικόνες που αποκτήθηκαν φαίνονται στον πίνακα 5.1.

Ημερομηνία	Δορυφόρος	Τροχιά	Πορεία Λήψης
28/08/1992	ERS 1	193	Καθοδική (Descending)
02/10/1992	ERS 1	193	Καθοδική (Descending)
06/11/1992	ERS 1	193	Καθοδική (Descending)
11/12/1992	ERS 1	193	Καθοδική (Descending)
30/04/1993	ERS 1	193	Καθοδική (Descending)
09/07/1993	ERS 1	193	Καθοδική (Descending)
17/09/1993	ERS 1	193	Καθοδική (Descending)
26/11/1993	ERS 1	193	Καθοδική (Descending)
23/04/1995	ERS 1	193	Καθοδική (Descending)
02/07/1995	ERS 1	193	Καθοδική (Descending)
07/08/1995	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
11/09/1995	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
16/10/1995	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
25/12/1995	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
03/03/1996	ERS 1	193	Καθοδική (Descending)
17/06/1996	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
22/07/1996	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
26/08/1996	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
30/09/1996	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
04/11/1996	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
24/03/1997	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
28/04/1997	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
11/08/1997	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
13/04/1998	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
18/05/1998	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
22/06/1998	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
27/07/1998	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
31/08/1998	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
05/10/1998	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
14/12/1998	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
22/02/1999	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
03/05/1999	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
29/11/1999	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
03/01/2000	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
13/03/2000	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
26/06/2000	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
13/11/2000	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
18/12/2000	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)
24/09/2001	ERS 2	193	Καθοδική (Descending)

Πίνακας 5.1: Απεικονίσεις SAR που χρησιμοποιήθηκαν

Στην εικόνα 5.2 φαίνεται στο περιβάλλον του λογισμικού Eolisa, η περιοχή μελέτης που ενδιαφέρει η οποία ταυτίζεται τις απεικονίσεις της τροχιάς 193 που παραγγέλθηκαν.



Εικόνα 5.1: Απεικονίσεις SAR που παραγγέλθηκαν Πηγή: Eolisa

Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν τροχιακά δεδομένα PRC (Precise) για τους δορυφόρους ERS1 και ERS2, τα οποία αποκτήθηκαν από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος.

## 5.2. Λογισμικό SARscape - Επεξεργασία

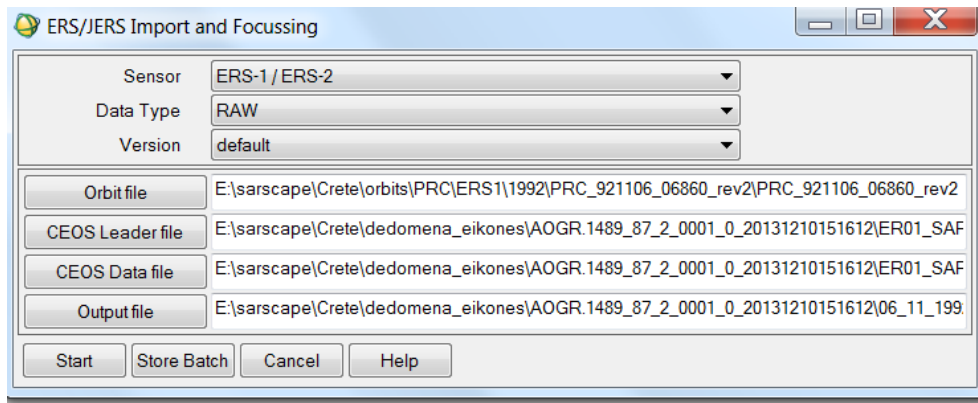
Αρχικά, για παραγωγή χαρτών και άλλες γεωχωρικές διαδικασίες χρησιμοποιήθηκε το ArcGIS και για τη συμβολομετρική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε το SARscape v. 5.1, το οποίο είναι επιπρόσθετο (module) στο λογισμικό ENVI.

Στόχος της εργασίας αυτής είναι η εξαγωγή ενός προϊόντος-χάρτη ετήσιου ρυθμού εδαφικής μετατόπισης για χρονικό διάστημα επιλέχτηκε (1992-2001) με τη μέθοδο των υποσυνόλων μικρών βάσεων (§4.2.5).

Στα παρακάτω κεφάλαια αναλύονται τα βήματα της διαδικασίας της μεθόδου υποσυνόλων μικρών βάσεων, όπως αυτά εκτελέστηκαν με βάση τα βήματα του λογισμικού SARscape.

### 5.2.1. Εισαγωγή και Εστίαση (Import & Focusing)

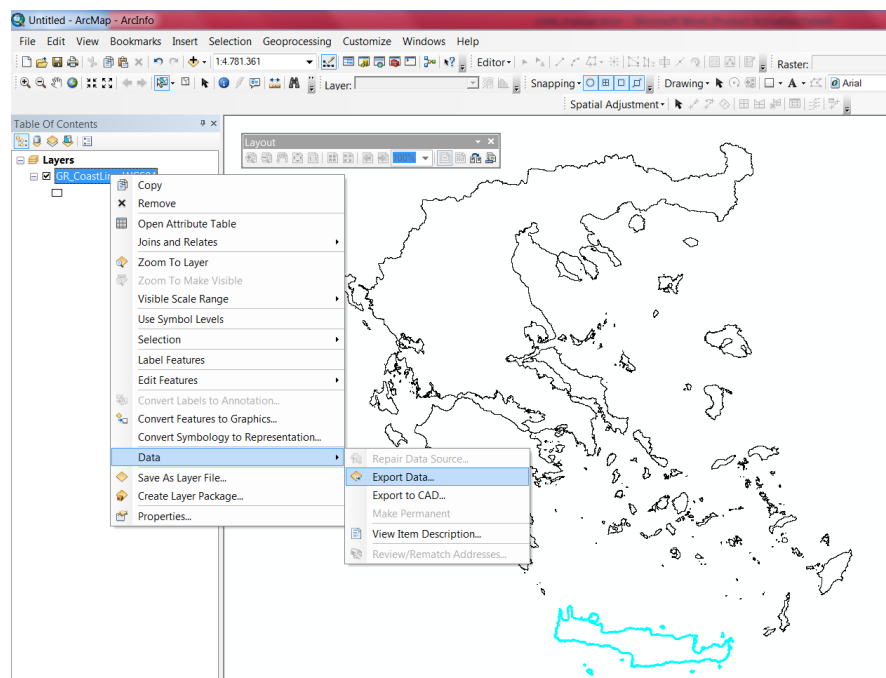
Για να χρησιμοποιηθούν οι εικόνες που αποκτήθηκαν στο λογισμικό SARscape πρέπει αρχικά να εισαχθούν και να εστιαστούν κατάλληλα. Έτσι εισάγονται τα δεδομένα level 0 (RAW εικόνες) και τα τροχιακά δεδομένα PRC και μετατρέπονται οι απεικονίσεις σε μορφή SLC (Single Look Complex), μορφή διαχειρίσιμη για το λογισμικό. Η διαδικασία της εστίασης περιλαμβάνει την εξαγωγή των παραμέτρων της εικόνας από τα μετά-δεδομένα, την εκτίμηση του φάσματος, την ανίχνευση και διόρθωση των γραμμών που λείπουν, την εκτίμηση της ανάλυσης της Doppler ασάφειας και την συμπίεση του εύρους (range) και του αζιμούθιου.



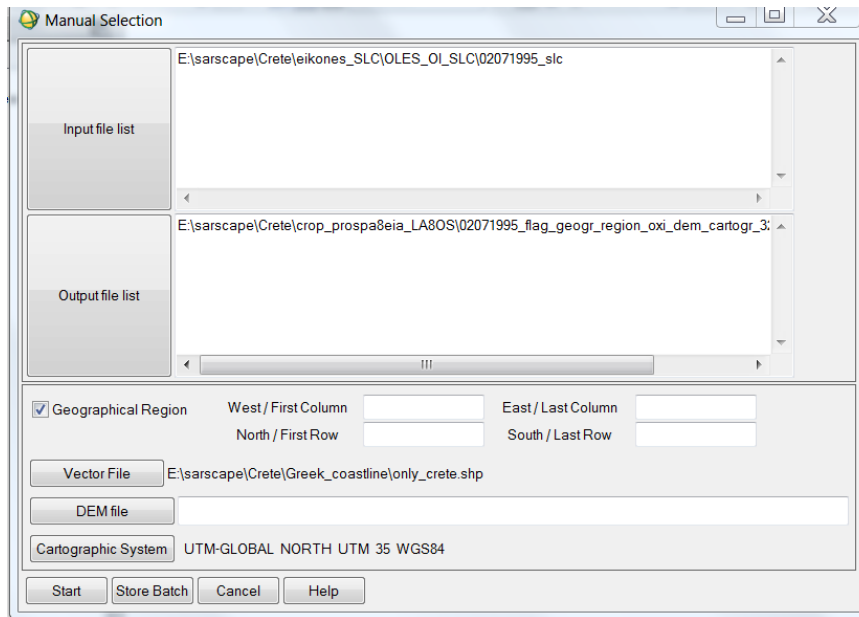
Εικόνα 5.3: Διαδικασία εισαγωγής και εστίασης εικόνων

### 5.2.2. Περικοπή (Cropping)

Για να μειωθεί ο χρόνος και ο όγκος της επεξεργασίας κόβονται όλες οι εικόνες SLC και το ΨΜΕ κατά μήκος ενός shapefile που απεικονίζει την ακτογραμμή της Ελλάδας (εικόνα 5.4). Οι εικόνες SAR γίνονται Multilooked με αριθμό looks στη διεύθυνση του αζιμουθίου (Azimuth Looks) ίσο με 5 και κατά την πλάγια διεύθυνση (Range Looks) ίσο με 1 (5x1 για ERS) με τη βοήθεια του SARscape και έπειτα κόβονται στα όρια του shapefile με το εργαλείο *Manual Selection* του ENVI (εικόνα 5.5)



Εικόνα 5.4: Ακτογραμμή Ελλαδικού Χώρου Πηγή: ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε., 2014



Εικόνα 5.5: Διαδικασία περικοπής εικόνων

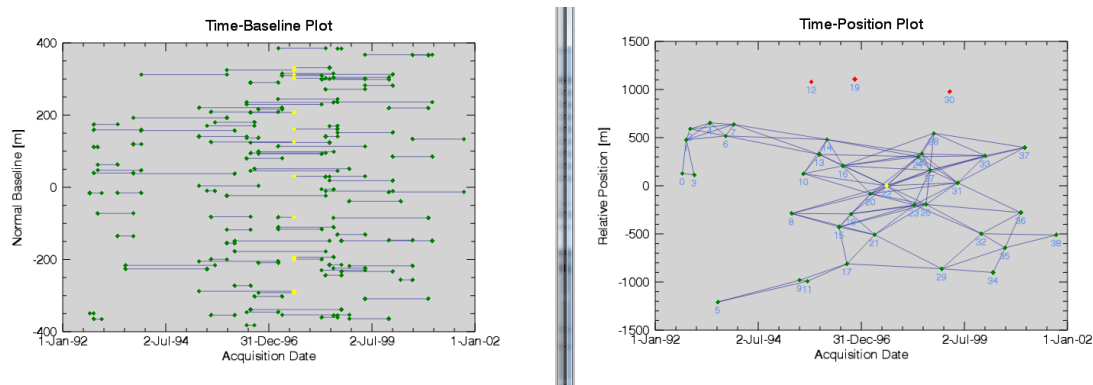
Η διαδικασία αυτή είναι αρκετά χρονοβόρα αλλά μειώνεται ο όγκος των δεδομένων καθώς και ο χρόνος επεξεργασίας στα παρακάτω βήματα.

### 5.2.3. Διάγραμμα Δικτύου Συνδέσεων (Connection Graph)

Σε αυτό το βήμα της διαδικασίας ορίζονται τα ζευγάρια των εικόνων που θα συνδυαστούν για να εκτελεστεί η διαδικασία SBAS. Αυτά τα ζεύγη εμφανίζονται ως συνδέσεις σε ένα δίκτυο που συνδέει κάθε απεικόνιση με τις υπόλοιπες. Όταν δίνονται  $N$  απεικονίσεις, οι μέγιστες θεωρητικά διαθέσιμες συνδέσεις είναι  $(N * (N-1)) / 2$ .

Έτσι ορίστηκαν τα όρια της χρονικής διαφοράς των εικόνων σε  $[0,900]$  μέρες και τα όρια της διαφοράς της γραμμής βάσης σε  $[0,42]$  % ποσοστό επί τοις εκατό της κρίσιμης γραμμής βάσης. Σύμφωνα με την φασματική θεωρία, η κρίσιμη γραμμή βάσης αλλάζει ανάλογα με εύρος ζώνης στην πλάγια διεύθυνση (χωρική ανάλυση στην πλάγια διεύθυνση), γι' αυτό και στο βήμα αυτό της διαδικασίας SBAS λαμβάνεται υπόψη το ποσοστό επί της κρίσιμης γραμμής βάσης του κάθε ζεύγους.

Δεν ορίστηκε Super Master εικόνα, αφού η επιλογή αυτής δεν επηρεάζει καθόλου τα τελικά αποτελέσματα. Αντίθετα, με το να οριστεί από τον χρήστη υπάρχει το ρίσκο του να επιλεγεί μια απεικόνιση με λίγες συνδέσεις. Ουσιαστικά, η Super Master εικόνα είναι αυτή που θα χρησιμοποιηθεί για εικόνα αναφοράς για να γίνει η συμπροσαρμογή (coregistration) των υπολοίπων με βάση τη γεωμετρία της Super Master.



Εικόνα 5.6: Διάγραμμα συνδέσεων: Χρόνου-Σχετικής θέσης (αριστερά) και Χρόνου-Γραμμής βάσης (δεξιά)

Με πράσινο χρώμα εμφανίζονται οι επιλεγμένες εικόνες, με κίτρινο η Super Master και με κόκκινο αυτές που έχουν απορριφθεί. Εμφανίζονται δύο διαγράμματα: ένα Χρόνου-Σχετικής θέσης (αναφορικά με τη Super Master) και ένα Χρόνου-Γραμμής βάσης.

Το διάγραμμα Χρόνου-Σχετικής θέσης βοηθάει στην κατανόηση αν το δίκτυο είναι ομοιογενές ή όχι. Κάθε εικόνα πρέπει να είναι συνδεδεμένη με όσο το δυνατόν περισσότερες εικόνες.

Το δίκτυο συνδέσεων που επιλέχθηκε (εικόνα 5.6) είναι αρκετά ομοιογενές, αφού υπάρχουν αρκετές συνδέσεις μεταξύ των εικόνων, κάτι που μειώνει τα σφάλματα στην διαδικασία. Επίσης, δεν παρατηρούνται ξεχωριστά μπλοκ συσχετισμένων εικόνων που να είναι αποκομμένες από το υπόλοιπο δίκτυο, γεγονός που θα προκαλούσε την μείωση των συμβολογραμμάτων που θα δημιουργούνταν. Τρεις από τις εικόνες τελικά αφαιρούνται από την διαδικασία λόγω μεγάλων διαφορών γραμμής βάσης.

#### 5.2.4. Ροή Συμβολομετρικών Εργασιών (Interferometric Workflow)

Στο βήμα αυτό παράγεται ένα πλήθος από εκτυλιγμένα διαφορικά συμβολογραφήματα, τα οποία ορίστηκαν στο προηγούμενο βήμα. Εδώ ορίζονται όλες οι παράμετροι για να γίνουν οι κατάλληλες διεργασίες (εικόνα 5.7).

Αρχικά, επιλέγονται οι παράγοντες για την επεξεργασία Multi-looking σε διεύθυνση αζιμούθιου και στην πλάγια διεύθυνση. Για βελτίωση της ραδιομετρικής πληροφορίας που πετυχαίνεται με τη διαδικασία του Multilooking υπάρχει ταυτόχρονα μια υποβάθμιση σε χωρική ανάλυση. Σε αυτή τη διαδικασία το SARscape δημιουργεί αρχεία που περιέχουν την ένταση (intensity) του κάθε εικονοστοιχείου. Για τις εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία ισχύει για τον υπολογισμό των looks:

Pixel Spacing Rg= 7.90489028

Pixel Spacing Az= 3.99676727

Incidence Angle  $\approx 23^\circ$

Ground Range Pixel Spacing = Pixel Spacing Rg / sin(Incidence Angle) = 20.231

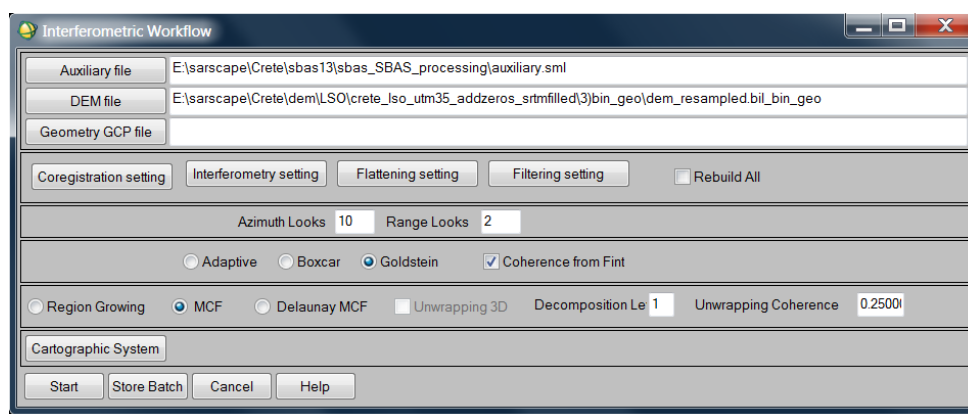
Οπότε για ένα εικονοστοιχείο των 20 μέτρων, ένα σωστό multilooking θα είναι:

Multi-look range: 1 (ή 2)

Multi-look azimuth: Ground Range Pixel Spacing/ Pixel Spacing Az=5 (ή 10)

Επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν 2 Range Looks και 10 Azimuth Looks.

Έπειτα γίνεται η συμπροσαρμογή (coregistration) όλων των εικόνων με βάση τη γεωμετρία της Super Master. Στη διαδικασία αυτή γίνεται εγγραφή μιας εικόνας πάνω στην εικόνα αναφοράς και περιλαμβάνει τη μεταβολή της θέσης κάθε εικονοστοιχείου της δευτερεύουσας εικόνας βάσει της Super Master και ο επαναυπολογισμός της φάσης και του πλάτους του σήματος για όλα τα εικονοστοιχεία στις νέες θέσεις με παρεμβολή (4.3.4). Στο πρώτο στάδιο, δηλαδή στην χοντρική συμπροσαρμογή, η ετεροσυσχέτιση γίνεται με μέγεθος παραθύρου 256\*512 και στην ακριβή συμπροσαρμογή είναι 32\*32 κατά πλάγια διεύθυνση και κατά διεύθυνση αζιμουθίου.



Εικόνα 5.7: Ροή συμβολομετρικών εργασιών

Στη συνέχεια, παράγονται τα συμβολογράμματα μεταξύ όλων των επιλεγμένων ζευγαριών. Μετά από αυτήν την διαδικασία παράγεται και το επίπεδο συσχέτισης (coherence) και εφαρμόζεται και ένα επιλεγμένο φίλτρο στο κάθε διαφορικό συμβολόγραμμα. Ο υπολογισμός της συνάφειας αποτελεί ένα δείκτη της ποιότητας της φάσης. Το φίλτρο καταφέρνει να μειώσει το θόρυβο λόγω της μικρής χρονικής ή χωρικής συσχέτισης μεταξύ των δύο εικόνων. Το φίλτρο που επιλέχθηκε είναι το Goldstein, το οποίο προτάθηκε από τους Goldstein & Werner (1998) και μεγιστοποιεί την ισχύ του σήματος σε σχέση με αυτή του θορύβου. Έτσι βελτιώνεται η εμφάνιση των κροσσών συμβολής και συνίσταται για συμβολομετρικά ζεύγη με χαμηλή συνάφεια.

Επίσης, στο στάδιο αυτό γίνεται και αφαίρεση του όρου της επίπεδης γης (διαδικασία flattening), χρησιμοποιώντας το διαθέσιμο ΨΜΕ αντί μιας ελλειψοειδούς επιφάνειας. Η χρησιμοποίηση ενός ΨΜΕ μεγάλης ακρίβειας είναι σαφώς καλύτερη από την χρήση μιας απλής επιφάνειας αναφοράς για την απομάκρυνση των κροσσών συμβολής και την απλοποίηση των επόμενων σταδίων της συμβολομετρίας.

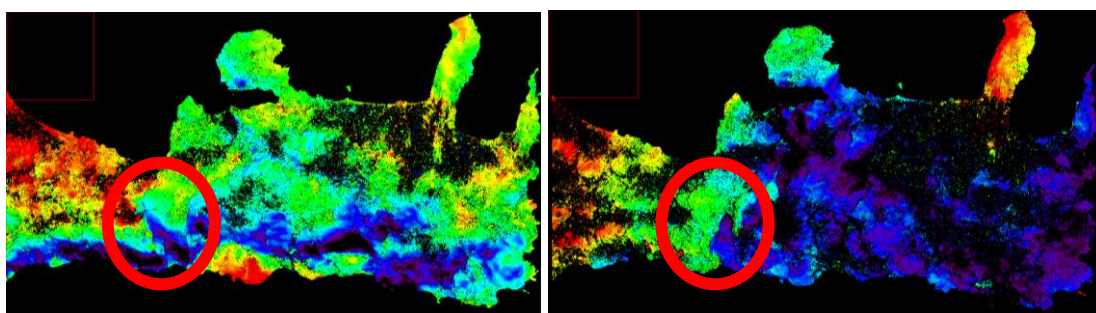
Τέλος, πολύ σημαντικό είναι να οριστεί ο αλγόριθμος με τον οποίο θα γίνει η εκτύλιξη της συμβολομετρικής φάσης. Από το λογισμικό προτείνεται ο αλγόριθμος Delaunay MCF. Η μέθοδος αυτή λειτουργεί καλά για τη σύνδεση των ομάδων υψηλής συσχέτισης με άλλες υποομάδες υψηλής συσχέτισης, κάτι το οποίο συναντάται συχνά σε υγρές περιοχές ή περιοχές πρασίνου. Παρ' όλα αυτά προκαλεί προβλήματα σε περιπτώσεις με υψηλή εναπομένουσα τοπογραφία ή με μεγάλη εδαφική παραμόρφωση.

Τελικά, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος MCF (Minimum Cost Flow), λόγω του ότι ο αλγόριθμος Delaunay MCF δημιουργούσε αρκετές ασυνέχειες φάσης (phase jumps) στα ξετυλιγμένα συμβολογράμματα. Ο επιλεγμένος αλγόριθμος είναι κατάλληλος για την αποκατάσταση της φάσης σε περιοχές με χαμηλή συνάφεια. Επιπρόσθετα, ορίστηκε η τιμή 0.15 ως κατώφλι για τη συνάφεια, δηλαδή φάσεις με τιμές συσχέτισης μικρότερες του 0.15 απορρίπτονται και δεν υπεισέρχονται στις παρακάτω διαδικασίες.

Εξίσου σημαντικός παράγοντας είναι το Decomposition level (DCL). Όσο αυξάνεται το DCL, βοηθάει μακροσκοπικά στο αποτέλεσμα καθώς επίσης στην ταχύτητα του λογισμικού αλλά μπορεί να δημιουργηθούν τοπικές ασυνέχειες σε σημεία που οι κροσσοί συμβολής ξετυλιγούνται πολύ γρήγορα. Γι' αυτό προτείνεται να χρησιμοποιηθεί DCL ίσο με 1 για την πρώτη αποκατάσταση φάσης που γίνεται σε αυτό το στάδιο της διαδικασίας.

Μετά την ολοκλήρωση του βήματος αυτού, γίνεται αξιολόγηση όλων των φιλτραρισμένων και όλων των εκτυλιγμένων συμβολογραμμάτων. Με τη βοήθεια του εργαλείου Edit Connection Graph αφαιρούνται όλοι οι συνδυασμοί εικόνων που παρουσιάζουν προβληματικά unwrapped interferogramms (εικόνα 5.8). Έτσι αφαιρέθηκαν 15 συμβολογράμματα, τα οποία παρουσίαζαν:

- Είτε χαμηλή συσχέτιση
- Είτε μεγάλες ασυνέχειες στη φάση (Phase jumps)

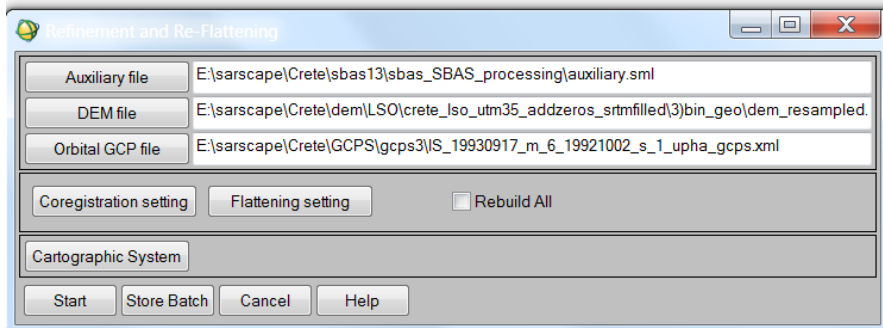


Εικόνα 5.8: Συμβολογράμματα που αφαιρέθηκαν. Ασυνέχεια φάσης.



### 5.2.5. Refinement & Re-Flattening

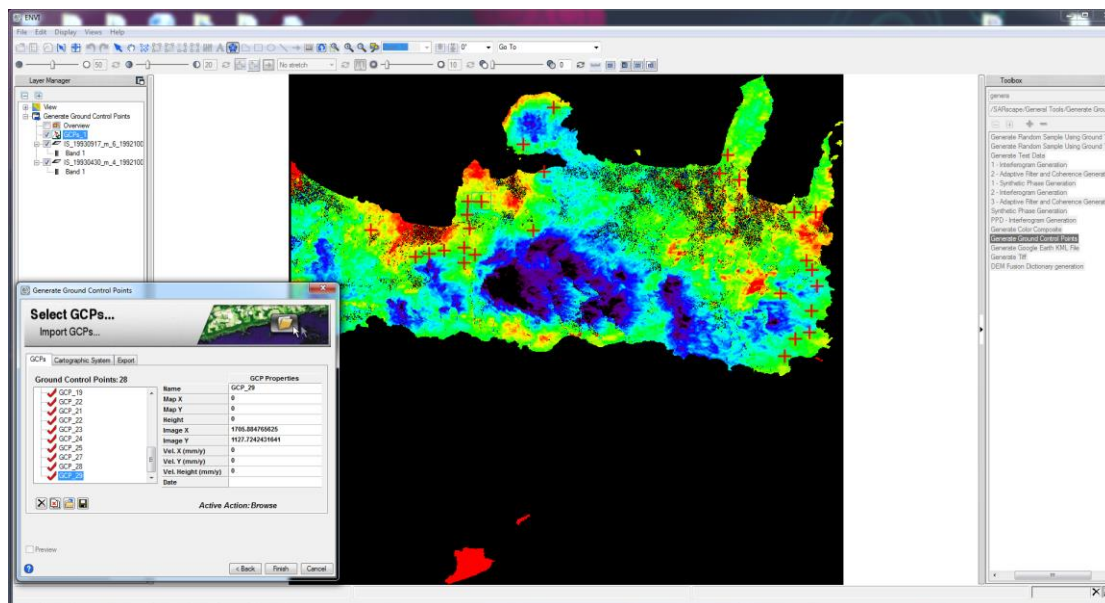
Στο στάδιο αυτό υπολογίζεται και αφαιρείται η εναπομένουσα φάση λόγω τοπογραφίας και οι ράμπες λόγω τροχιακών σφαλμάτων (phase ramps) από τα unwrapped interferograms (εικόνα 5.9).



Εικόνα 5.9: Refinement & Re-Flattening

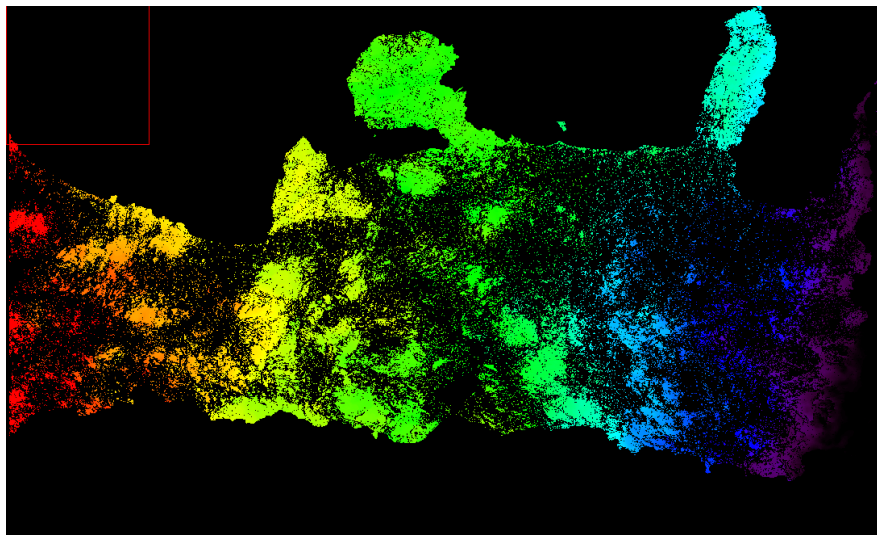
Για το στάδιο αυτό πρέπει να επιλεγούν Σημεία Επίγειου Έλεγχου (GCP's- Ground Control Points) σε ένα αντιπροσωπευτικό ζετυλιγμένο συμβολόγραμμα, ώστε να είναι έγκυρα για όλα τα υπόλοιπα συμβολογράμματα. Τα σημεία αυτά πρέπει να είναι τουλάχιστον 20-30, διότι είναι δύσκολο να ανακτηθούν όλα τα σημεία τέλεια σε όλα τα ζεύγη λόγω διαφορετικής συσχέτισης (εικόνα 5.10). Τα Σημεία Ελέγχου πρέπει να ικανοποιούν τα παρακάτω κριτήρια:

- Να μην υπάρχουν μεγάλες ασυνέχειες φάσης, επειδή θα πρόκειται για λάθος κατά τη διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης.
- Να μην υπάρχουν εναπομείναντες κροσσοί συμβολής λόγω τοπογραφίας
- Να μην είναι πάνω στην περιοχή που αναμένεται η παραμόρφωση, επειδή ο ρυθμός μετατόπισης των σημείων ελέγχου θεωρείται μηδέν.



Εικόνα 5.10: Επιλεγμένα Σημεία Ελέγχου

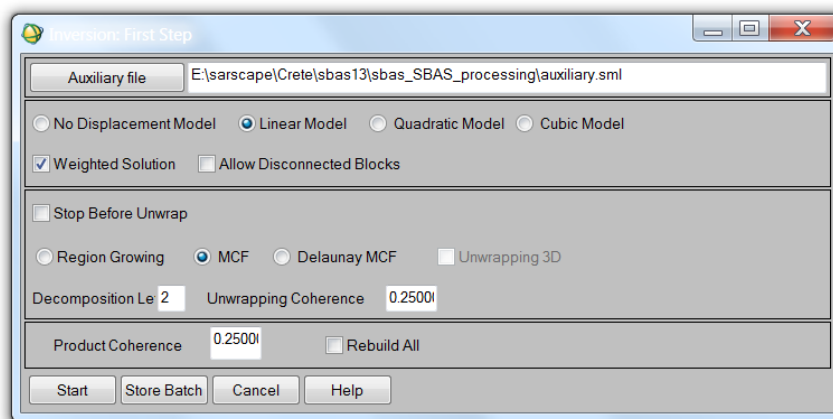
Μετά την ολοκλήρωση του βήματος αυτού, γίνεται εκ νέου αξιολόγηση όλων των unwrapped interferograms και αφαιρούνται και πάλι όσα κρίνονται ακατάλληλα (εικόνα 5.11), δηλαδή όσα δεν έχει αφαιρεθεί η εναπομένουσα φάση λόγω τοπογραφίας. Στην περίπτωση μας αφαιρέθηκαν 12 ζευγάρια μέσω του εργαλείου *Edit Connection Graph*.



Εικόνα 5.11: Συμβολόγραμμα που αφαιρέθηκε. *Phase ramp*

### 5.2.6. Πρώτη Αντιστροφή (First Inversion)

Σε αυτή τη φάση της διαδικασίας εφαρμόζεται μια πρώτη αντιστροφή Kernel και έτσι ανακτάται μια πρώτη εκτίμηση του ρυθμού παραμόρφωσης και της εναπομένουσας τοπογραφίας. Γίνεται για δεύτερη φορά μια αποκατάσταση φάσης για το κάθε ζεύγος με σκοπό την βελτίωση των εισαγόμενων στοιχείων στο επόμενο βήμα.



Εικόνα 5.12: Επεξεργασία πρώτης αντιστροφής

Επιλέγεται ένα γραμμικό μοντέλο, το οποίο είναι πιο σταθερό και έχει τη δυνατότητα να δουλεύει υπό οποιεσδήποτε συνθήκες (robust), μιας και τα άλλα μοντέλα απαιτούν συμβολογράμματα υψηλής συσχέτισης για να εκτελεστούν σωστά. Ο γενικός τύπος για το γραμμικό μοντέλο είναι:

Phase =  $(H_{res} * K_1) + (V * T_1 * 4\pi / \lambda)$ , όπου

Phase: η φάση των εισερχόμενων συμβολογραφημάτων

$H_{res}$ : το εναπομένον ύψος λόγω τοπογραφίας που πρόκειται να εκτιμηθεί

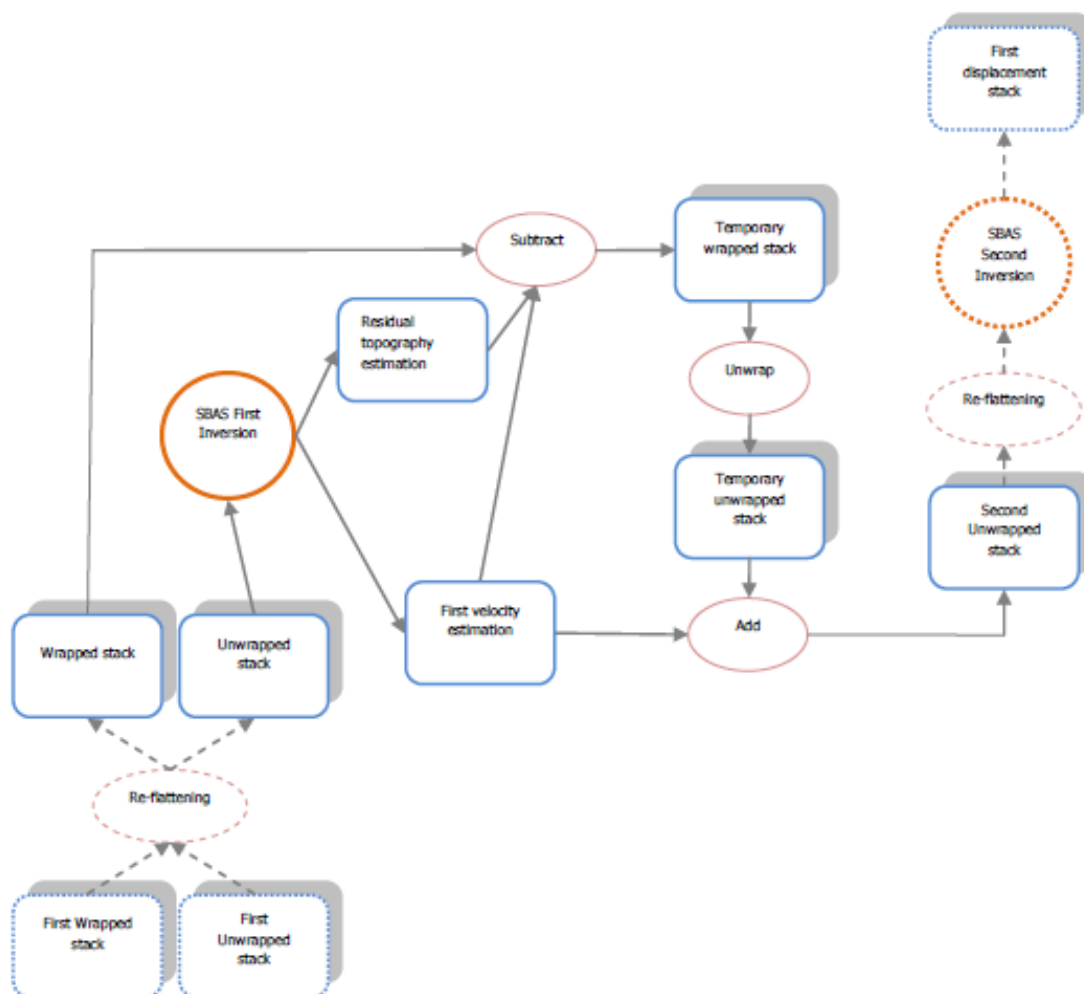
$K_1$ : η αναλογικότητα μεταξύ της γραμμής βάσης και της υπολειμματικής τοπογραφίας, η οποία προσεγγίζεται ως γραμμική εξάρτηση και εκτιμάται pixel-by-pixel με αριθμητικό τρόπο, τόσο ακριβείς όσο το DEM είναι πιο κοντά στην πραγματική τοπογραφία

V: ο κατά μέσο όρο ρυθμός παραμόρφωσης που θα εκτιμηθεί

T: ο χρόνος μεταξύ των δύο απεικονίσεων

$\lambda$ : το μήκος κύματος του δέκτη.

Επίσης, σε αυτό το στάδιο επιλέγεται και πάλι το *Decomposition Level (DCL)* κατά τη διάρκεια του δεύτερου ξετυλίγματος φάσης (phase unwrapping). Το δεύτερο unwrapping γίνεται στα «τυλιγμένα» συμβολογράμματα από τα οποία έχει αφαιρεθεί η προσέγγιση της εναπομένουσας τοπογραφίας και η πρώτη εκτίμηση της ταχύτητας. Γι' αυτό υπάρχουν λιγότεροι κροσσοί συμβολής, οπότε το DCL μπορεί να αυξηθεί σε 2. Μετά το τέλος του δεύτερου unwrapping, προσθ εται και πάλι η πρώτη εκτίμηση της ταχύτητας και αυτό θα αποτελέσει τα εισερχόμενα δεδομένα στο επόμενο βήμα. Στο σχήμα 5.1 εμφανίζεται ο αλγόριθμος επεξεργασίας του βήματος αυτού.



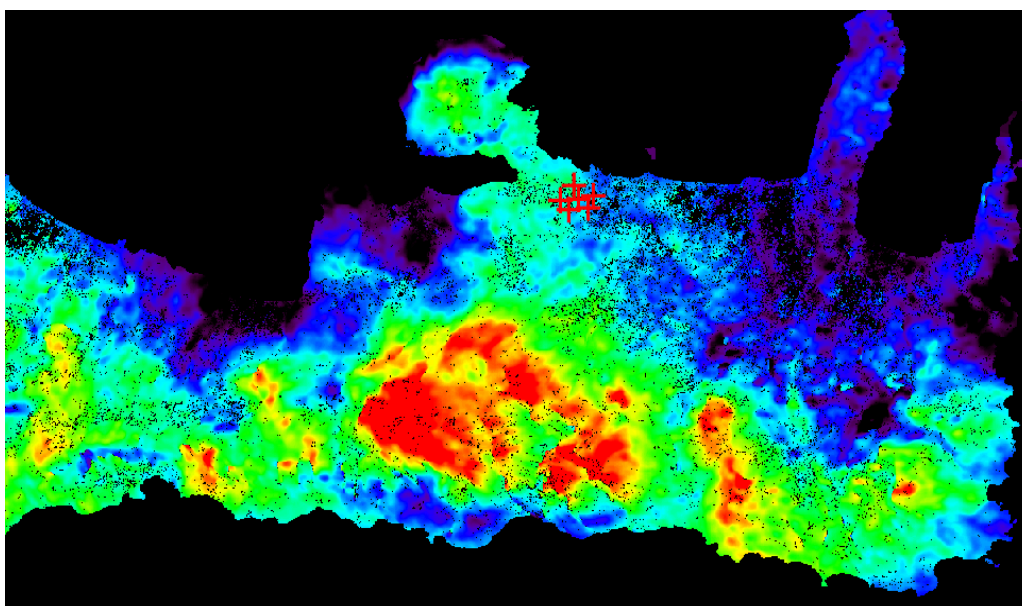
Σχήμα 5.1: Διαδικασία δεύτερης αποκατάστασης φάσης Πηγή: sarpat, 2013

Τέλος, μετά και από αυτό στάδιο αφαιρούνται μερικά άσχημα ή άχρηστα συμβολογράμματα με το εργαλείο *Edit Connection Graph*, τα οποία φαίνονται να αλλοιώνουν την διαδικασία.

### 5.2.7. Δεύτερη Αντιστροφή (Second Inversion)

Το βήμα αυτό εφαρμόζει την Kernel αντιστροφή για να εξαγει την χρονοσειρά παραμόρφωσης. Αφού αφαιρεθεί η πρώτη προσέγγιση της παραμόρφωσης, γίνεται ένα φιλτράρισμα λόγω ατμοσφαιρικής επίδρασης στο σήμα, ώστε να εξαχθούν τα τελικά αποτελέσματα. Η ταχύτητα του σήματος όπως επίσης και η διαδρομή που διανύει το σήμα επηρεάζεται λόγω των διαφορετικών συστατικών της ατμόσφαιρας όπως υδρατμοί, σύννεφα, θερμοκρασία, πίεση (Hanssen, 1998).

Στο στάδιο αυτό ζητείται να οριστεί ένα αρχείο με επίγεια σημεία έλεγχου, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για εκ νέου flattening στη στοίβα με τα unwrapped συμβολογράμματα και ύστερα να προκύψουν οι τελικές χρονοσειρές παραμόρφωσης. Αν έχουν αφαιρεθεί όλες οι ράμπες φάσης, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ένα σημείο έλεγχου ώστε να αφαιρεθεί η εναπομένουσα φάση. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλα τα τελικά αποτελέσματα είναι αναφορικά με αυτά τα σημεία έλεγχου. Επιλέχθηκαν μερικά σημεία έλεγχου στην περιοχή των Χανίων (εικόνα 5.13).

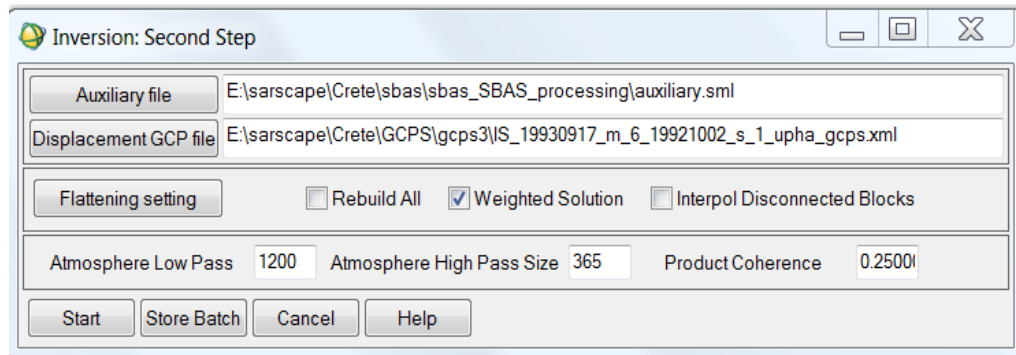


Εικόνα 5.13: Σημεία αναφοράς στην πόλη των Χανίων - SARscape

Επίσης, η εκτίμηση των αποτελεσμάτων λαμβάνει υπόψη και ένα κατώφλι συνάφειας. Τα εικονοστοιχεία που έχουν συνάφεια μεγαλύτερη από αυτό το κατώφλι θα χρησιμοποιηθούν στην αντιστροφή.

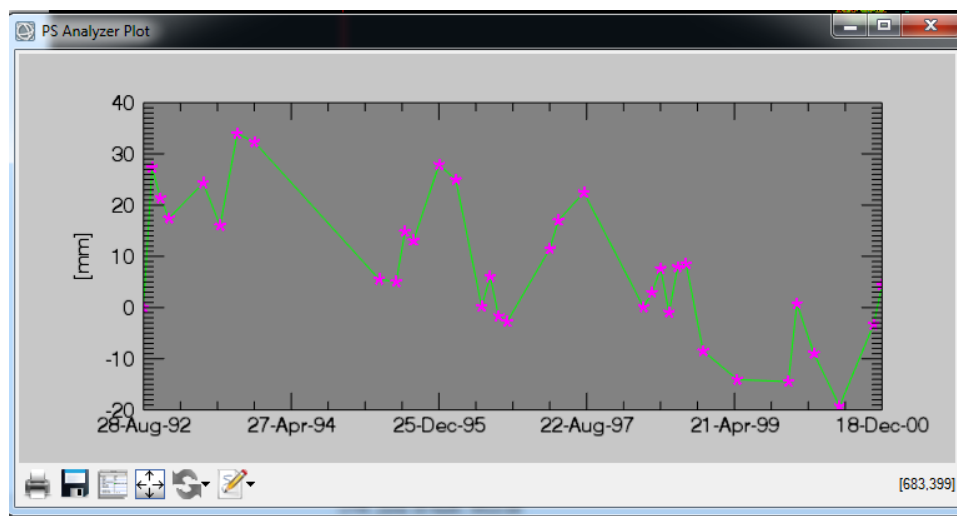
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στο στάδιο αυτό τη επεξεργασίας γίνεται ένα ατμοσφαιρικό φιλτράρισμα, ώστε να εξομαλυνθούν τα αποτελέσματα από μερικές φυσικές ιδιότητες της ατμόσφαιρας. Αυτό το φιλτράρισμα γίνεται με το συνδυασμό ενός βαθυπερατού φίλτρου (low pass filter) με ένα φίλτρο υψηλού χρονικού περάσματος (high pass size). Υπάρχει μια υπόθεση ότι η ατμόσφαιρα έχει μεγάλη χρονική συσχέτιση (1,2 χιλιόμετρα ως προεπιλογή

από το λογισμικό) και μικρή χρονική συσχέτιση (1 έτος ως προεπιλογή). Για να γίνει μεγαλύτερο φιλτράρισμα πρέπει να μειωθούν οι παράμετροι αυτοί, αλλά έτσι δημιουργείται ο κίνδυνος φιλτραρίσματος και της πραγματικής εδαφικής παραμόρφωσης οπότε χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλογές του προγράμματος.



Εικόνα 5.14: Επεξεργασία δεύτερης αντιστροφής

Έτσι, με την ολοκλήρωση αυτού του βήματος εξαγονται οι ταχύτητες του κάθε σημείου ως ένα πολυώνυμο που ταιριάζει στις χρονοσειρές παραμόρφωσης του κάθε σημείου. Με διάφορα εργαλεία του SARscape μπορεί να αναλυθεί η χρονοσειρά για κάθε σημείο ξεχωριστά (εικόνα 5.15)

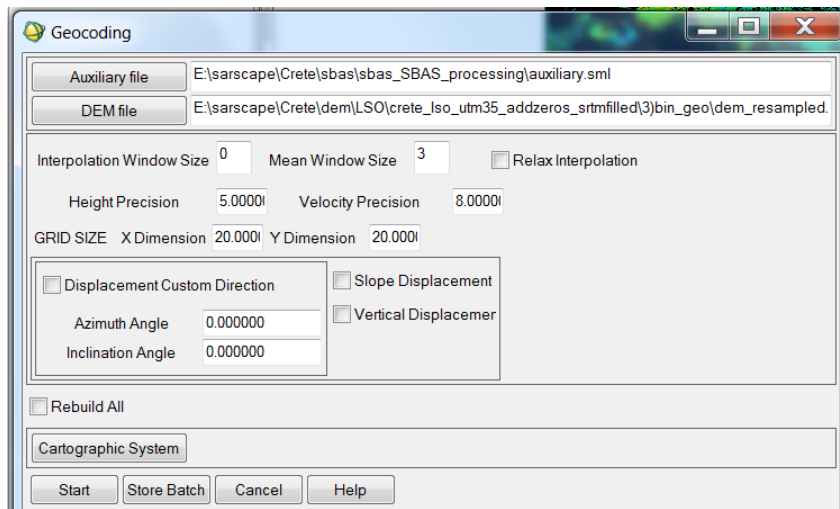


Εικόνα 5.15: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης για ένα σημείο της περιοχής μελέτης-SARscape

Ο σκοπός του φιλτραρίσματος λόγω ατμοσφαιρικής επίδρασης είναι ώστε να εξομαλυνθεί η χρονική υπογραφή παραμόρφωσης λόγω κάποιων ιδιοτήτων της ατμόσφαιρας.

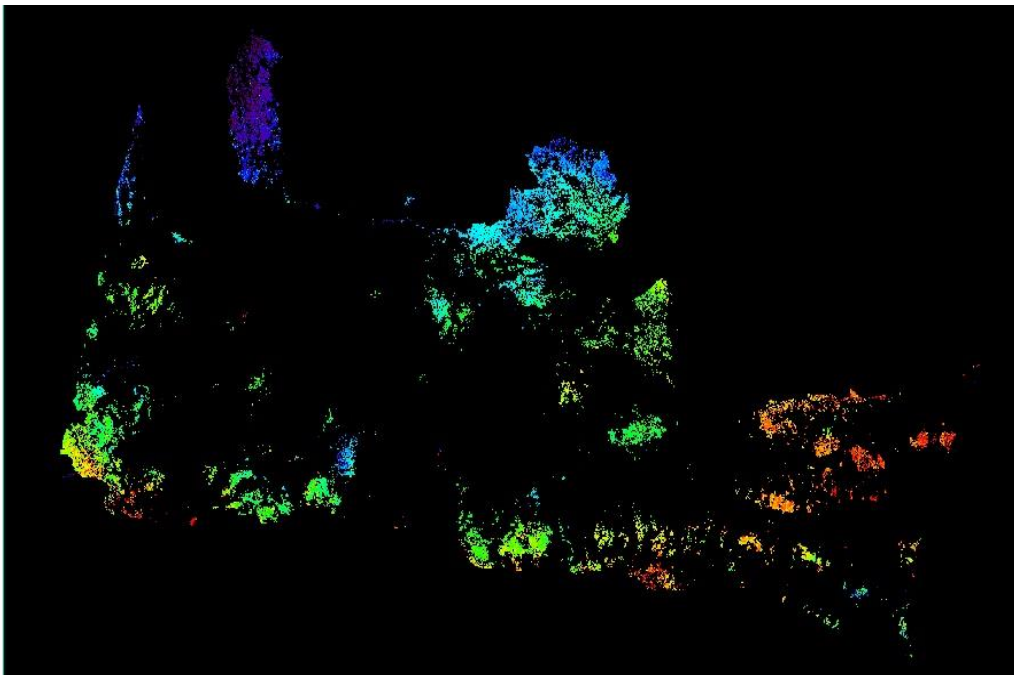
### 5.2.8. Γεωκωδικοποίηση (Geocoding)

Σε αυτό το στάδιο της διαδικασίας, το βήμα αυτό γεωκωδικοποιεί όλα τα αποτελέσματα από την γεωμετρία slant-range που παράχθηκαν στην Πρώτη και στη Δεύτερη Αντιστροφή στο χαρτογραφικό σύστημα του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους που αποκτήθηκε από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε..



*Εικόνα 5.16: Επεξεργασία γεωκωδικοποίησης*

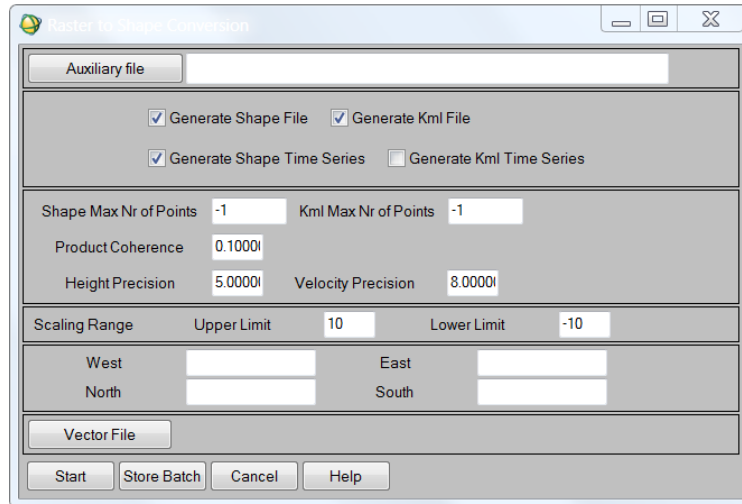
Οι γεωκωδικοποιημένες ταχύτητες παραμόρφωσης της περιοχής μελέτης φαίνονται στην εικόνα 5.17 και αναλύονται περαιτέρω στο κεφάλαιο 5.3. Στην εικόνα 5.17 με μπλε χρώμα εμφανίζονται οι καθιζήσεις και με κόκκινο οι ανυψώσεις.



*Εικόνα 5.17: Γεωκωδικοποιημένες ταχύτητες παραμόρφωσης*

### 5.2.9. Μετατροπή Raster Αρχείων σε Διανυσματικά (Raster to Shape Conversion)

Στο βήμα αυτό μετατρέπονται τα γεωκωδικοποιημένα αποτελέσματα της μεθόδου SBAS σε διανυσματικά αρχεία μορφής shapfile και kml, ώστε να είναι κατάλληλα να επεξεργαστούν σε άλλα λογισμικά (ArcGIS και Google Earth αντίστοιχα).



Εικόνα 5.18: Επεξεργασία Raster to shape conversion

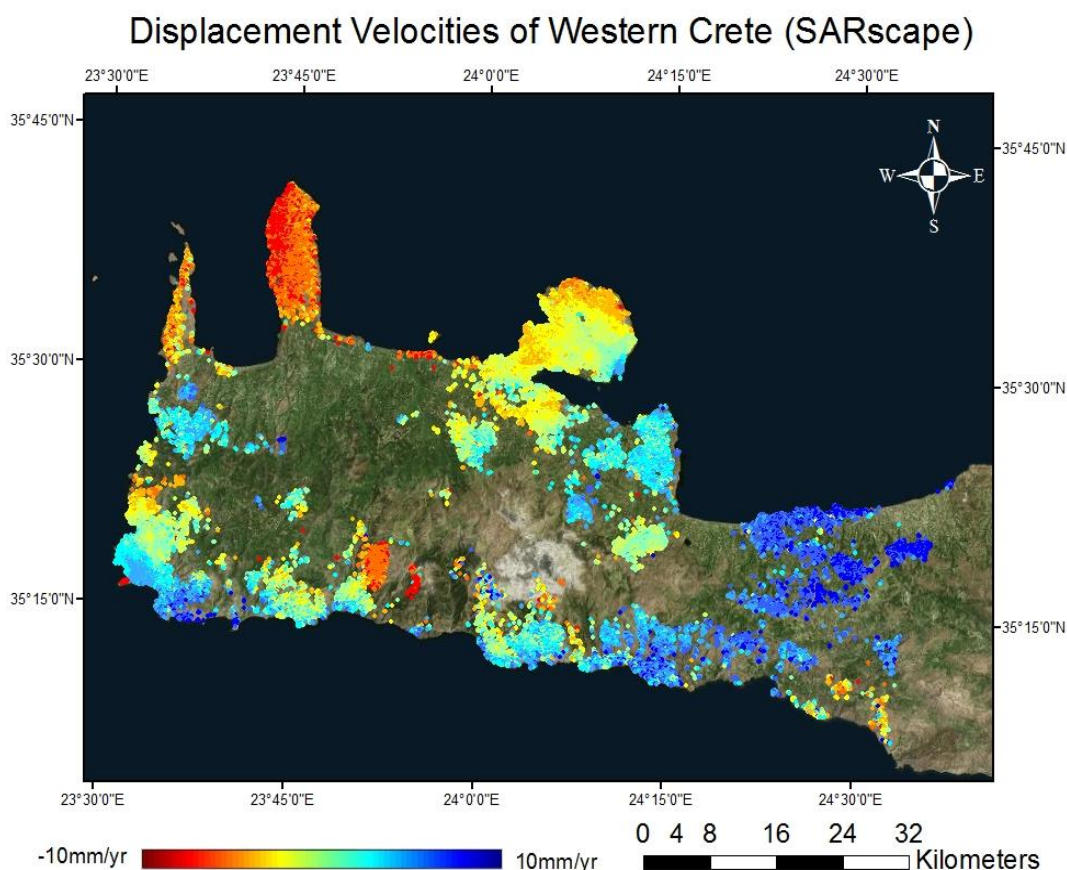
Η μετατροπή αυτή γίνεται για τα εικονοστοιχεία που πληρούν τους περιορισμούς της ακρίβειας γεωκωδικοποίησης και της χρονικής συνάφειας. Το shapfile που δημιουργείται εισάγεται στο ArcGIS για τη δημιουργία χάρτη.

### 5.3.Αποτελέσματα SARscape

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων όπως προέκυψαν από τη διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω (§5.2). Παρατίθεται ο χάρτης εδαφικής παραμορφώσεις (deformation map) για την περιοχή της Δυτικής Κρήτης την περίοδο 1992-2001 (εικόνα 5.19). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η επεξεργασία έγινε με το λογισμικό SARscape αλλά οι χάρτες δημιουργήθηκαν μέσα στο λογισμικό ArcGIS.

Η ανάλυση έγινε σε ευρεία κλίμακα, δηλαδή για την ευρύτερη περιοχή της Δυτικής Κρήτης, αλλά τονίζονται παρακάτω (§6.1) οι παραμορφώσεις σε μερικά συγκεκριμένα σημεία της περιοχής που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, σε τοπική κλίμακα.

Οι όροι ανύψωση και καθίζηση αναφέρονται στην παραμόρφωση κατά την διεύθυνση δορυφόρου-στόχου (Line of Sight-LOS), η οποία έχει μια κλίση  $23^\circ$  ως προς την κάθετο.



*Εικόνα 5.19: Ταχύτητες παραμόρφωσης Δ. Κρήτης - SARscape*

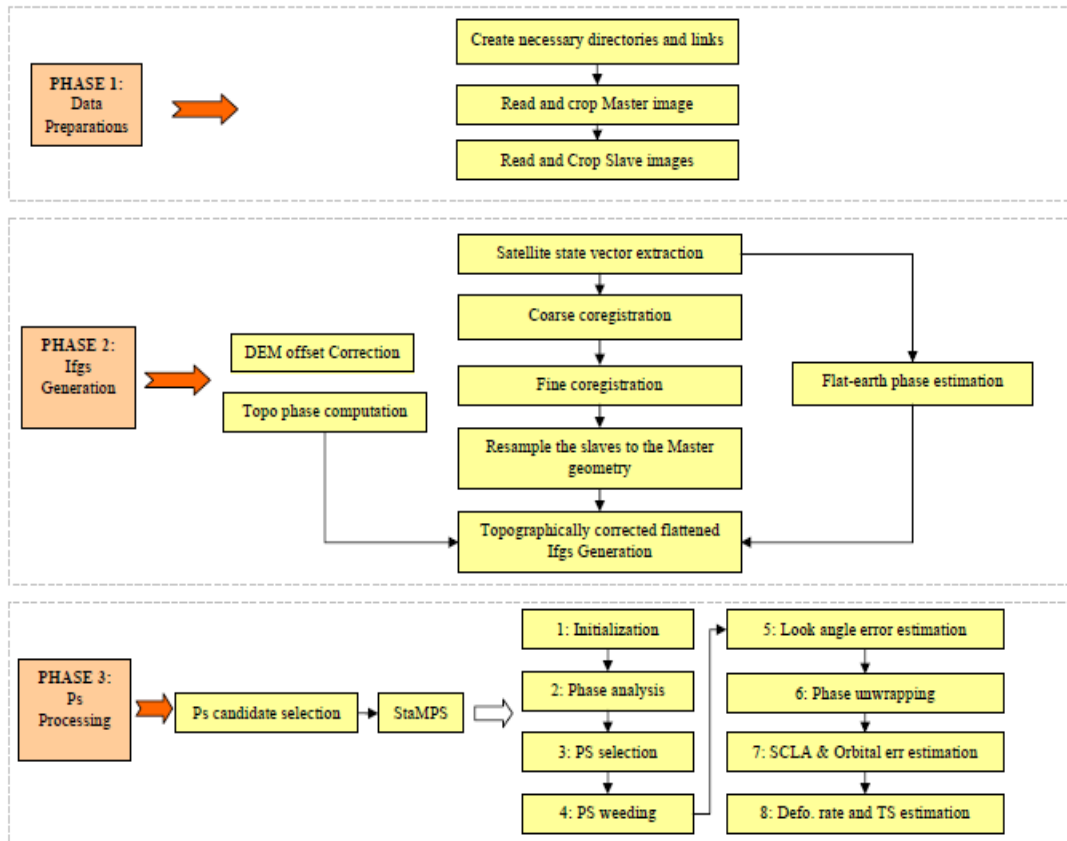
Γενικά, παρατηρείται μια ανύψωση στα νότια παράλια του νησιού της Κρήτης, καθώς και μερικές άλλες ασυνέχειες που οφείλονται σε ύπαρξη ρηγμάτων και αναλύονται στο κεφάλαιο 6.1.

#### **5.4.Λογισμικό StaMPS – Επεξεργασία**

Πέρα από το λογισμικό SARscape, χρησιμοποιήθηκε για επεξεργασία και το ελεύθερο λογισμικό StaMPS [Hooper et al.,2006], του οποίου τα βήματα αναλύονται στις επόμενες παραγράφους. Παραθέτονται επίσης οι εντολές για κάθε στάδιο επεξεργασίας με πλάγια γραφή (*italics*). Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε με το λογισμικό StaMPS, με σκοπό την εξαγωγή χαρτών εδαφικής παραμόρφωσης μεταξύ των ετών 1992 και 2001.

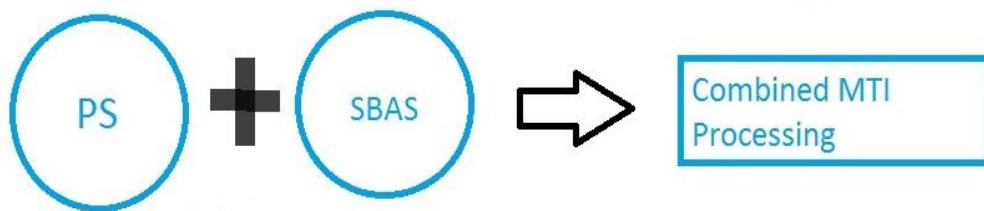


### Steps on StaMPS



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα βημάτων StaMPS

Αρχικά, προσδιορίζονται ταχύτητες παραμόρφωσης με την διαδικασία των σταθερών σκεδαστών (σχήμα 5.2). Έπειτα εφαρμόζεται η μέθοδος μικρών υποσυνόλων βάσεων (sbas). Τέλος, για την εξαγωγή αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται μια προσέγγιση συνδυασμού των μεθόδων PS και SBAS (σχήμα 5.3), χωρίς να χρησιμοποιεί το λογισμικό υποθέσεις ότι η παραμόρφωση ακολουθεί κάποιο μοντέλο (γραμμικό κλπ).



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα συνδυαστικής μεθόδου

#### 5.4.1. Προετοιμασία Δεδομένων (Data preparation)

Αρχικά, τα ανεπεξέργαστα (raw) δεδομένα πρέπει να εστιαστούν με τη βοήθεια του λογισμικού ROI\_PAC και έτσι δημιουργούνται οι εικόνες SLC (single Look Complex):

`link_raw data_path processing path`

Έπειτα αποφασίζεται ποια εικόνα θα αποτελέσει την πρωτεύουσα με την οποία θα συνδυαστούν όλες οι υπόλοιπες. Επιλέγεται μια εικόνα, η οποία θα έχει κατά μέσο όρο μικρές χωρικές και χρονικές αποστάσεις από τις υπόλοιπες, υψηλή συσχέτιση και χαμηλές αναμενόμενες διαταράξεις λόγω ατμόσφαιρας. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η εικόνα 19951225. Στον πίνακα A2 του παραρτήματος φαίνονται τα διανύσματα βάσης μεταξύ όλων των εικόνων και των δύο επικρατέστερων master. Παρόλο που η εικόνα 19951225 έχει μεγαλύτερο μέσο όρο χωρικής απόστασης με τις υπόλοιπες, έχει μικρότερη διακύμανση τιμών γι' αυτό και επιλέγεται.

```
cd 19951225 (master_date)
step_slc_ers
```

Στη συνέχεια, βασικό στάδιο της επεξεργασίας αποτελεί το κόψιμο των εικόνων. Ορίζονται στον κώδικα η πρώτη και η τελευταία γραμμή και στήλη που περιλαμβάνονται στην περιοχή ενδιαφέροντος και τελικά βλέπουμε αν η κομμένη εικόνα ανταποκρίνεται στην επιθυμητή ώστε να συνεχιστεί η επεξεργασία.

```
cp $MY_SCR/master_crop.in
step_master_setup
cd ..
make_slcs_ers
```

Αφού εστιαστούν, κοπούν και διαβαστούν οι εικόνες είναι δυνατό να γίνει μια υπερδειγματοληψία (oversampling) στο σετ δεδομένων με τη βοήθεια του Doris (Kampes, 2003), το οποίο συμβάλλει στην βελτίωση της πυκνότητας των σκεδαστών, άρα και των συσχετισμένων εικονοστοιχείων κυρίως σε αγροτικές περιοχές. Η υπερδειγματοληψία (oversampling) αυτή γίνεται με παράγοντα 2 στην πλάγια διεύθυνση και στη διεύθυνση του αζιμούθιου.

```
cd 19951225
step_master_ovs
cd ..
make_ovs
```

#### 5.4.2. Παραγωγή Συμβολογραμμάτων (Interferogramms Generation)

Η παραγωγή των συμβολογραμμάτων έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού DORIS (Delft Object oriented Radar Interferometric Software) και η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι αυτή που προτείνεται στο εγχειρίδιο λειτουργίας του StaMPS [Hooper, 2013].

Αρχικά, γίνεται η συμπροσαρμογή όλων των εικόνων. Αυτό γίνεται με τη χρήση τροχιών των master και slave εικόνων. Η master είναι η εικόνα αναφοράς με την οποία θα συνδυαστούν όλες οι slave. Αρχικά, για τον υπολογισμό της μετατόπιση των slave εικόνων σε σχέση με την master υπολογίζεται η θέση  $P(x, y, z)$  στο ελλειψοειδές της γης του κεντρικού σημείου (γραμμή, στήλη) της master. Έπειτα, υπολογίζεται με βάση την θέση  $P$  και άλλες παραμέτρους του συστήματος SAR η θέση του δορυφόρου στις slave εικόνες, επομένως και το σημείο (γραμμή, στήλη). Έτσι η μετατόπιση στην slave ορίζεται  $S(\text{line}, \text{pixel})$ :

$$S(l, p) = M(l, p) + \text{offset}(l, p)$$

### *make\_orbits*

Στο επόμενο βήμα, οι δύο εικόνες ευθυγραμμίζονται σε επίπεδο ακριβείας εικονοστοιχείου (1-2 εικονοστοιχεία), αναζητώντας χοντρό-μετατοπίσεις των εικόνων. Το μέγεθος του παραθύρου επιλέγεται να είναι 128\*128 και για τη γρήγορη επεξεργασία επιλέγεται να γίνει στο πεδίο των συχνοτήτων.

### *make\_coarse*

Στο σημείο αυτό, γίνεται η συμπίεση των εικόνων σε επίπεδο ακρίβειας υπό-pixel, δηλαδή με σφάλμα μικρότερο του 0,1 εικονοστοιχείου. Για να αποφευχθεί υψηλή αποσυσχέτιση, η πρωτεύουσα εικόνα συμπίεσσεται με τις δευτερεύουσες, με τις οποίες έχει διάνυσμα βάσης μικρότερη των 100 μέτρων, και οι slave εικόνες με τρεις slave με τις οποίες έχουν το μικρότερο διάνυσμα βάσης.

### *make\_coreg*

Έπειτα το λογισμικό δημιουργεί συμβολογράμματα με τη βοήθεια των συμπίεσμένων εικόνων, πολλαπλασιάζοντας κάθε εικονοστοιχείο της πρωτεύουσας εικόνας με το συζυγή μιγαδικό του αντίστοιχο εικονοστοιχείου στην δευτερεύουσα εικόνα. Αρχικά, με την εντολή *make\_dems* κατασκευάζεται η τοπογραφική φάση για κάθε συμβολόγραμμα χρησιμοποιώντας το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Στη συνέχεια γίνεται *resampling* κάθε δευτερεύουσας εικόνας πάνω στη γεωμετρία της master. Σαν επόμενο βήμα δημιουργούνται τα αρχικά συμβολογράμματα και από αυτά αφαιρείται και η τοπογραφία (*flattened*). Στο τέλος, γεωκωδικοποιούνται τα δεδομένα, εκτιμώντας την θέση του κάθε εικονοστοιχείου σε ένα γεωκωδικοποιημένο πλαίσιο αναφοράς, χρησιμοποιώντας τις τροχιακές παραμέτρους και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM).

### *make\_dems*

### *make\_resample*

### *make\_ifgs*

*cd yyyyymmdd* (τυχαία δευτερεύουσα εικόνα)

### *step\_geo*

#### **5.4.3. Επεξεργασία Σταθερών Σκεδαστών (PS Processing)**

Για την επεξεργασία των σταθερών σκεδαστών, το λογισμικό χρησιμοποιεί αρκετούς κώδικες από τη Matlab και ο κώδικας *StaMPS* απαιτεί τουλάχιστον 5 εικόνες SAR ώστε να γίνει η επεξεργασία.

- a) Το πρώτο βήμα της επεξεργασίας είναι να χωριστεί η περιοχή των συμβολογραμμάτων σε έναν αριθμό κομματιών (*patches*). Αυτό γίνεται για να μην δημιουργείται πρόβλημα χωρητικότητας του δίσκου του υπολογιστή. Στο σημείο αυτό, ορίζεται ένα κατώφλι για τον δείκτη διασποράς του πλάτους (*amplitude*) για την αρχική επιλογή των PS. Μια καλή τιμή του κατωφλίου αυτού επιλέχθηκε να είναι η 0,4. Επίσης ορίζονται από τον χρήστη ο αριθμός των κομματιών (*patches*) στις δύο διευθύνσεις (*range*, *azimuth*), ώστε το κάθε κομμάτι να μην περιέχει πάνω από 5 εκατομμύρια εικονοστοιχεία. Τέλος, ορίζονται ο αριθμός των εικονοστοιχείων που θα υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των κομματιών (*patches*). Δημιουργήθηκαν  $8*8=64$  *patches* στη συγκεκριμένη μελέτη.

*mt\_prep 0.4 8 8 50 800*

*matlab*

- b) Αρχικά, το πρώτο βήμα μέσα στο περιβάλλον Matlab είναι να μετατραπούν τα δεδομένα σε κατάλληλη μορφή (format) που απαιτείται για τη διαδικασία. Στο επόμενο βήμα (estimate phase noise), υπολογίζεται ο θόρυβος της φάσης για κάθε υποψήφιο σταθερό σκεδαστή σε κάθε συμβολόγραμμα. Στο σημείο αυτό ορίζονται μερικές σημαντικές παράμετροι, όπως η παράμετρος  $\gamma$ , η οποία είναι ένα κατώφλι για το μέτρο συνάφειας. Ορίζεται επίσης το βαθυπερατό φίλτρο (adaptive low pass filter), το οποίο χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η χωρικά συσχετισμένη φάση (spatially correlated phase). Ορίζονται επίσης τα πιθανά εικονοστοιχεία να λαμβάνονται σε κλίμακα 50 μέτρων, το σφάλμα του DEM να λαμβάνεται στα 10 μέτρα και τέλος το κατώφλι για την αλλαγή στη μέση τιμή της παραμέτρου  $\gamma$  καθορίζεται να είναι 0,005. Αυτό καθορίζει πότε γίνεται η σύγκλιση και οι επαναλήψεις σταματούν.

*Setparm('weed\_zero\_elevation',' $\gamma$ ')*

*Setparm('max\_topo\_error','10')*

*Setparm('weed\_max\_noise',Inf)*

*Setparm('scla\_deramp',' $\gamma$ ')*

*Stamps (1,2)*

- c) Στο τρίτο βήμα της διαδικασίας (ps selection), επιλέγονται τα εικονοστοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν σαν PS σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του θορύβου τους. Επίσης, ορίζεται η μέγιστη αποδεκτή χωρική πυκνότητα των τυχαίων σημείων (όχι PS) στα 20 km<sup>2</sup> (density\_rand) και το μέγιστο ποσοστό αυτών 20% (percent\_rand). Στο σημείο αυτό, υπολογίζεται ξανά η παράμετρος  $\gamma$  λόγω αφαίρεσης μερικών σημείων PS.

*Stamps (3,3)*

- d) Στο τέταρτο βήμα της διαδικασίας (PS weeding), γίνεται ένα ξεκαθάρισμα των υποψήφιων PS που επιλέχθηκαν στο προηγούμενο βήμα. Αρχικά, αφαιρούνται τα PS που θεωρούνται πολύ θορυβώδη και άλλα λόγω της συμβολής του σήματος από γειτονικά στοιχεία του εδάφους. Το κατώφλι της τυπικής απόκλισης ορίστηκε 1,1, οπότε κάθε εικονοστοιχείο, στο οποίο η ελάχιστη τυπική απόκλιση του θορύβου είναι μεγαλύτερη από το όριο αυτό, απορρίπτεται.

*Setparm('weed\_standard\_dev',1,1)*

*Stamps (4,4)*

- e) Στη συνέχεια, η φάση των συμβολογραμμάτων διορθώνεται από σφάλματα λόγω χωρικής-ασυσχετίστης γωνίας θέασης (SULA-spatially-uncorellated look angle) ώστε να εκτιμηθεί η φάση που οφείλεται σε εδαφική παραμόρφωση. Στο τέλος του βήματος αυτού, ενώνονται τα patches και προκύπτουν τα τυλιγμένα (wrapped) συμβολογράμματα..

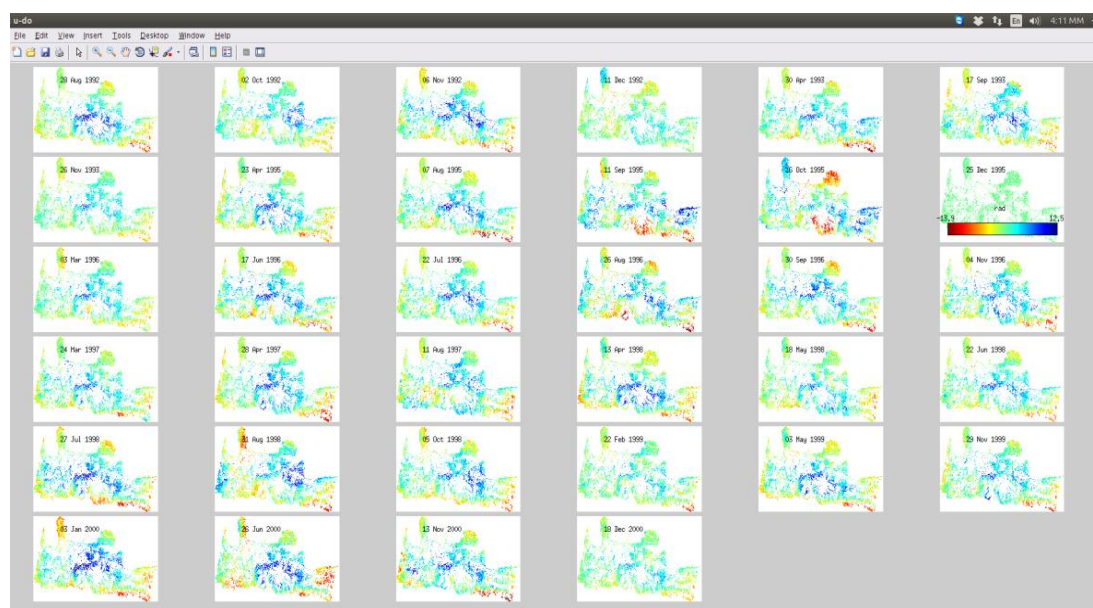
*Stamps (5,5)*

f) Ακολουθεί η διαδικασία της αποκατάστασης φάσης, στην οποία προκύπτουν σφάλματα, όπως ράμπες φάσης ή μεγάλες ασυνέχειες, σε ζεύγη με μεγάλα διανύσματα βάσης. Το νούμερο του κάθε συμβολογράμματος φαίνεται στην λίστα που εμφανίζεται με την εντολή `rs_info`. Στον πίνακα 5.2 φαίνονται τα συμβολογράμματα που κρίθηκαν ως ακατάλληλα και αφαιρέθηκαν. Αφαιρέθηκαν 3 συμβολογράμματα, τα οποία εμφάνιζαν μεγάλη γραμμή βάσης με την πρωτεύουσα εικόνα ή λάθη στη διαδικασία αποκατάστασης φάσης.

α/α	Ημερομηνία	Γραμμή βάσης (μέτρα)
10	19950702	-1301
18	19960826	-1131
32	19991129	-818

Πίνακας 5.2: Συμβολογράμματα που αφαιρέθηκαν

Στην εικόνα 5.20 φαίνονται όλα τα συμβολογράμματα μετά τη διαδικασία αποκατάστασης και αφού έχει αφαιρεθεί η επίδραση της τοπογραφίας και των τροχιακών σφαλμάτων.



Εικόνα 5.20: Συμβολογράμματα μετά την αφαίρεση τοπογραφίας και επίδραση της τροχιάς

Στο βήμα αυτό υπολογίζονται τα ατμοσφαιρικά και τροχιακά σφάλματα της master εικόνας (master atmosphere and orbit error) και τα χωρικά-συσχετισμένης γωνίας θέασης σφάλματα (SCLA-spatially-corellated look angle), τα οποία αφορούν σφάλματα στο ίδιο το DEM και λανθασμένη μετατροπή του DEM σε ραντάρ συντεταγμένες. Εφόσον αφαιρεθούν τα σφάλματα αυτά, η απεικόνιση των ξετυλιγμένων συμβολογραμμάτων είναι πιο ομαλή (smooth). Η μέθοδος για την αποκατάσταση φάσης που επιλέχθηκε ήταν η 3D. Μετά το βήμα αυτό, τα PS που υπολογίστηκαν στην περιοχή μελέτης είναι 209688.

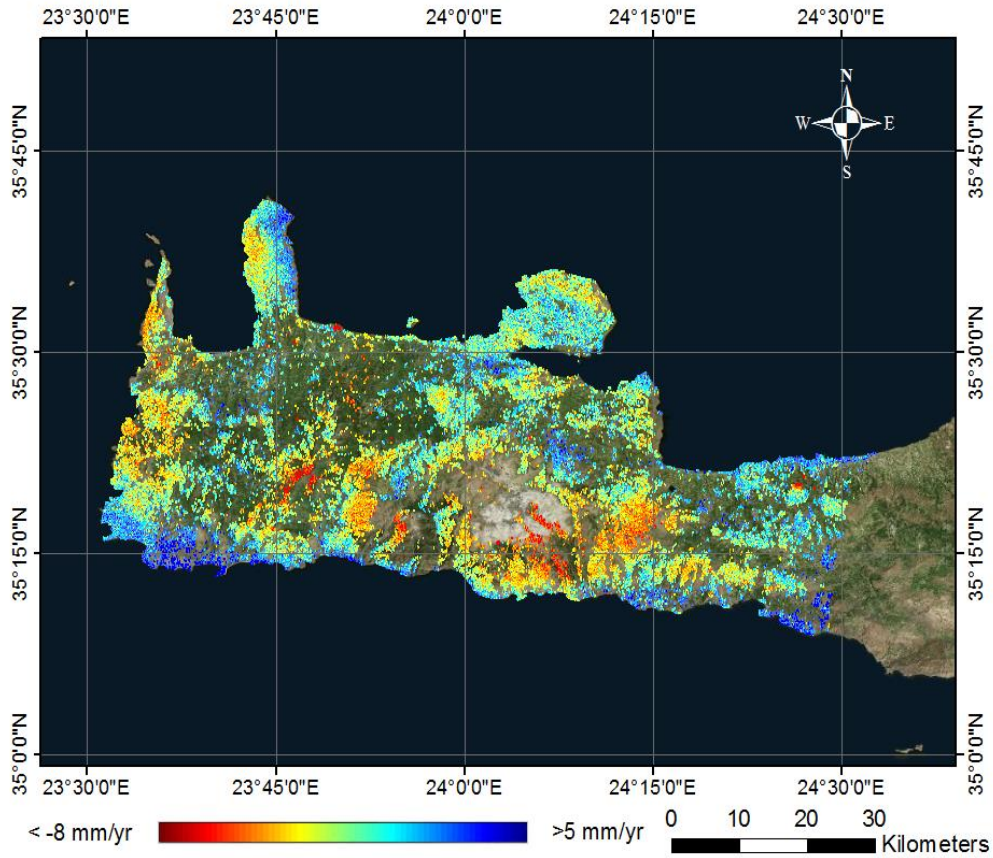
Περιοχή αναφοράς ονομάζεται μια μικρή περιοχή που θεωρείται ως σταθερή, δηλαδή με ταχύτητα  $-1/-0,5$  έως  $0,5/1\text{mm/y}$  και οι ταχύτητες της περιοχής μελέτης προκύπτουν αναφορικά με αυτήν. Ορίστηκε ως περιοχή αναφοράς μια απόσταση 100 μέτρων από τον σταθμό gps CHAN, ο οποίος φαίνεται να έχει ταχύτητα κοντά στο μηδέν. (εικόνα 5.21)



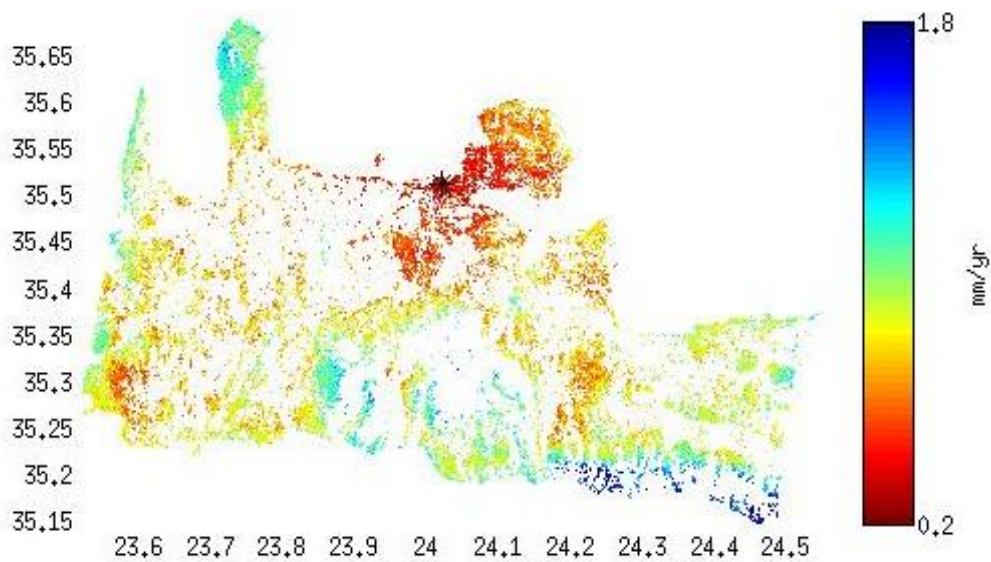
Εικόνα 5.21: Σημείο Αναφοράς ταχυτήτων - StaMPS

Μετά το τέλος της διαδικασίας, απεικονίζονται τα αποτελέσματα στις παρακάτω εικόνες και αυτά μπορούν να εξαχθούν σε KML και shapefile αρχεία.

```
Setparam('drop_ifg_index',[10 18 32])  
setparam('ref_centre_lonlat',[24.01768 35.51111])  
setparam('ref_radius',[100])  
Stamps (6,7)  
ps_plot('v-do') (παρουσίαση ταχυτήτων)  
ps_plot('vs-do'): (παρουσίαση τυπικής απόκλισης ταχυτήτων)
```



Εικόνα 5.22: Ταχύτητες εδαφικής παραμόρφωσης με PS Δυτικής Κρήτης με σημείο αναφοράς στην πόλη των Χανίων - StaMPS

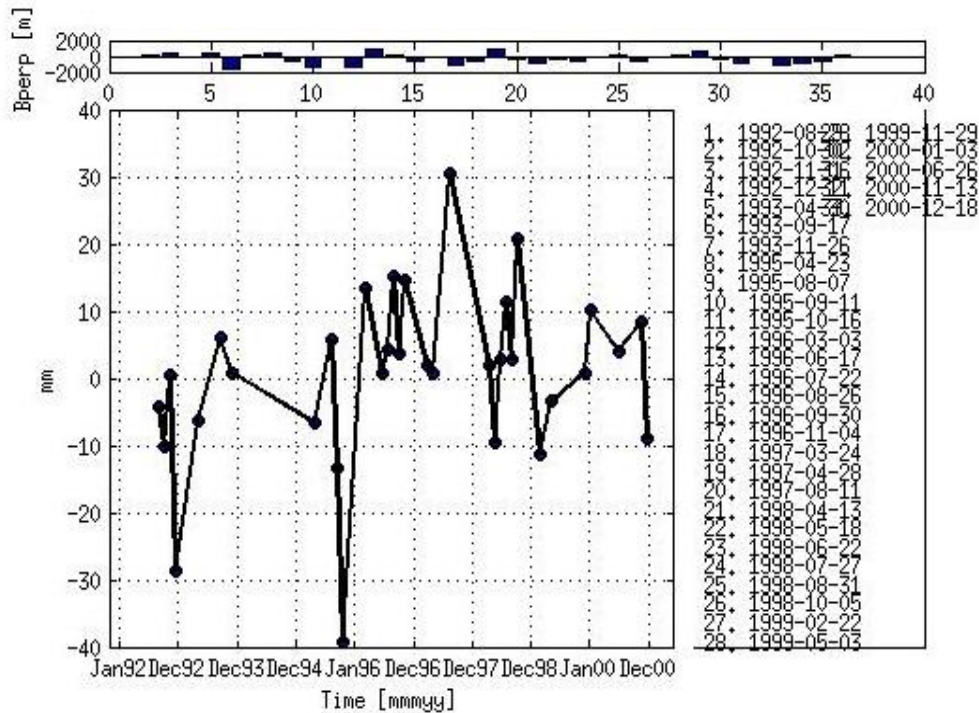


Εικόνα 5.23: Τυπική απόκλιση ταχυτήτων με PS Δυτικής Κρήτης με σημείο αναφοράς στην πόλη των Χανίων -StaMPS

Η τυπική απόκλιση δείχνει σε ποιες περιοχές περιμένουμε μεγαλύτερα και σε ποιες μικρότερα σφάλματα στην ταχύτητα που έχει υπολογιστεί παραπάνω. Στην εικόνα 5.23 παρατηρείται ένα πολύ μικρό σφάλμα σχεδόν σε όλη την επιφάνεια που εξετάζεται, εκτός από Νότιο-Ανατολικά όπου το σφάλμα κυμαίνεται στα 1,6 χιλιοστά.

Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της χρονοσειράς ταχυτήτων του κάθε σημείου ξεχωριστά (εικόνα 5.24).

```
ps_plot('v-do',1,0,0,[1:37],'ts')
```



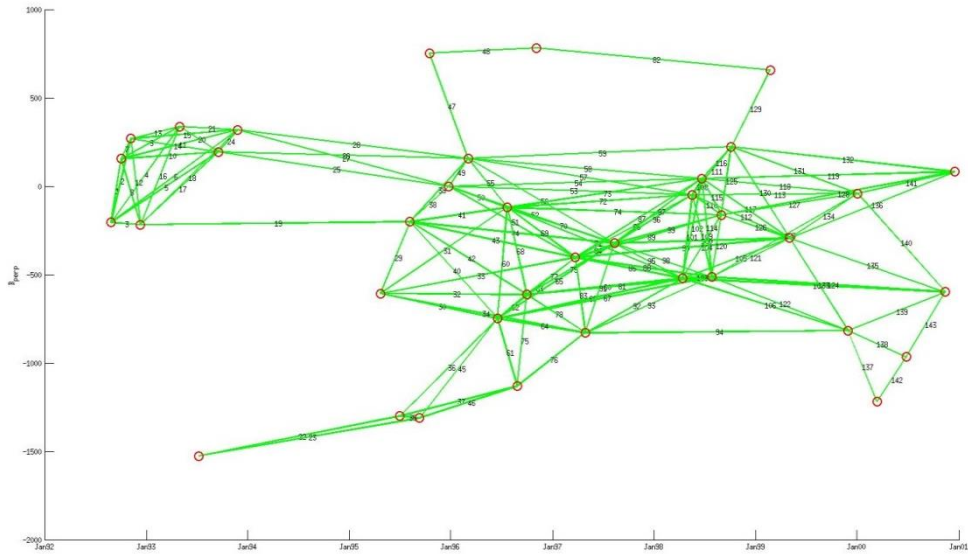
Εικόνα 5.24: Χρονοσειρά σημείου ενδιαφέροντος της Δυτικής Κρήτης με σημείο αναφοράς στην πόλη των Χανίων -StaMPS

#### 5.4.4. Επεξεργασία Μικρής Βάσης (Small Baseline Processing)

Στο λογισμικό StaMPS έγινε και η επεξεργασία με τη μέθοδο μικρών υποσυνόλων βάσεων. Αρχικά, μέσα στο περιβάλλον Matlab καθορίζονται μερικές παράμετροι για την δημιουργία του διαγράμματος συνδέσεων. Ορίστηκε η μέγιστη χρονική διαφορά των εικόνων που θα συνδεθούν στις 1500 ημέρες, το μέγιστο διάνυσμα βάσης στα 1000 μέτρα καθώς επίσης και η ελάχιστη συσχέτιση των εικόνων σε 0,33. Απεικονίζεται το διάγραμμα συνδέσεων στην εικόνα 5.25 και γίνεται αποδεκτό, μιας και καμία εικόνα δεν μένει έξω από αυτό και οι συνδέσεις φαίνονται επαρκής.

```
sb_find(0.33, 1500, 1000)
sb_baseline_plot
```

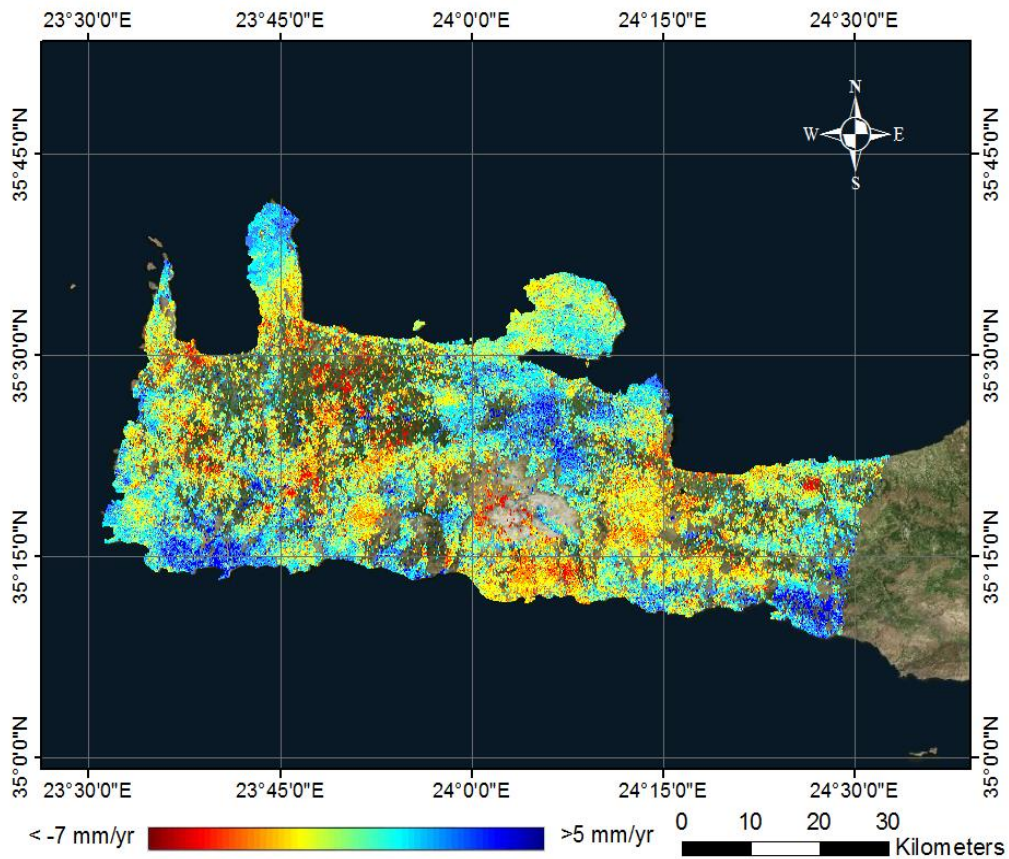




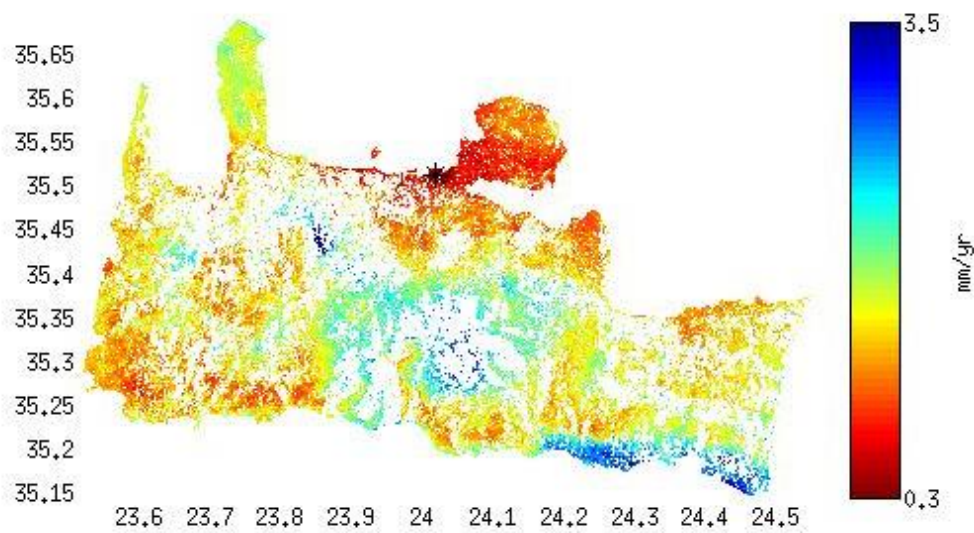
Εικόνα 5.25: Διάγραμμα συνδέσεων -StaMPS

Οι διαδικασίες που ακολουθούνται στη συνέχεια είναι ίδιες με αυτές της διαδικασίας των PS που παρουσιάστηκε παραπάνω. Χωρίζονται και πάλι οι εικόνες σε 64 patches και ακολουθούνται τα βήματα 1 έως 7, όπως πριν. Στο βήμα 6 γίνεται μετά την αποκατάσταση φάσης άλλη μια επεξεργασία για να αφαιρεθεί η φάση σχετικά με την πρωτεύουσα εικόνα με αντιστροφή ελαχίστων τετραγώνων. Επίσης, το βήμα 7 περιλαμβάνει ως έξτρα επεξεργασία τον υπολογισμό του λάθους SCLA (spatially correlated look angle) από τα συμβολογράμματα του SBAS και της master εικόνας. Τέλος, επιλέγεται ως περιοχή αναφοράς η ίδια όπως στη διαδικασία των σταθερών σκεδαστών (εικόνα 5.21), αφαιρούνται μερικά συμβολογράμματα που κρίνονται ακατάλληλα και επαναλαμβάνεται η διαδικασία από το βήμα 6 και έπειτα.

```
mt_prep 0,6 8 8 50 200
setparm('weed_max_noise',Inf)
setparm('weed_zero_elevation','y')
setparm('slca_deramp','y')
setparm('density_rand',5)
stamps(1,5)
setparm('drop_ifg_index',[22 23 52 56 113 127 131 134 140])
setparm('ref_centre_lonlat',[24.01768 35.51111])
setparm('ref_radius',[100])
stamps(6,7)
```



Εικόνα 5.26: Ταχύτητες εδαφικής παραμόρφωσης με SBAS Δυτικής Κρήτης με σημείο αναφοράς στην πόλη των Χανίων – StaMPS



Εικόνα 5.27: Τυπική απόκλιση ταχυτήτων με SBAS Δυτικής Κρήτης με σημείο αναφοράς στην πόλη των Χανίων -StaMPS

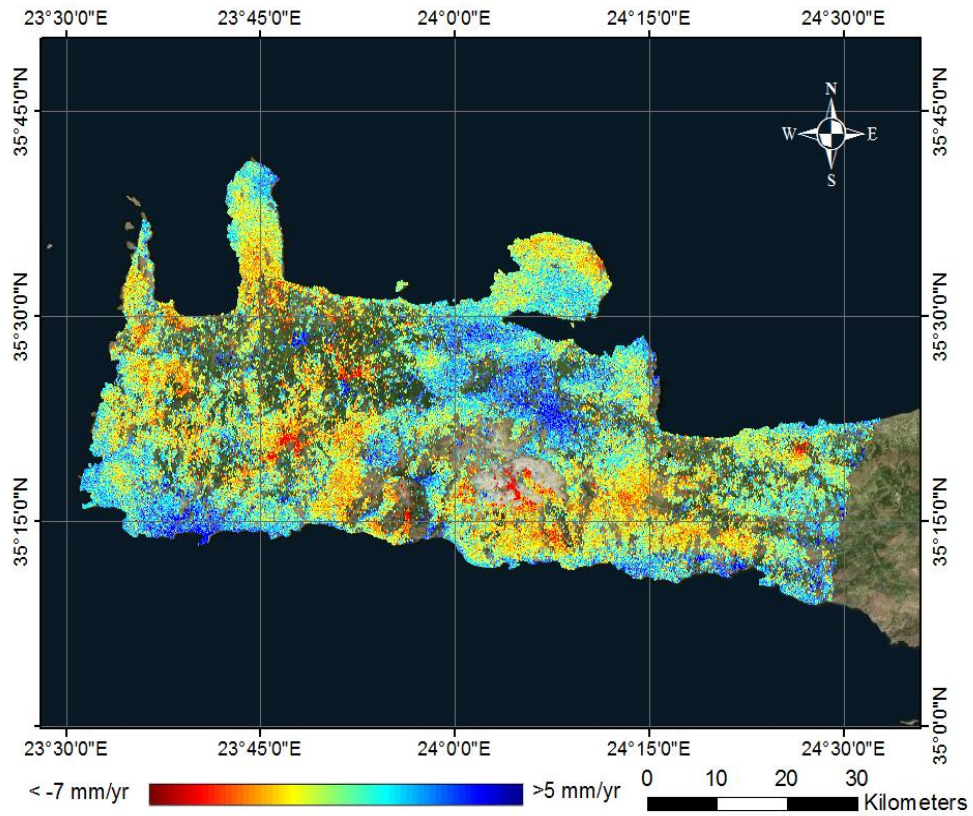
Στην εικόνα 5.26 παρουσιάζονται οι ταχύτητες εδαφικής παραμόρφωσης που προέκυψαν από την τεχνική SBAS και στην 5.27 οι τυπικές αποκλίσεις που μας δείχνουν που είναι το όριο του σφάλματος για κάθε σημείο. Μετά το βήμα αυτό, τα σημεία που υπολογίστηκαν στην περιοχή μελέτης είναι 139466.

#### **5.4.5. Επεξεργασία Συνδυασμού PS και SBAS (Combined Multi temporal InSAR Processing)**

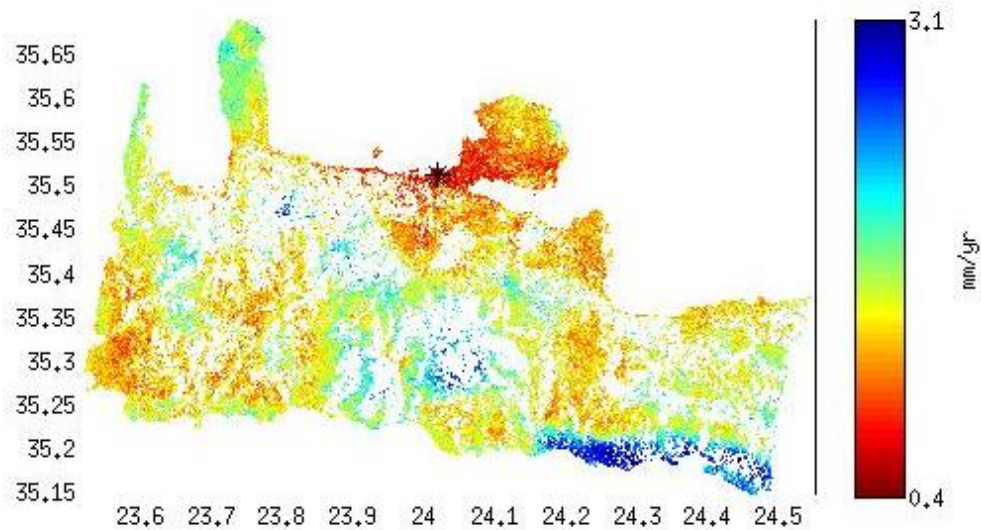
Η μέθοδος αυτή συνδυάζει τις δύο προσεγγίσεις που έγιναν παραπάνω για την εξαγωγή του σήματος παραμόρφωσης σε περισσότερα σημεία και με υψηλότερο ποσοστό σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise) από ότι μπορεί να προσεγγιστεί σε κάθε μέθοδο ξεχωριστά. Συνδυάζονται ουσιαστικά η φάση των επιλεγμένων εικονοστοιχείων από τα φασματικά φιλτραρισμένα συμβολογράμματα (sbas μέθοδος) με τη φάση των επιλεγμένων εικονοστοιχείων των μη φασματικά φιλτραρισμένων συμβολογραμμάτων (μέθοδος PS). Αυτό οδηγεί στην επιλογή περισσότερων εικονοστοιχείων, δηλαδή η χωρική δειγματοληψία αυξάνεται.

Ο συνδυασμός αυτός γίνεται μετά το βήμα 5 είτε σε ολόκληρη την περιοχή είτε σε ένα από τα patches ξεχωριστά. Αφαιρούνται μερικά συμβολογράμματα που κρίνονται ακατάλληλα και ορίζεται περιοχή αναφοράς. Μετά τον συνδυασμό των δύο μεθόδων, τα σημεία που υπολογίστηκαν στην περιοχή μελέτης είναι 345445. Τα αποτελέσματα της μεθόδου φαίνονται στην εικόνα 5.28.

```
ps_sb_merge  
setparm('ref_centre_lonlat',[24.01768 35.51111])  
setparm('ref_radius',[100])  
setparm('drop_ifg_index',[22 35 51 70 84 95 99 113 118 123 127 131 134 140 141])  
stamps(6,7)
```



Εικόνα 5.28: Ταχύτητες παραμόρφωσης Δ. Κρήτης με συνδυασμό μεθόδων PS & SBAS – StaMPS

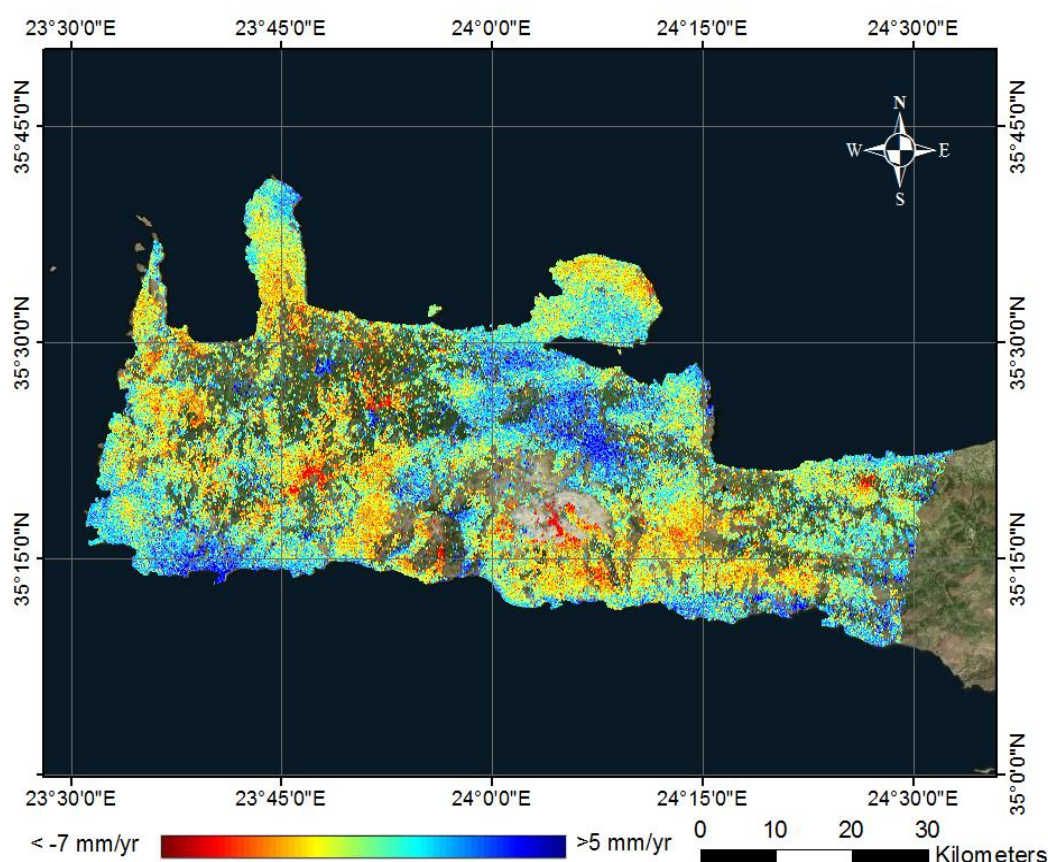


Εικόνα 5.29: Τυπική απόκλιση ταχυτήτων με συνδυασμό μεθόδων PS & SBAS Δυτικής Κρήτης με σημείο αναφοράς στην πόλη των Χανίων -StaMPS

Με τη βοήθεια της εικόνας 5.29 διευκρινίζεται ποια σημεία μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα και ποια όχι. Παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες διαφορές βρίσκονται κυρίως στο Νοτιοανατολικό τμήμα της εικόνας. Η πληροφορία που μας δίνεται στο σημείο αυτό πρέπει να ελεγχθεί ότι ισχύει με την επεξεργασία της διπλανής εικόνας SAR.

### 5.5.Αποτελέσματα StaMPS

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων όπως προέκυψαν από τη διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω (§ 5.4). Ο χάρτης εδαφικής παραμόρφωσης παρουσιάζεται στην εικόνα 5.30 για την περιοχή της Δυτικής Κρήτης την χρονική περίοδο 1992-2001, όπως αυτός εξήχθη μετά την επεξεργασία στο λογισμικό StaMPS μετά τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων των τεχνικών PS και SBAS.



Εικόνα 5.30: Ταχύτητες παραμόρφωσης Δ. Κρήτης - StaMPS

Η μέγιστη ανύψωση παρουσιάζεται με μπλε χρώμα και φτάνει τα  $5\text{mm/yr}$ , ενώ η μέγιστη καθίζηση με κόκκινο και φτάνει τα  $-7\text{mm/yr}$ . Παρατηρείται ανύψωση κυρίως στο νότιο κομμάτι του νησιού αλλά και μερικές καθιζήσεις σε τυχαία σημεία. Ανάλυση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων γίνεται στο κεφάλαιο 6.1. Όλες οι ταχύτητες που παρουσιάζονται είναι σε σχέση με το μέσο όρο της ταχύτητας του σημείου αναφοράς, το οποίο επιλέχθηκε να είναι στην πόλη των Χανίων, κοντά στο σταθμό GPS “CHAN” (εικόνα 5.21).

Παρατηρείται μια ασυνέχεια στο νοτιοανατολικό τμήμα της εικόνας 5.30, η οποία εμφανίζεται στο αποτέλεσμα της μεθόδου SBAS και λογικά οφείλεται σε σφάλματα στο βήμα της αποκατάστασης φάσης. Η ασυνέχεια αυτή φαίνεται και στο αποτέλεσμα της συνδυαστικής μεθόδου και η περιοχή πρέπει να επεξεργαστεί και με το διπλανό track (Track 422) ώστε να γίνει η επαλήθευση των ταχυτήτων.

## 5.6. Δεδομένα GPS

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά αναφέρονται μερικά θεωρητικά στοιχεία της τεχνολογίας GPS και ακολουθεί η ανάλυση των δεδομένων, ώστε να συγκριθούν οι ταχύτητες με αυτές που προέκυψαν από την τεχνική της Συμβολομετρίας.

### Θεωρία GPS

Το Global Positioning System (GPS), επιτρέπει σε ένα χρήστη με κατάλληλο δέκτη να αποκτήσει σίγματα θέσης σε οποιοδήποτε σημείο πάνω ή κοντά στην επιφάνεια της Γής (Hurn, 1989). Το GPS σύστημα μπορεί να θεωρηθεί χωρίζεται σε τρία τμήματα:

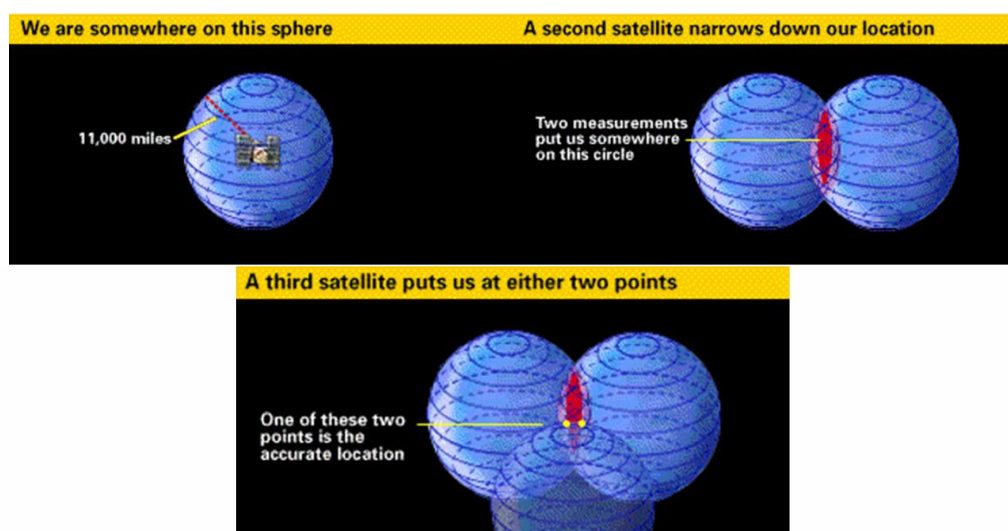
- Ένα «τμήμα χρηστών», το οποίο αποτελείται από όλους τους χρήστες για στρατιωτικούς ή πολιτικούς σκοπούς, οι οποίοι λειτουργούν τους δέκτες GPS τους με διάφορους τρόπους.
- Ένα «διαστημικό», το οποίο αποτελείται από 24 δορυφόρους Navstar GPS σε 10900 ναυτικά μίλια τροχιακό υψόμετρο, και ο καθένας με ένα τροχιά κλίσης 55 μοιρών ως προς τον ισημερινό (εικόνα 5.31). Η τροχιακή διαμόρφωση των δορυφόρων είναι τέτοια ώστε κάθε φορά τουλάχιστον τέσσερις να είναι πάνω από τον ορίζοντα σε οποιοδήποτε σημείο της επιφάνεια της γης. Κάθε δορυφόρος μεταδίδει συνεχώς σήματα GPS με σκοπό τη λήψη από το τμήμα χρηστών.
- Το «τμήμα ελέγχου» αποτελείται από τους επίγειους σταθμούς, που παρακολουθούν συνεχώς την λειτουργία και τις ακριβείς θέσεις των δορυφόρων του διαστημικού τμήματος. Ενημερώσεις για τις εφημερίες του δορυφόρου και διορθώσεις του ατομικού ρολογιού υπολογίζονται από το επίγειο τμήμα και μεταδίδονται πίσω προς τους δορυφόρους, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακρίβεια στις πληροφορίες συγχρονισμού που διαβιβάζονται στους χρήστες.



Εικόνα 5.31: Δίκτυο δορυφόρων NAVSTAR GPS

Μια θέση GPS καθορίζεται από το δέκτη του χρήστη, με τη μέτρηση του χρόνου ταξιδιού του σήματος από τους δορυφόρους, και τη μετατροπή του σε απόσταση χρησιμοποιώντας την ταχύτητα του φως.

Στην εικόνα 5.32 φαίνεται ο καθορισμός της θέσης. Στην πάνω αριστερή γωνία φαίνεται πως η θέση του χρήστη περιορίζεται αρχικά μόνο από την πληροφορία ενός δορυφόρου, επειδή το σημείο πρέπει να βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια της Γης. Στην πάνω δεξιά γωνία της εικόνας φαίνεται πως η ύπαρξη δύο δορυφόρων περιορίζει την θέση του χρήστη στην τομή δύο σφαιρών. Τέλος, στο τελευταίο σχήμα φαίνονται πως οι τρεις δορυφόροι περιορίζουν την λύση στην τομή τριών σφαιρών, δηλαδή σε δύο διακριτά σημεία στο χώρο. Το ένα από τα δύο αυτά σημεία είναι απίθανο να θεωρηθεί σωστό οπότε και απορρίπτεται, επειδή ή θα βρίσκεται βαθιά μέσα στη Γή ή σε ένα απίθανο υψόμετρο. Τέλος, τα ρολόγια που περιέχονται στους δέκτες GPS δεν παρέχουν μεγάλη ακρίβεια για να παρέχουν πληροφορίες συντονισμού. Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιείται τουλάχιστον άλλος ένας τέταρτος δορυφόρος, ο οποίος παρέχει μια διόρθωση συγχρονισμού για να υπάρχει ακρίβεια «ατομικού ρολογιού».



Εικόνα 5.32: Προσδιορισμός θέσης με GPS Πηγή: Hurn, 1989

Έτσι, προκειμένου να δοθεί μια τοποθεσία τριών διαστάσεων πρέπει να χρησιμοποιηθούν τέσσερις δορυφόροι, ώστε να λυθούν τέσσερις εξισώσεις για τους αγνώστους X, Y, Z και t. Για το GPS, οι συντεταγμένες αναφέρονται στο σύστημα αναφοράς WGS84 και μπορεί εύκολα να μετατραπούν σε γεωγραφικό μήκος και πλάτος και υψόμετρο πάνω από την επιφάνεια του ελλειψοειδούς (γεωμετρικό υψόμετρο). Αν υπάρχουν πάνω από τέσσερις δορυφόροι, δηλαδή υπάρχουν περισσότερες εξισώσεις από ότι αγνωστοι, το πρόβλημα καλείται συμβιβαστό και γίνεται μια βελτιστοποίηση για την εύρεση της λύσης.

Ένα δίκτυο GPS δημιουργείται για σκοπούς μέτρησης της κίνησης της επιφάνειας. Η θέση και η ταχύτητα του κάθε δέκτη GPS μπορεί να είναι μεγάλης ακρίβειας. Η ακρίβεια αυτή μπορεί να είναι καλύτερη και από αυτή του χιλιοστού. Τα GPS μπορούν να παρέχουν πολύ καλή ακρίβεια στις οριζοντιογραφικές ταχύτητες (north & east) αλλά αυτό δεν ισχύει και για τις κάθετες (up). Αυτό συμβαίνει επειδή στην up διεύθυνση δεν υπάρχει συμμετρία, δηλαδή οι δορυφόροι 'βλέπουν' στο ζενίθ αλλά όχι στο ναδίρ.

## Επεξεργασία

Με τη βοήθεια του Εργαστηρίου Ανώτερης Γεωδαισίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου αποκτήθηκαν οι ταχύτητες και η τοποθεσία των σταθμών GPS που ενδιαφέρουν την μελέτη στην περιοχή της Δυτικής Κρήτης και σκοπός είναι ο συνδυασμός και η σύγκριση των ταχυτήτων αυτών με τις συμβολομετρικές ταχύτητες.

Ζητήθηκαν οι σταθμοί από

- Το δίκτυο GREECE : TUC2, XRSO, ANOP και GVDS.
- Το δίκτυο URANUS: CHAN, PALA και MURT.

Η τοποθεσία των σταθμών φαίνεται στην εικόνα 5.33.



Εικόνα 5.33: Θέσεις σταθμών GPS

Οι ανεπεξέργαστες ταχύτητες GPS φαίνονται στον πίνακα A3 του παραρτήματος και οι ταχύτητες των σταθμών στις διευθύνσεις Up, North και East στον πίνακα 5.3. Τα δεδομένα δόθηκαν από τον Ξάνθο Παπανικολάου στο Κέντρο Τεχνητών Δορυφόρων Διόνυσου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Οι τιμές των ταχυτήτων είναι αναφορικά στο IGS08, ένα παγκόσμιο σύστημα αναφοράς GNSS, οπότε μπορούν να θεωρηθούν σαν απόλυτες τιμές ταχυτήτων. Τα χρονικά διαστήματα που καλύπτουν οι διάφοροι σταθμοί δεν επικαλύπτονται.



Σταθμός	Vn (mm/y)	Ve (mm/y)	Vu (mm/y)	Latitude (deg)	Longitude (deg)	Height (m)
Xrso	-11,41	+7,72	+0,64	35 18 37,9540	23 31 57,7143	31,3582
Anop	-11,08	+8,36	+1,13	35 13 04,6718	24 5 45,5730	654,2326
Gvds	-12,22	+8,01	+1,50	34 49 53,2978	24 4 52,3431	295,0552
Tuc2	-11,90	+7,79	+0,90	35 31 59,4841	24 4 14,0138	160,8862
Chan	-15,37	+3,66	-0,43	35 30 40,0264	24 1 3,65180	58,4378
Pala	-6,47	+10,46	-	35 13 55,5141	23 40 58,5351	31,3174
murt	-13,04	+6,73	+1,18	35 11 56,4649	24 24 10,9445	207,4631

Πίνακας 5.3: Ταχύτητες και τοποθεσία σταθμών GPS Πηγή: Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας, Ε.Μ.Π.

Οι σταθμοί του δικτύου GREECE ( TUC2, XRSO, ANOP και GVDS) έχουν σταματήσει εδώ και χρόνια να στέλνουν δεδομένα, ενώ οι σταθμοί του δικτύου URANUS (CHAN, PALA και MURT) είναι καινούριοι και έχουν λίγες μετρήσεις. Οι ημέρες μέτρησης των σταθμών φαίνονται στον πίνακα 5.4, εκτός του σταθμού της Γαύδου, ο οποίος δεν περιλαμβάνεται στην περιοχή μελέτης.

Σταθμός	Χρονική περίοδος	Ημέρες μέτρησης
Xrso	Απρίλιος 2003 – Σεπτέμβριος 2011	2364
Anop	Αύγουστος 2003 – Οκτώβριος 2010	2003
Tuc2	Οκτώβριος 2004 - Δεκέμβριος 2014	3639
Chan	Νοέμβριος 2013 – Δεκέμβριος 2014	734
Pala	Δεκέμβριος 2014 – Ιανουάριος 2015	73
murt	Νοέμβριος 2013 – Δεκέμβριος 2014	715

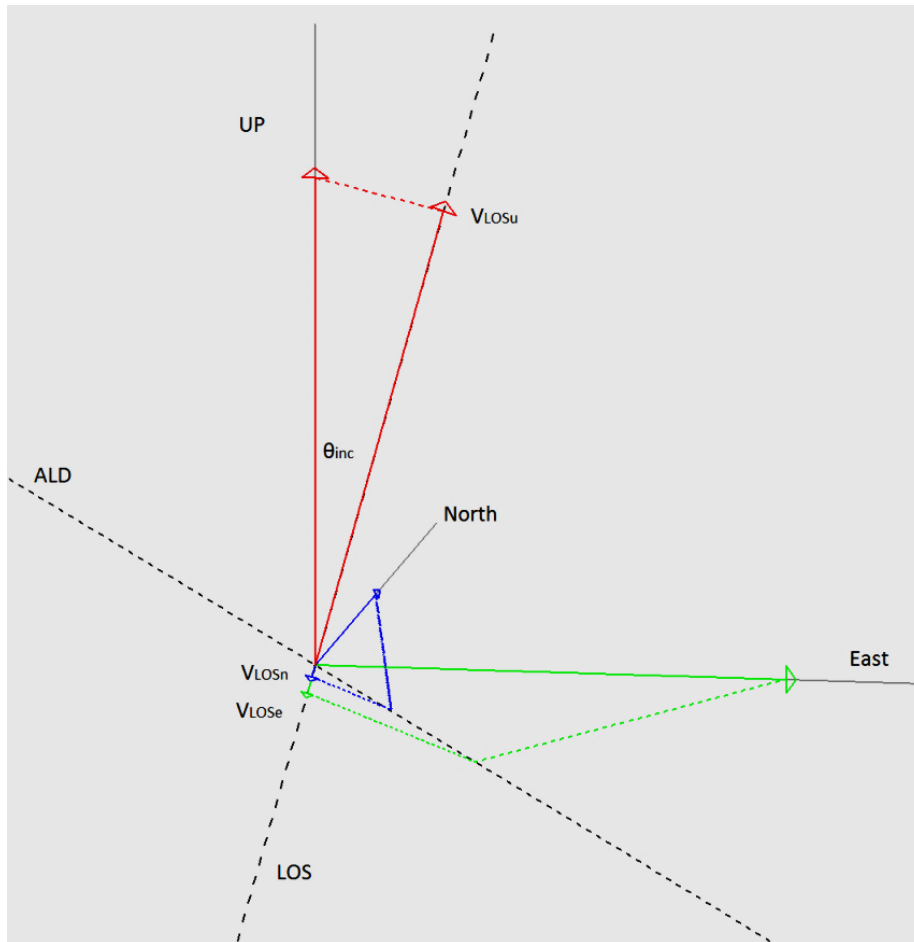
Πίνακας 5.4: Ταχύτητες και τοποθεσία σταθμών GPS Πηγή: <http://dionysos.survey.ntua.gr/>

Τα διανύσματα των σταθμών δείχνουν ξεκάθαρη νοτιοανατολική κατεύθυνση οριζοντιογραφικά.

Για την σύγκριση των δεδομένων GPS με τα δεδομένα που προέκυψαν παραπάνω με την τεχνική της συμβολομετρίας είναι απαραίτητο να προβληθούν τα διανύσματα  $v_N$ ,  $v_E$  και  $v_U$  στην διεύθυνση του Line of Sight, στην οποία ο δορυφόρος ανιχνεύει την παραμόρφωση. Έτσι, θα μετασχηματιστούν τα τρία αυτά διανύσματα σε ένα διάνυσμα στη διεύθυνση LOS. Για τα διανύσματα αυτά ισχύει:

$$v_{LOS} = v_{LOS_U} + v_{LOS_E} + v_{LOS_N}$$

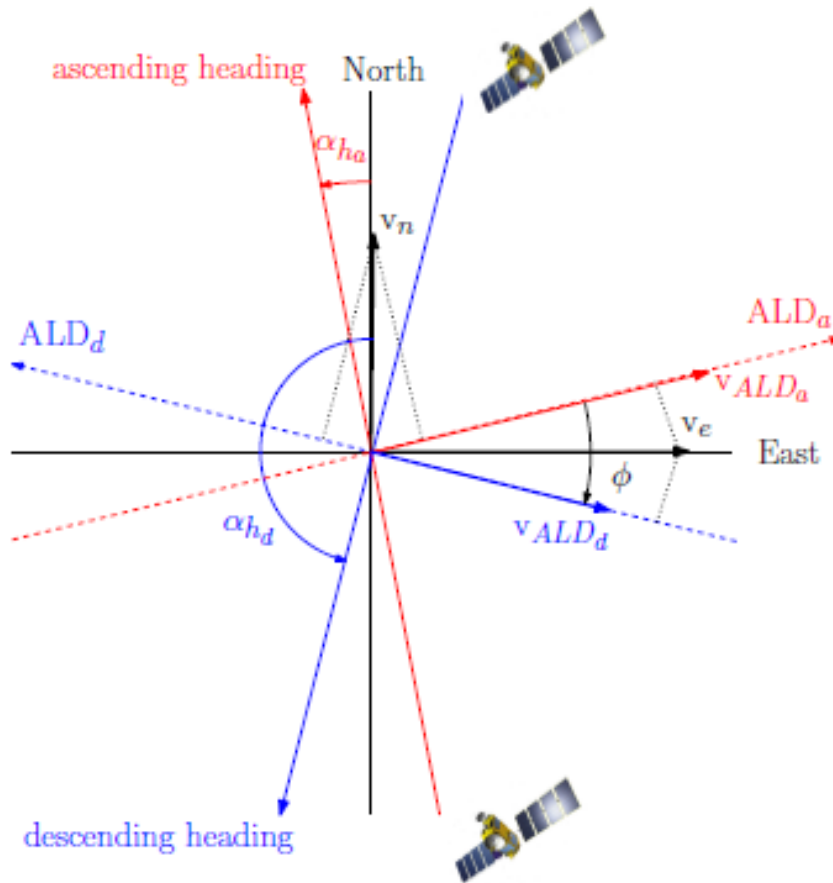
Λόγω της διεύθυνσης LOS και της σχεδόν πολικής τροχιάς του δορυφόρου παρατηρούμε ότι το διάνυσμα  $v_{LOS}$  είναι ευαίσθητο στη διεύθυνση Up και East και πολύ λιγότερο κατά τη διεύθυνση North, λόγω της κλίσης του δορυφόρου. Για παράδειγμα, για γωνία πρόσπτωσης  $23^\circ$  και heading angle ίση περίπου με  $200^\circ$  η ευαισθησία της ανάλυσης της διεύθυνσης LOS στις τρεις διαστάσεις είναι  $[0.92, -0.13, 0.37][v_{LOS_U}, v_{LOS_N}, v_{LOS_E}]^T$ . Παρατηρούμε ότι οι οριζοντιογραφικοί παράγοντες δεν μπορούν να αγνοηθούν αλλά ο παράγοντας της διεύθυνσης Up παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο.



Σχήμα 5.4: Προβολή διανυσμάτων Up, North και East σε διεύθυνση LOS

Είναι γνωστό ότι ο δορυφόρος μετράει τις ταχύτητες στην διεύθυνση LOS, η οποία βρίσκεται σε γωνία ίση με την γωνία πρόσπτωσης ( $\theta_{inc} \approx 23,3^\circ$ ) από την διεύθυνση Up-Down. Ως Heading angle ονομάζεται η γωνία του δορυφόρου ως προς τον Βορρά, ουσιαστικά το αζιμούθιο της διεύθυνσης LOS. Ως ALD (azimuth look direction) ορίζεται η διεύθυνση θέασης του δορυφόρου κατά αζιμούθιο και είναι κάθετη πάντα στη διεύθυνση του δορυφόρου LOS (σχήμα 5.4).

Η γεωμετρία της μετατροπής αυτής φαίνεται στο σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Διαφορετική συμβολή των οριζόντιων συνιστωσών (north, east) στην καθοδική και στην ανοδική τροχιά. Μπλε: Καθοδική τροχιά Κόκκινο: Ανοδική τροχιά Πηγή: Παπουτσής, 2014

Υπολογίζεται πρώτα η  $v_{ALD}$ , η οποία είναι η προβολή των διανυσμάτων κατά East και κατά North στη διεύθυνση ALD (Hanssen, 2011):

$$v_{ALD} = -v_E \sin(a_h - 3\pi/2) - v_N \cos(a_h - 3\pi/2) = v_E \cos(a_h) - v_N \sin(a_h)$$

Και εν συνεχεία το παραπάνω διάνυσμα συνδυάζεται με το διάνυσμα κατά  $U_p$  και προκύπτει η τελική ταχύτητα πάνω στη διεύθυνση LOS:

$$v_{LOS} = v_U \cos(\theta_{inc}) - v_{ALD} \sin(\theta_{inc}) \leftrightarrow$$

$$v_{LOS} = v_U \cos(\theta_{inc}) - v_E \cos(a_h) \sin(\theta_{inc}) + v_N \sin(a_h) \sin(\theta_{inc})$$

Εφόσον δίνονται σφάλματα στις ταχύτητες στις διευθύνσεις  $U_p$ , North και East υπολογίζονται τα σφάλματα της ταχύτητας στη διεύθυνση LOS:

$$\sigma_{V_{ALD}} = \sqrt{\frac{\theta_{vald}^2}{\theta_{ve}} * \sigma_{V_E}^2 + \frac{\theta_{vald}^2}{\theta_{vn}} * \sigma_{V_N}^2} = \sqrt{(\sin a_h * \sigma_{V_E})^2 + (\cos a_h * \sigma_{V_N})^2}$$

Και

$$\sigma_{V_{LOS}} = \sqrt{\frac{\theta_{vlos}^2}{\theta_{vu}} * \sigma_{V_U}^2 + \frac{\theta_{vlos}^2}{\theta_{vald}} * \sigma_{V_{ALD}}^2} = \sqrt{(\sin \theta_{inc} * \sigma_{V_U})^2 + (\cos \theta_{inc} * \sigma_{V_{ALD}})^2}$$

Στην μελέτη αυτή υπολογίστηκαν τα σφάλματα του GPS. Τα σφάλματα των μοντέλων υπολογίζονται κοντά στο μηδέν λόγω του μεγάλου αριθμού παρατηρήσεων που έχουμε κυρίως στους σταθμούς του δικτύου του ΕΜΠ (GREECE) και παρουσιάζονται στον πίνακα 5.5.

Η παραπάνω επεξεργασία έγινε σε περιβάλλον excel και υπολογίστηκαν οι ταχύτητες και τα σφάλματα των σταθμών GPS στη διεύθυνση LOS (πίνακας 5.5). Αφαιρέθηκε ο σταθμός PALA επειδή κρίθηκε αναξιόπιστος, λόγω του γεγονότος ότι είχε μετρήσεις μόνο 73 ημερών.

Σταθμός GPS	VLOS	$\sigma_{V_{LOS}}$
XRSO	4.62	0,0001
ANOP	5.28	0,0001
GVDS	5.59	0,0001
TUC2	4.93	0,0002
CHAN	2.44	0,0002
MURT	4.88	0,002

Πίνακας 5.5: Ταχύτητες και σφάλματα GPS σε διεύθυνση LOS

Οι ταχύτητες αυτές συγκρίνονται με τις ταχύτητες που βγήκαν από την επεξεργασία της Συμβολομετρίας. Χαράσσουμε έναν κύκλο 150 μέτρων γύρω από τον κάθε σταθμό του GPS και λαμβάνεται ένας μέσος όρος των ταχυτήτων στην περιοχή αυτή.

Η σύγκριση των ταχυτήτων SAR και GPS δεν μπορεί να γίνει κατά απόλυτη τιμή, διότι στα SAR γίνεται μια υποτίμηση των ταχυτήτων των σημείων. Επίσης, στα SAR οι τιμές των ταχυτήτων αναφέρονται ως προς ένα σημείο αναφοράς, στον οποίο ορίζουμε την ταχύτητα μηδενική, ενώ στα GPS κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Οπότε για να γίνει η σύγκριση υπολογίζονται διαφορές μεταξύ σταθμών GPS και συγκρίνονται οι διαφορές των τιμών της ταχύτητας από τα SAR με τις αντίστοιχες διαφορές από τα GPS.

Στον πίνακα 5.6 φαίνονται στην 2<sup>η</sup> στήλη οι διαφορές των σταθμών στις ταχύτητες με τα SAR δεδομένα, στην 3<sup>η</sup> με τα GPS και στην 4<sup>η</sup> οι μεταξύ τους διαφορές.

<b>Διαφορές μεταξύ σταθμών</b>	<b>SAR (mm/y)</b>	<b>GPS (mm/y)</b>	<b>SAR-GPS (mm/y)</b>
xrso-murt	1,69	-0,27	1,96
xrso-anop	1,85	-0,67	2,52
xrso-tuc2	1,73	-0,31	2,04
xrso-chan	1,24	2,17	-0,94
murt-anop	0,16	-0,40	0,56
murt-tuc2	0,04	-0,04	0,08
murt-chan	-0,45	2,44	-2,89
anop-tuc2	-0,12	0,35	-0,47
anop-chan	-0,61	2,84	-3,45
tuc2-chan	-0,49	2,49	-2,98
Μέσος όρος:			-0,36

Πίνακας 5.6: GPS vs. SAR

Παρατηρείται ότι οι διαφορές βρίσκονται μέσα στα όρια του σφάλματος, μιας και το σφάλμα στις ταχύτητες των SAR είναι γύρω στο 1mm/y και στα GPS περίπου 2 mm/y για μετρήσεις 5 ετών και γύρω στα 5mm/y για 2 χρόνια παρατηρήσεων (Sella et al., 2002). Οι σταθμοί XRSO, ANOP και TUC2 έχουν μετρήσεις περισσότερες των 5 ετών, ενώ οι σταθμοί CHAN και MURT έχουν μετρήσεις περίπου για 2 χρόνια. Έτσι, για τους σταθμούς XRSO, ANOP και TUC2 θεωρείται συμφωνία μεταξύ SAR και GPS  $\sqrt{1^2 + 2^2} = 2,23$  mm/y και για τους σταθμούς CHAN και MURT  $\sqrt{1^2 + 5^2} = 5,1$  mm/y. Η μέγιστη διαφορά που παρατηρείται στον πίνακα 5.6 είναι -2,87mm/y, οπότε θεωρούμε ότι μετρήσεις από SAR και από GPS βρίσκονται σε συμφωνία.

Επομένως, είναι σημαντικό να συγκριθεί η παρατηρούμενη παραμόρφωση από διαφορετικά σετ δεδομένων. Οι μετρήσεις GPS είναι ανεξάρτητες της ανάλυσης χρονοσειράς με τη διαδικασία της διαφορικής συμβολομετρίας και γι' αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμηθεί η ακρίβεια των μετρήσεων της συμβολομετρίας.

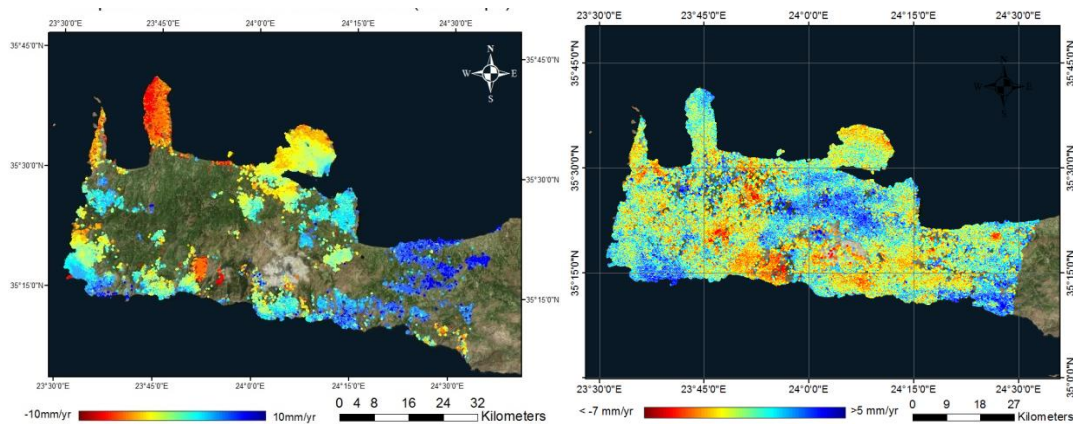


## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η παρουσίαση των συμπερασμάτων της μελέτης που πραγματοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία. Αρχικά, γίνεται αναφορά στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο § 5.3 και §5.5 σε ευρεία (regional) και σε τοπική κλίμακα (local scale). Έπειτα, γίνεται μια σύγκριση μεταξύ των δύο λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν τις διαφορές και κάποιες ιδιαιτερότητές τους. Τέλος, παρατίθενται μερικές προτάσεις για μελλοντική επεξεργασία και συνέχιση της εργασίας.

### 6.1.Ερμηνεία Αποτελεσμάτων

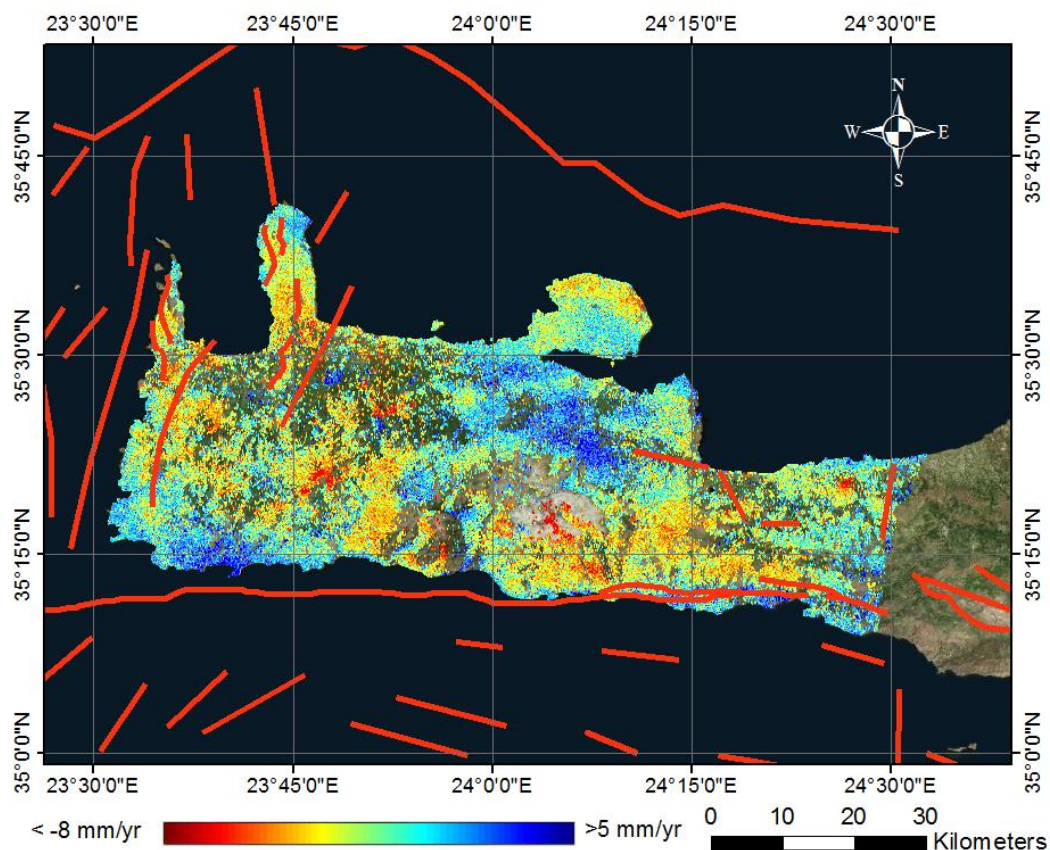
Οι τελικοί χάρτες διαχρονικής εδαφικής παραμόρφωσης παρήχθησαν έπειτα από την επεξεργασία των αρχικών δεδομένων με τα λογισμικά SARscape και StaMPS. Ακολουθούν οι χάρτες αυτοί από τα δύο λογισμικά (εικόνα 6.1).



Εικόνα 6.1: Ταχύτητες παραμόρφωσης Δ. Κρήτης. Αριστερά: SARscape Δεξιά: StaMPS

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι εκτιμήσεις της ταχύτητας του λογισμικού StaMPS που παρουσιάζονται στην μελέτη αυτή είναι σχετικές με το μέσο όρο της ταχύτητας εντός της περιοχής αναφοράς που επιλέχθηκε γύρω από τον σταθμό GPS 'CHAN' και δεν απεικονίζουν απόλυτη κίνηση. Από την άλλη πλευρά, οι ταχύτητες του λογισμικού SARscape έχουν υπολογιστεί με επίπεδο αναφοράς τον μέσο όρο των ταχυτήτων των σημείων που επιλέχθηκαν στο στάδιο της δεύτερης αντιστροφής (§5.2.7).

Οι διαφορές που παρατηρούνται στα αποτελέσματα των δύο λογισμικών οφείλονται στα διαφορετικές περιοχές αναφοράς που ορίστηκαν, στην διαφορετική χρωματική κλίμακα καθώς επίσης και στο γεγονός ότι το λογισμικό SARscape στο στάδιο του Refinement & Reflattening (§5.2.5) θεωρεί τα σημεία ελέγχου που επιλέγει ο χρήστης ως σημεία με μηδενικό ρυθμό μετατόπισης. Όμως, στο αποτέλεσμα που παρουσιάζεται παραπάνω, τα σημεία αυτά επιλέχθηκαν σε περιοχές που τελικά φαίνεται να παρουσιάζουν παραμόρφωση, επομένως αναμενόμενο είναι μερικά σημεία να εμφανίζουν λανθασμένα πρότυπα ταχυτήτων.



Εικόνα 6.2: Ταχύτητες παραμόρφωσης Δ. Κρήτης με ρήγματα - StaMPS

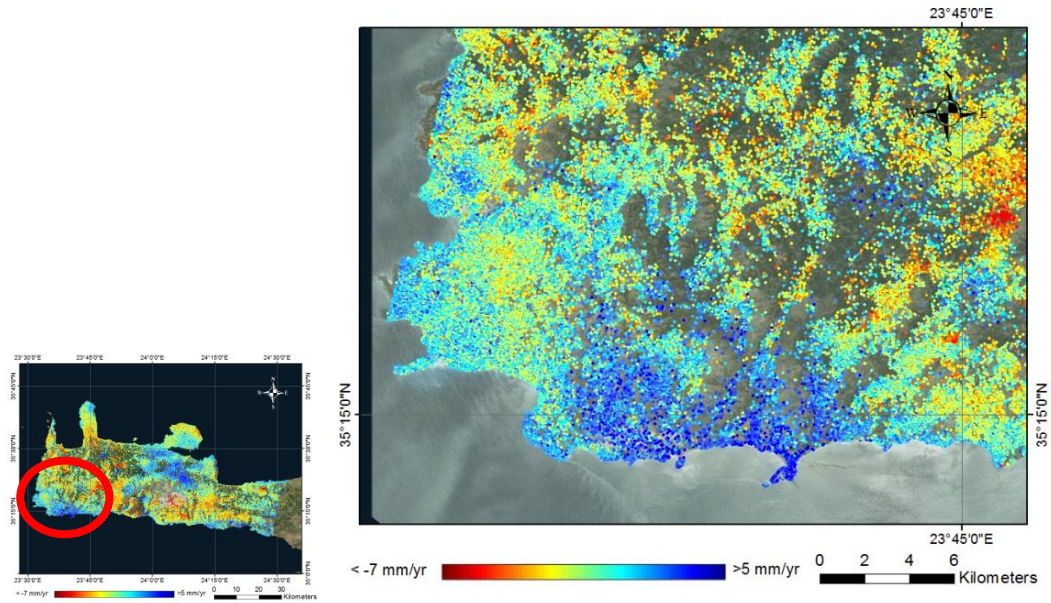
Στην εικόνα 6.2 φαίνονται οι ταχύτητες που εξήχθησαν από το StaMPS μαζί με τα ρήγματα (<http://194.177.194.115/panearth/mapfix.html>) που έχουν χαρτογραφηθεί στην περιοχή.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται ανάλυση μερικών σημείων ενδιαφέροντος σε τοπική κλίμακα και αναφέρονται ενδεχόμενοι λόγοι για τους οποίους παρουσιάζονται τα φαινόμενα καθίζησης ή ανύψωσης.

### **Νοτιοδυτικό τμήμα Κρήτης**

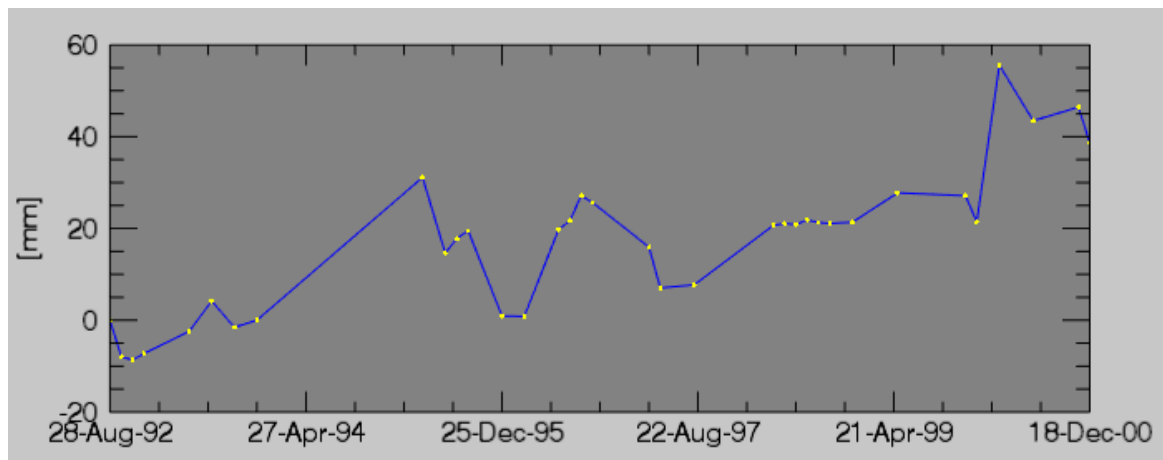
Αρχικά, στον παραπάνω χάρτη ταχυτήτων παρατηρείται έντονα η ανύψωση στο νότιο τμήμα της Κρήτης λόγω της σύγκρουσης Αφρικανικής και Ευρασιατικής πλάκας λίγο νοτιότερα από την Κρήτη. Η ανύψωση αυτή, δηλαδή η απόσταση της περιοχής με το δορυφόρο μειώνεται, είναι της τάξης των  $+5\text{mm/year}$  στο Νότιο-Δυτικό άκρο του νησιού (εικόνα 6.3), ενώ κατά μήκος της ακτογραμμής του νότιου τμήματος, η ανύψωση αυτή είναι της τάξης των  $+2-3 \text{ mm/year}$  σε μερικά σημεία.



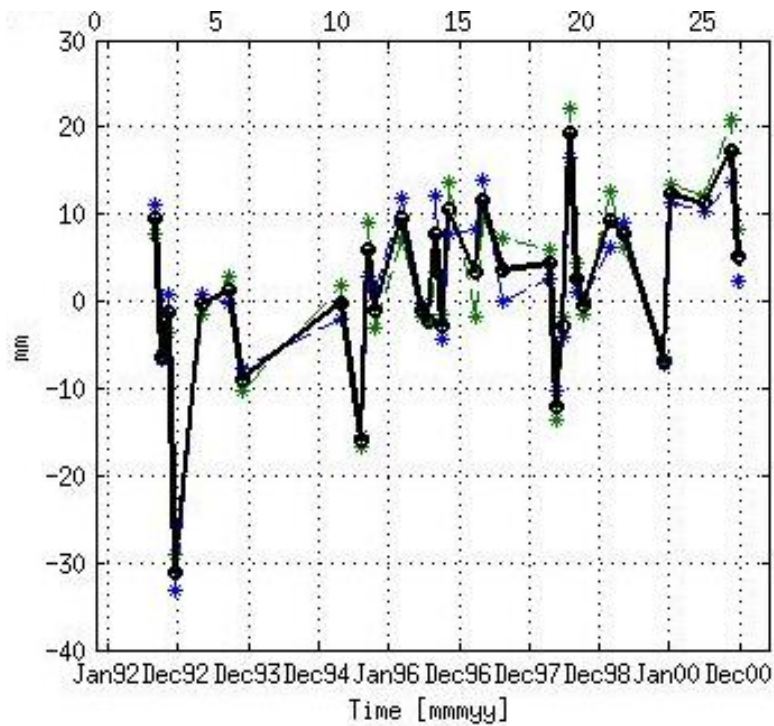


Εικόνα 6.3: Ταχύτητες παραμόρφωσης στο νότιο τμήμα της Δ. Κρήτης.

Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η συμπεριφορά αυτή έγιναν τα διαγράμματα της διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένα σημεία στην περιοχή. Παρατηρείται και στα δύο λογισμικά ότι με την πάροδο του χρόνου υπάρχει τάση ανύψωσης των σημείων στην περιοχή (σχήμα 6.1 και σχήμα 6.2).

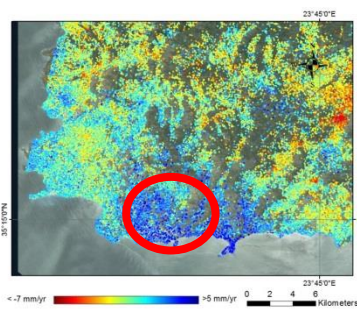


Σχήμα 6.1: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένο σημείο στην ζώνη ανύψωσης - SARscape



Σχήμα 6.2: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένο σημείο στην ζώνη ανύψωσης – StaMPS

Το φαινόμενο αυτό επαληθεύεται και από επιτόπιες παρατηρήσεις. Κοντά στον οικισμό Γιαλός, παρατηρούνται ανυψωμένες ακτογραμμές και επιφάνειες ισοπέδωσης στην ακτή λόγω των έντονων ανυψωτικών κινήσεων της χέρσου (εικόνα 6.4).

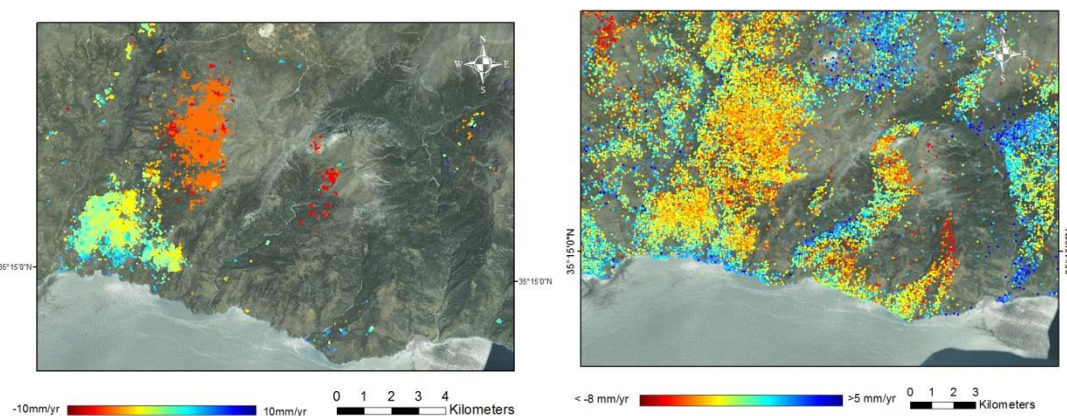


Εικόνα 6.4: Αριστερά: Ανυψωτικές κινήσεις όπως μετρήθηκαν από τις χρονοσειρές συμβολομετρίας. Δεξιά: Θαλάσσιες αναβαθμίδες ένδειξης ανυψωτικών κινήσεων Πηγή:

ΙΓΜΕ

## Περιοχή Εθνικού Δρυμού Σαμαριάς

Μετά από την επεξεργασία των SAR δεδομένων των δορυφορικών συστημάτων ERS1 και ERS2, στην περιοχή του εθνικού δρυμού της Σαμαριάς και πιο συγκεκριμένα νοτιότερα του οροπεδίου του Ομαλού παρατηρείται μια καθίζηση της τάξης των  $-6\text{mm/year}$ . Καθίζηση ονομάζεται η απομάκρυνση της περιοχής μελέτης από τον δορυφόρο στην διεύθυνση Line Of Sight (εικόνα 6.5).



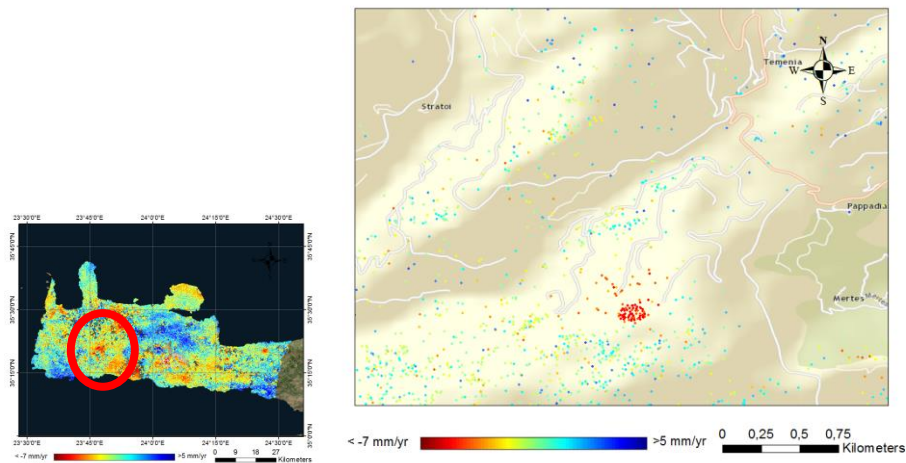
Εικόνα 6.5: Ταχύτητες παραμόρφωσης φαραγγιού Σαμαριάς. Αριστερά: SARscape, Δεξιά: StaMPS

Η γεωλογία της περιοχής είναι εντυπωσιακή, με ρήγματα στους σχηματισμούς και πολλές πτυχές. Κατά μήκος του φαραγγιού παρατηρούνται τα μεγάλα άλματα των ρηγμάτων. Το φαράγγι αποτελεί ένα τεράστιο ενεργό ρήγμα. Οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί που συνθέτουν το γεωλογικό υπόβαθρο το Εθνικού Δρυμού Σαμαριάς είναι τρεις: πλακώδεις κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, συμπαγείς ασβεστόλιθοι, δολομίτες και λιθώνες, δηλαδή χαλαροί σχηματισμοί από κομμάτια βράχων που συσσωρεύονται στις πλαγιές (Γεωδιαδρομές, ΙΓΜΕ, 2009).

Στην συγκεκριμένη περιοχή τα πετρώματα είναι πλακώδεις ασβεστόλιθοι. Πάνω από αυτούς τους πλακώδεις ασβεστόλιθους, υπάρχουν σε ορισμένα σημεία της οροσειράς, πολύ μικρά στρώματα φλύσχη που αποτέθηκε πριν από 30 περίπου εκατομμύρια χρόνια κλείνοντας τη διαδικασία σχηματισμού των πετρωμάτων της ομάδας των "Πλακωδών Ασβεστόλιθων" (Plattenkalk).

## Αρχαία Υρτακίνα

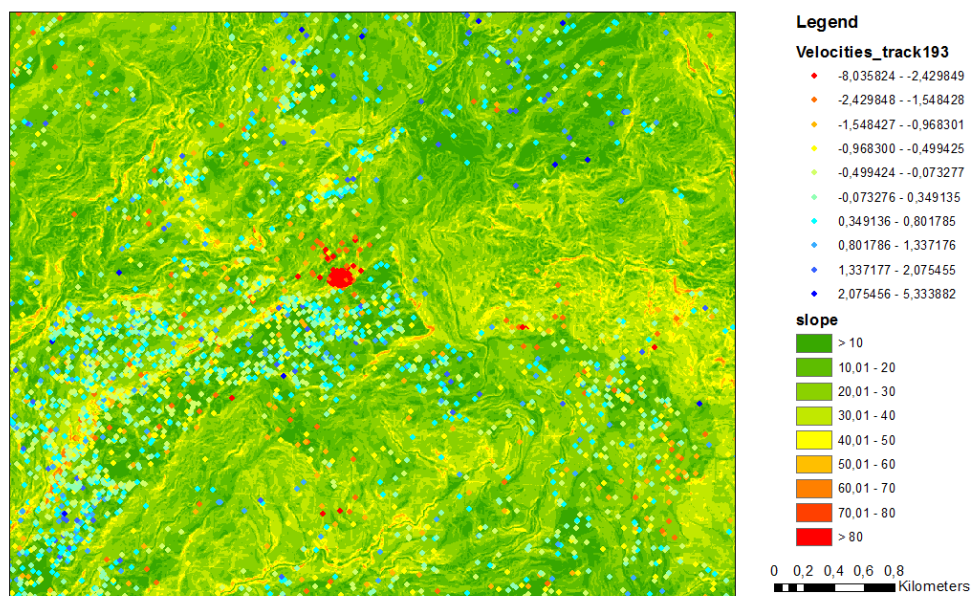
Η Υρτακίνα, περιοχή του δήμου Καντάνου-Σελίνου ήταν μία από τις σπουδαιότερες αρχαίες πόλεις της ορεινής ενδοχώρας του νοτιοδυτικού τμήματος της Κρήτης. Η ίδρυση της πόλης ή τουλάχιστον η αρχική εγκατάσταση εκεί, τοποθετείται στην Πρώιμη εποχή του Σιδήρου.



Εικόνα 6.6: Ταχύτητες παραμόρφωσης περιοχής αρχαίας Υρτακίνας

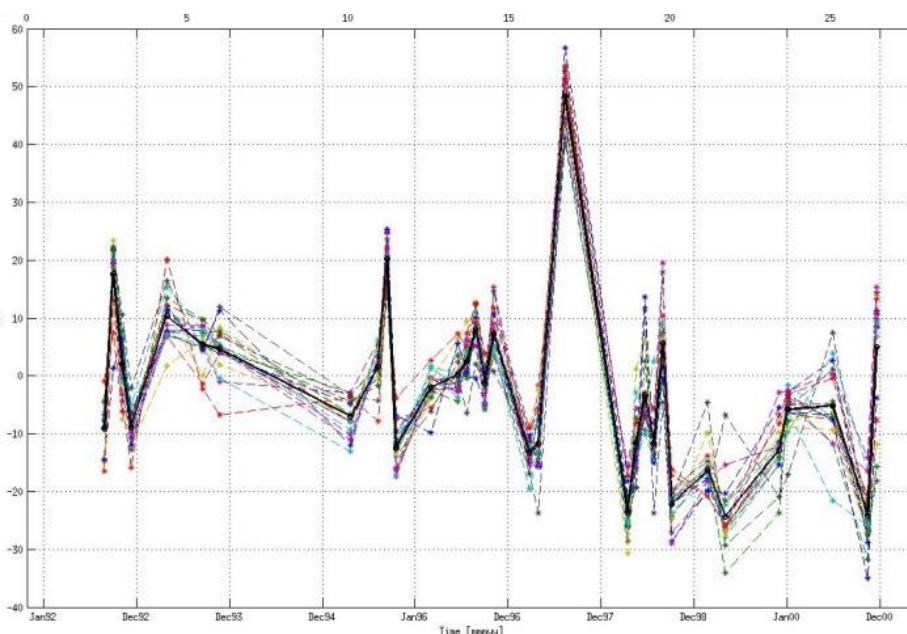
Στην εικόνα 6.6, στα αριστερά, παρατηρείται με κόκκινο χρώμα μια έντονη καθίζηση της περιοχής στην οποία βρίσκονται τα ερείπια της αρχαίας Υρτακίνας και δεξιά

Έπειτα, στην εικόνα 6.7 συνδυάζονται οι ταχύτητες παραμόρφωσης με την γωνία κλίσης της περιοχής και παρατηρείται ότι η κλίση του εδάφους είναι περίπου 15-30 μοίρες.



Εικόνα 6.7: Ταχύτητες παραμόρφωσης και κλίση εδάφους περιοχής αρχαίας Υρτακίνας

Στην περιοχή αυτή, οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται είναι φυλλιτικοί – χαλαζιτικοί. Πρόκειται για σχηματισμούς που αποσαθρώνονται εύκολα, με αποτέλεσμα να καλύπτονται συχνά από χαλαρό εδαφικό μανδύα σημαντικού πάχους. με την επίδραση δευτερογενών διεργασιών (ορυκτολογικές εξαλλοιώσεις με σχηματισμό αργιλικών ορυκτών, ισχυρή δράση των αποσαθρωτικών παραγόντων, τεκτονική καταπόνηση), οι φυλλιτικοί σχηματισμοί πολύ συχνά εμφανίζουν έντονη αστάθεια και χαλάρωση μέχρι σημαντικού βάθους, με σοβαρό υποβιβασμό των μηχανικών αντοχών, ιδιαίτερα της διατμητικής αντοχής.



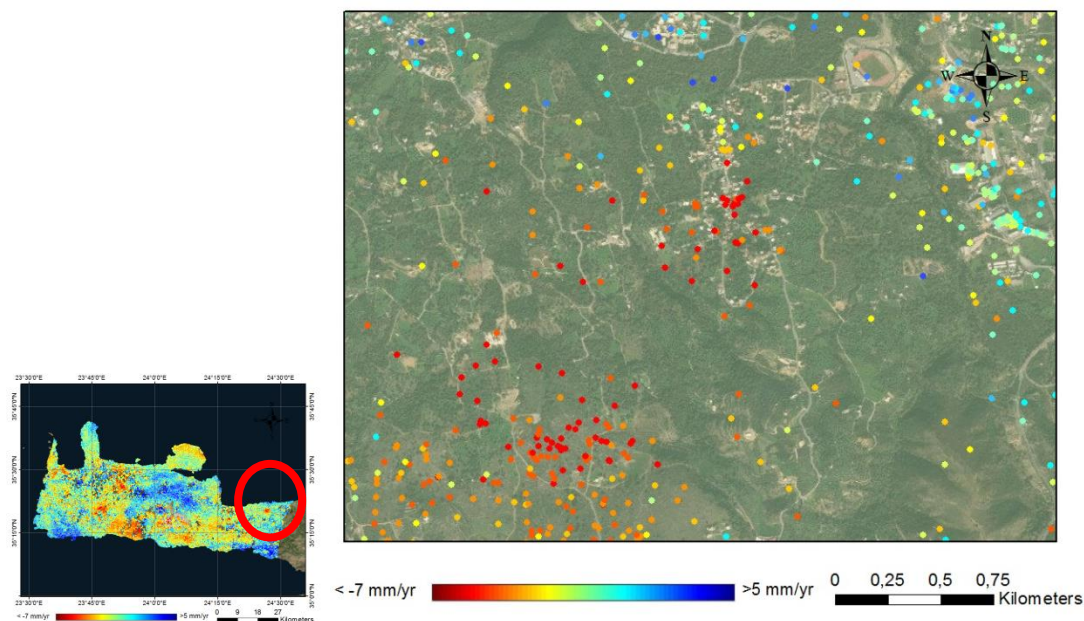
Σχήμα 6.3: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένο σημείο στον οικισμό αρχαίας Υρτακίνας – StaMPS

Παραθέεται και ένα διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης σε ένα από τα σημεία της περιοχής, στο οποίο φαίνεται η τάση του εδάφους να καθιζάνει (σχήμα 6.3).

### Οικισμός Γάλλου

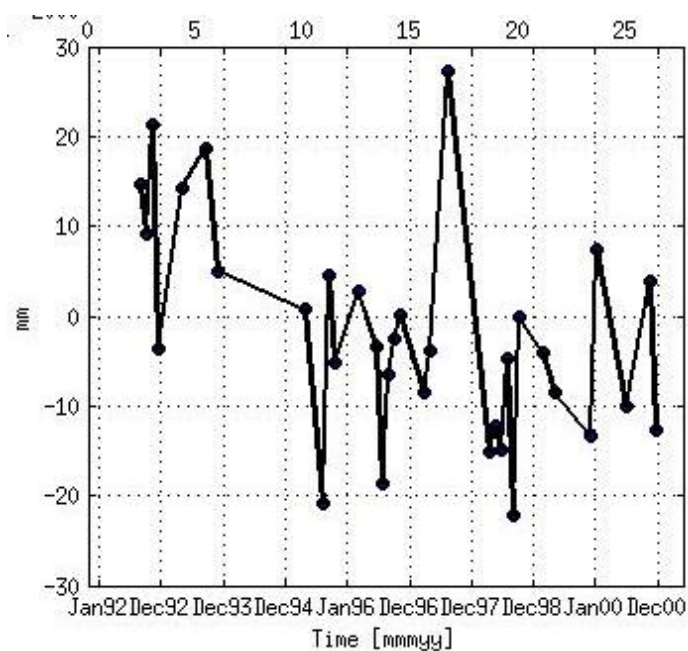
Ο οικισμός Γάλλου βρίσκεται νοτιοδυτικά της πόλης του Ρεθύμνου και απέχει από αυτήν μόλις 3,5 χιλιόμετρα. Έχει κηρυχθεί παραδοσιακός οικισμός με το προεδρικό διάταγμα 7183/21-9-1995. Ο οικισμός περιτριγυρίζεται από πυκνή βλάστηση όλες τις εποχές του χρόνου. Στην περιοχή στεγάζεται το πανεπιστήμιο Κρήτης από το 1998. Στην Πανεπιστημιούπολη του Γάλλου βρίσκονται τα τμήματα της Φιλοσοφικής Σχολής, της Σχολής Κοινωνικών, Οικονομικών και Πολιτικών Επιστημών και των Επιστημών της Αγωγής.

Στον οικισμό αυτό μπορεί να εντοπιστεί εύκολα και με τα δύο λογισμικά ένα φαινόμενο καθίζησης. Η καθίζηση αυτή είναι της τάξης των -6 mm/γ (εικόνα 6.8).



Εικόνα 6.8: Ταχύτητες παραμόρφωσης περιοχής Γάλλου

Δίνονται επίσης και μερικά διαγράμματα χρονοσειρών της περιοχής που εμφανίζει την καθίζηση (σχήμα 6.4)



Σχήμα 6.4: Διάγραμμα διαχρονικής παραμόρφωσης σε επιλεγμένο σημείο στην περιοχή του οικισμού Γάλλου – StaMPS

Σε όλα τα σημεία της περιοχής παρατηρείται αυτή η έντονη καθίζηση που εντοπίζεται κυρίως από το 1993 έως το 1995. Έπειτα η περιοχή φαίνεται να έχει μια σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης γύρω από το μηδέν.

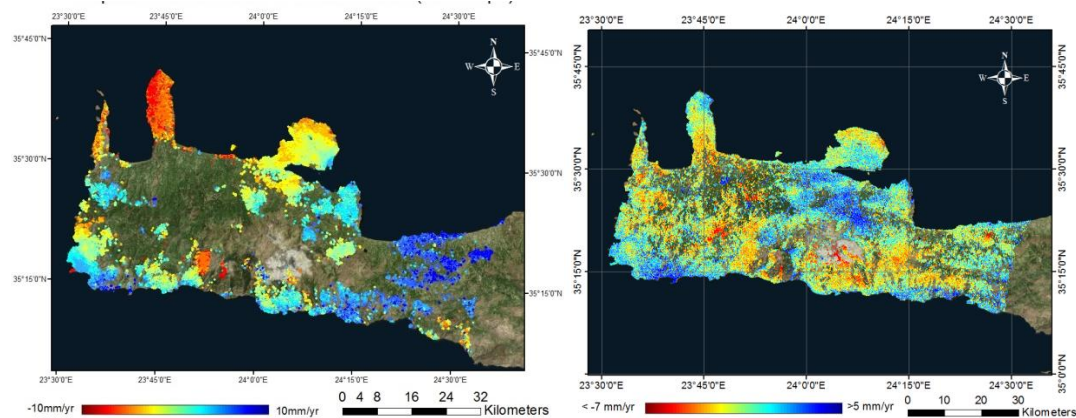
Για ερμηνεία της τάσης που παρατηρείται στην περιοχή αυτή χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.

## 6.2. Σύγκριση λογισμικών

Για την επεξεργασία της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά SARscape και StaMPS. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια αναφορά στις λειτουργίες των δύο λογισμικών και μια σύγκριση. Τα κριτήρια που θεωρούνται σημαντικά για την επιλογή λογισμικού είναι:

- ✓ Κόστος άδειας
- ✓ Ύπαρξη και κόστος υποστήριξης, γραμμή επικοινωνίας
- ✓ Πρόσβαση στον κώδικα
- ✓ Συχνότητα ενημερώσεων
- ✓ Δυνατότητες λογισμικού (εστίαση, phase unwrapping, γεωκωδικοποίηση κλπ)
- ✓ Ευκολία χειρισμού και ύπαρξη βοηθητικών εγγράφων
- ✓ Χρόνος επεξεργασίας
- ✓ Σταθερότητα-Αξιοπιστία (Robustness)

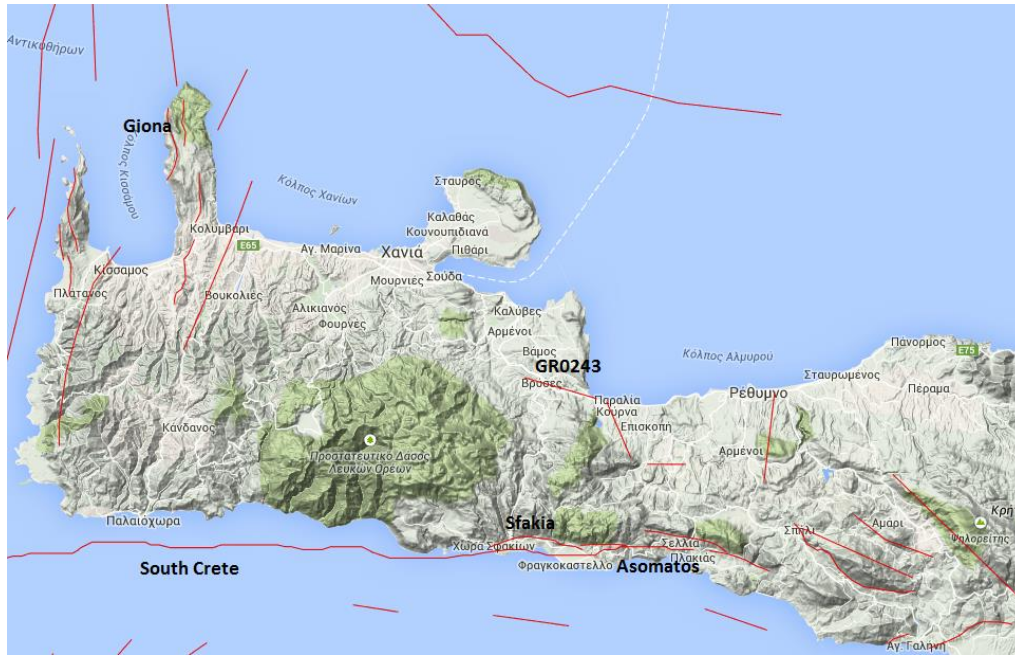
Στην εικόνα 6.9 φαίνονται οι χάρτες παραμόρφωσης από τα δύο λογισμικά. Παρατηρείται ότι υπάρχουν πολλά σημεία που εμφανίζουν παρόμοιο πρότυπο παραμόρφωσης.



Εικόνα 6.9: Ταχύτητες παραμόρφωσης SARscape vs. StaMPS

Οι διαφορές που εντοπίζονται οφείλονται στην διαφορετική χρωματική κλίμακα και στο γεγονός ότι στο λογισμικό StaMPS το σημείο αναφοράς έχει τοποθετηθεί στην περιοχή των Χανίων ενώ στο SARscape το σημείο μηδέν θεωρείται ένας μέσος όρος των ταχυτήτων των σημείων που επιλέχθηκαν (εικόνα 5.13). Η χρωματική κλίμακα δεν μπορεί να συγκριθεί, διότι στο StaMPS οι ταχύτητες κυμαίνονται από  $-7\text{mm/y}$  έως  $5\text{mm/y}$ , ενώ στο SARscape από  $-10\text{mm/y}$  έως  $10\text{mm/y}$ . Επίσης, η σύγκριση δεν μπορεί να θεωρηθεί ακριβείας, αφού δεν χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα βήματα οι ίδιες παράμετροι και στην περίπτωση του SARscape χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SBAS, ενώ στο StaMPS το αποτέλεσμα προέκυψε από μια συνδυαστική μέθοδο PS και SBAS.

Παρ' όλα αυτά, παρατηρείται ότι το πρότυπο στις ασυνέχειες δεν διαφέρει ιδιαίτερα ανάμεσα στα δύο λογισμικά. Και στα δύο εμφανίζεται η ανύψωση στα νότια της περιοχής, η καθίζηση στο φαράγγι της Σαμαριάς, η καθίζηση στην περιοχή του Γάλλου και οι ασυνέχειες λόγω των ρηγμάτων "Giona", "GR043", "Sfakia", "Asomatos" και "South Crete" (εικόνα 6.10).



Εικόνα 6.10: Ρήγματα στην Δυτική Κρήτη

Στον πίνακα 6.1 απεικονίζονται μερικά σχόλια για το κάθε ένα λογισμικό για τα κριτήρια που ορίστηκαν παραπάνω. Περαιτέρω διαφορές μεταξύ τους περιγράφονται στα κεφάλαια 6.2.1 και 6.2.2.

Κριτήρια	StaMPS	SARscape
Κόστος άδειας	Ανοιχτού κώδικα	Εμπορικό λογισμικό
Ύπαρξη και κόστος υποστήριξης, γραμμή επικοινωνίας	Δίκτυο χρηστών για επιλύσεις αποριών	Έγγραφα εκμάθησης και υπηρεσίες υποστήριξης από την ομάδα συγγραφής
Συχνότητα ενημερώσεων	Κάθε 2-3 χρόνια	Κάθε 6-12 μήνες
Ευκολία χειρισμού και ύπαρξη βοηθητικών εγγράφων	Δυσκολότερο	Φιλικό προς τον χρήστη
Πρόσβαση στον κώδικα	Πρόσβαση σε όλα τα βήματα του κώδικα	Καμία πληροφορία για την λειτουργία του κώδικα
Σταθερότητα (Robustness)	ν	Αποτέλεσμα εξαρτάται από GCPs
Χρόνος επεξεργασίας	Λιγότερος σε επεξεργασία PS & SBAS	Λιγότερος στην απλή συμβολομετρία

Πίνακας 6.1: Σύγκριση λογισμικών StaMPS και SARscape



### 6.2.1. Λογισμικό StaMPS

Το πακέτο ελεύθερων λογισμικών που χρησιμοποιήθηκε περιλαμβάνει τα εξής: ROI\_PAC, DORIS (Kampes, 2003) και StaMPS (Hooper, 2006). Το StaMPS χρησιμοποιείται για επεξεργασία χρονοσειρών. Συνοδευτικά χρησιμοποιεί το ROI\_PAC για εστίαση των εικόνων πριν την βασική επεξεργασία και το DORIS για δημιουργία συμβολογραμμάτων. Η εγκατάσταση των λογισμικών αυτών γίνεται σε λειτουργικό σύστημα Linux. Η πλήρης εγκατάσταση περιλαμβάνει αρχικά την εγκατάσταση μερικών βιβλιοθηκών ανοιχτού κώδικα (lapack, fftw), πακέτων (GMT), εργαλείων (getorb, snaphu) και ελεύθερων compilers.

Το λογισμικό αυτό είναι πιο δύσκολο για εκμάθηση λόγω του ότι δεν είναι φιλικό προς το χρήστη. Υποστηρίζεται από ένα δίκτυο χρηστών για επιλύσεις προβλημάτων. Η διαδικασία της επεξεργασίας παρ' όλα αυτά είναι πολύ πιο απλή (straightforward). Αποτελείται από έναν αριθμό διαδοχικών scripts, στα οποία μπορεί να παρέμβει ο χρήστης ώστε να αλλάξει τις παραμέτρους και να ελέγξει πως τρέχει ο κώδικας στο κάθε βήμα. Στο κομμάτι της επεξεργασίας, ένα πλεονέκτημα του StaMPS είναι ότι συνδυάζει τις μεθόδους PS και SBAS κάνοντας παραδοχές ότι η παραμόρφωση ακολουθεί ένα συγκεκριμένο μοντέλο (γραμμικό κλπ.) και έτσι αυξάνεται η χωρική ανάλυση των αποτελεσμάτων. Τέλος, υπερέχει στο χρόνο που χρειάζεται για να γίνουν οι επεξεργασίες PS και SBAS συγκριτικά με το SARscape.

### 6.2.2. Λογισμικό SARscape

Το λογισμικό SARscape είναι ένα εμπορικό λογισμικό, που παρέχεται από την εταιρεία Sarmap. Διαθέτει ένα πολύ φιλικό προς το χρήστη γραφικό περιβάλλον (GUI). Εκτός από συχνές αναβαθμίσεις, παρέχονται επίσης ένα πολύ καλό πακέτο με κατάλληλα έγγραφα εκμάθησης και υπηρεσίες υποστήριξης από την ομάδα συγγραφής. Παρ' όλα αυτά, ο χρήστης δεν μπορεί να δει και να επεξεργαστεί τον κώδικα.

Η επεξεργασία στο μεγαλύτερο κομμάτι της είναι ίδια με το StaMPS, αλλά υπάρχουν διαφορές. Αρχικά, δεν χρησιμοποιούνται ODR τροχιακά δεδομένα, αλλά PRC. Δεύτερον, είναι διαθέσιμα πολλά γεωγραφικά συστήματα αναφοράς για την διαδικασία της γεωκωδικοποίησης. Επίσης, αν χρησιμοποιηθεί το SRTM DEM για την επεξεργασία, μπορεί να ληφθεί κατευθείαν από το διαδίκτυο για την περιοχή μελέτης. Τέλος, ο χρόνος επεξεργασίας του λογισμικού, ιδιαίτερα στη φάση του unwrapping (αποκατάσταση φάσης), είναι αρκετά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο χρόνο που χρειάζεται το StaMPS, αλλά και πάλι υπερέχει σε σύγκριση με το StaMPS όταν πρόκειται για απλή συμβολομετρία.

Η βασικότερη διαφορά μεταξύ των δύο λογισμικών είναι ότι στο SARscape γίνεται ένας επαναπροσδιορισμός της θέσης και του προσανατολισμού της βάσης, ώστε να διορθωθούν οι τροχιακές παράμετροι. Το βήμα αυτό βασίζεται κυρίως στην επιλογή σημείων ελέγχου γνωστών συντεταγμένων (GCPs). Η διαδικασία αυτή μπορεί να δημιουργήσει ορατές ανομοιότητες στα αποτελέσματα, δηλαδή με μικρές αλλαγές στην τοποθέτηση αυτών των GCPs να έχουμε μεγάλες αλλαγές στους χάρτες παραμόρφωσης. Έτσι το αποτέλεσμα δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστο αν δεν είναι σίγουρος ο χρήστης για την επιλογή των GCP's. Αλλαγές στις παραμέτρους στο λογισμικό StaMPS επίσης είναι σημαντικές αλλά κυρίως όσον αφορά τον χρόνο επεξεργασίας και όχι το αποτέλεσμα.

### **6.3.Μελλοντικές Προτάσεις για Μελέτη**

Από την παραπάνω μελέτη φάνηκε ότι η συμβολομετρία έχει μια τεχνική κατάλληλη για ακριβείς γεωδαιτικές μετρήσεις με αυξημένη χωρική κάλυψη. Αυτό είναι και το πλεονέκτημά της σε σύγκριση με τις επιτόπιες μετρήσεις, οι οποίες παρέχουν εξαιρετική ακρίβεια αλλά μικρή χωρική και χρονική κάλυψη. Τέλος, τα δεδομένα GPS προσφέρουν υψηλή ακρίβεια και πυκνή χρονική αλλά χαμηλή χωρική κάλυψη. Γι' αυτό, ο συνδυασμός όλων των παραπάνω πηγών μέτρησης κρίνεται απαραίτητος για μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στην παρακολούθηση των μετακινήσεων.

Από την παραπάνω θεωρητική μελέτη της Συμβολομετρίας και ανάλυση της περιοχής μελέτης πρόεκυψαν μια σειρά από προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Προτείνεται η συνέχιση της μελέτης για όλο το νησί της Κρήτης, δηλαδή 4 frames με ανοδική και 4 με καθοδική τροχιά. Επίσης, η εργασία αυτή αναφέρεται στην περιοχή της Δυτικής Κρήτης για τα έτη 1992-2001, οπότε αξίζει η επέκταση της σε όλο το νησί και για τα έτη 2001-2010 με χρήση δορυφορικών απεικονίσεων ENVISAT. Τέλος, απαιτείται μια επαλήθευση των αποτελεσμάτων με άλλα δεδομένα, όπως υδρολογικά, γεωλογικά κλπ. για μια εμβάθυνση στα αίτια που προκαλούν τις παραμορφώσεις αυτές.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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

Cloude, S.R., Papathanassiou, K.P., 1998. Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 36, 1551–1565.

Colesanti, C., Ferretti, A., Locatelli, R., and Savio, G., 2003a. Multiplatform permanent scatterers analysis: \_rst results. In *Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, 2003. 2nd GRSS/ISPRS Joint Work-shop on*, pages 52-56

Crosetto, M., Monserrat O., Jungner, A., Crippa, B., 2009. Persistent scatterer interferometry: potential and limits. *ISPRS archives*, vol. XXXVIII-1-4-7/W5

Delikaraogloy, D., « Special Topics in Satellite Geodesy » National Technical University of Athens, Athens 2005

Delft Institute for Earth-Oriented Space research. Delft Precise Orbits, 2012. URL <http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorsb/orbits/>.

Elias, P., 2003, 'Ground deformation observed in the western Corinth rift (Greece) by means of SAR Interferometry', Dissertation of the ecole doctorale des Sciences de la Terre and University of Patras.

European Space Agency (2014) Geometry Glossary <https://earth.esa.int/handbooks/asar/CNTR5-5.htm>

Ferretti, A., Ferrucci, F., Prati, C., and Rocca, F., 2000a. SAR analysis of building collapse by means of the permanent scatterers technique. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International*, volume 7, pages 3219-3221 vol.7.

Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F., 2000b. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 38(5):2202-2212.

Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39, 8–20.

Ganas, A., Parsons, T., 2009. Three-dimensional model of Hellenic Arc deformation and origin of the Cretan uplift, *Journal Geophysical Research*, 114, B06404

Goldstein, R.M., Werner, Charles, L., 1998. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications. *Geophys. Res. Lett.* 25, 4035–4038.

Hanssen, R., 1998. Atmospheric heterogeneities in ERS tandem SAR interferometry. The NetherlandsQ Delft University Press.

- Hanssen, R., 2001. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Remote Sensing and Digital Image Processing. Book series, vol 2. Kluwer Academic, Dordrecht
- Hooper, A., A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research*, 35(L16302), 2008.
- Hooper, A., StaMPS/MTI Software Version 3.3b1. 2010a.
- Hooper, A., StaMPS/MTI Manual. Delft University of Technology, 2010b. Version 3.3b1.
- Hooper, A., 2006. Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation. PhD thesis, Stanford University. Department of Geophysics
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., and Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophys. Res. Lett.*, 31(23):L23611
- Hurn, J., 1989, GPS, A guide to the next utility. Trimble Navigation, Ltd. (online version at: [www.trimble.com/gps](http://www.trimble.com/gps))
- Jones, K. M Measurement of Seismic Displacements, A comparison of SAR and GPS techniques, with particular reference to a recent Californian earthquake.
- Jung, Jae-Hoon. Monitoring of Landslide in Kangwondo area by 2-pass differential interferometry technique., ISPRS XXI Congress, 2008. 7
- Kampes, B., Hanssen, R., Perski, Z. (2003). Radar nterferometry with Public Domain Tools, In: Proceedings of Fringe 2003, December 1-5, Frascati, Italy.
- Karamvavis, K., «Εκτίμηση του Ύψους Δασικής Κομοστέγης με τη Χρήση Συμβολομετρίας Διπλής Συχνότητας», Diploma Thesis, Athens 2014 – National Technical University of Athens
- Karathanasi, B., 2006. Microwave Remote Sensing. National Technical University of Athens, [http://147.102.110.2/main/studies/environ/6402/Course\\_1.pdf](http://147.102.110.2/main/studies/environ/6402/Course_1.pdf)
- Luzi, G., 2010. Ground Based SAR Interferometry: a Novel Tool for Geoscience: Chapter 1 in book "Geoscience and Remote Sensing New Achievements", Published: February 1, 2010 under CC BY-NC-SA 3.0 license.
- Mao, A., Harrison, C.G.A., Dixon, T.H., 1999. Noise in GPS coordinate time series. *Journal of Geophysical Research* 104, 2797–2816
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. and Rabaute, T., 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364, 138-142.
- Mora, O., Mallorqui, J., and Broquetas, A., 2003. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 41(10):2243-2253.

Natural Resources Canada, Government of Canada, 2013. <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9325>

Osmanoğlu, B., Dixon, T., Wdowinska, S., Cabral-Canob, E., Jianga, Y., 2011 Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(1):1-12.

Papoutsis, I., 2014, 'Radar Interferometry for Monitoring Crustal Deformation, Geodetic Application in Greece', Ph.D. Dissertation of Diplomat Electrical and Computer Engineer N.T.U.A, Athens

Papoutsis, I., Papanikolaou, X., Floyd, M., Ji, K., Kontoes, C., Paradissis, D., Anastasiou, D., and Ganas, A. (2013b). The Santorini inflation episode: from start to finish.

Papoutsis, I., Papanikolaou, X., Floyd, M., Ji, K. H., Kontoes, C., Paradissis, D., and Zacharis, V. (2013c). Mapping inflation at Santorini volcano, Greece, using GPS and InSAR. *Geophysical Research Letters*, 40(2):267-272.

Samieie-Esfahany, S., Hansson, R., van Thienen-Visser, K., and Muntendam-Bos, A., 2009. On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates. *Fringe 2009 Workshop*

Sarmap, 2014. SARscape 5.1 Help. [https://www.exelisvis.com/docs/pdf/sarscape\\_5.1\\_help.pdf](https://www.exelisvis.com/docs/pdf/sarscape_5.1_help.pdf)

sarmap, ESA, and Bilko, 2007. The SAR guidebook, examples based on SARscape. [http://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/SAR\\_Guidebook.pdf](http://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/SAR_Guidebook.pdf)

Sarmap, July 2013. Sbas tutorial version 2.0. [http://www.sarmap.ch/tutorials/sbas\\_tutorial\\_V\\_2\\_0.pdf](http://www.sarmap.ch/tutorials/sbas_tutorial_V_2_0.pdf)

Sella, G.F., Dixon, T.H., Mao, A., 2002. REVEL: a model for recent plate velocities from space geodesy. *Journal of Geophysical Research* 107 (April)

Zou, Wei-bao, LI Yan, LI Zhi-lin, DING Xiao-li. Improvement of the accuracy of InSAR image co-registration based on tie points—A review [J]. *Sensors*, 2009, 9(2):1259–1281.

### **Πηγές στο διαδίκτυο**

<http://www.geo.auth.gr/>

<https://directory.eoportal.org/>

<http://www.deos.tudelft.nl/>

<http://portal.tee.gr/portal/page/portal/library>



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

a/a	Year	Latitude	Longitude	Depth	Richter
1	62	24,10	34,80	0	7,5
2	365	23,40	35,20	0	8,3
3	448	24,80	34,80	0	7,2
4	1612	23,80	35,00	0	7,2
5	1630	23,70	35,00	0	7,3
6	1646	24,40	35,40	0	6,0
7	1681	23,50	35,40	0	7,0
8	1805	24,00	35,00	0	7,0
9	1910	23,80	35,70	90	6,8
10	1913	24,00	35,00	60	6,1
11	1915	24,00	35,00	0	5,9
12	1915	24,00	35,00	0	5,3
13	1916	24,50	35,00	0	5,1
14	1920	24,00	35,00	0	5,0
15	1930	24,50	34,70	60	5,8
16	1930	23,80	35,20	0	5,5
17	1943	24,30	35,10	0	5,7
18	1944	23,40	35,10	0	5,2
19	1946	23,50	35,20	70	5,8
20	1946	23,40	35,10	70	5,1
21	1947	23,40	35,10	0	5,4
22	1947	23,40	35,10	0	6,3
23	1947	23,40	35,10	0	5,0
24	1948	23,40	35,10	0	5,8
25	1948	24,40	35,20	80	6,6
26	1948	23,40	35,10	0	5,8
27	1949	23,40	35,10	0	5,1
28	1949	24,10	34,70	0	5,2
29	1950	24,10	34,70	0	5,1
30	1951	24,10	34,70	0	5,0
31	1952	23,40	35,10	0	5,1
32	1953	24,10	34,70	0	5,8
33	1954	23,50	35,25	0	5,1
34	1955	24,00	34,70	0	5,1
35	1958	23,60	35,40	0	5,1
36	1959	24,72	35,00	0	6,3
37	1959	23,60	35,60	0	5,5
38	1961	23,40	35,60	60	5,2
39	1962	24,20	35,20	85	5,0
40	1964	24,29	35,04	64	5,2
41	1965	24,21	35,03	0	6,1
42	1965	23,50	35,60	37	5,7

43	1966	24,47	34,88	0	5,1
44	1966	23,50	35,00	17	5,5
45	1968	24,30	35,00	58	5,2
46	1969	24,20	34,80	35	5,2
47	1971	23,98	34,85	42	5,0
48	1972	23,89	35,41	18	5,0
49	1972	24,71	34,96	26	5,3
50	1972	23,60	35,10	40	6,5
51	1972	24,81	35,15	4	5,3
52	1973	23,75	35,18	0	6,0
53	1974	24,62	34,85	9	5,0
54	1977	23,43	35,32	0	5,6
55	1978	23,72	34,97	29	5,1
56	1979	24,04	34,85	17	5,4
57	1983	23,92	34,64	21	5,0
58	1984	24,41	34,99	119	5,2
59	1984	23,66	34,63	145	5,1
60	1987	23,41	35,51	53	5,1
61	1995	23,94	34,73	9	5,6
62	1995	23,99	34,76	17	5,3
63	1996	23,91	35,32	8	5,1
64	1997	24,48	34,67	32	5,0
65	2003	23,79	35,02	19	5,1
66	2004	23,39	34,66	15	6,0
67	2005	23,40	34,66	34	5,1
68	2005	23,51	35,08	33	5,2
69	2009	23,53	35,26	35	5,0

Πίνακας Α1: Στοιχεία σεισμών Δυτικής Κρήτης το χρονικό διάστημα -550-2014 με μέγεθος  $M > 5$

Id	Mission	Start	Stop	Baseline diff από 19951225	Baseline diff από 19970324
1	ERS-1	1992-06-19 09:04:40.48	1992-06-19 09:05:14.00	716	312
2	ERS-1	1992-08-28 09:04:49.12	1992-08-28 09:05:26.37	199	-205
3	ERS-1	1992-10-02 09:04:49.13	1992-10-02 09:05:26.38	-158	-562
4	ERS-1	1992-11-06 09:04:43.41	1992-11-06 09:05:20.66	-270	-674
5	ERS-1	1992-12-11 09:04:34.13	1992-12-11 09:05:11.38	210	-194
6	ERS-1	1993-01-15 09:05:00.00	1993-01-15 09:05:17.52	316	-88

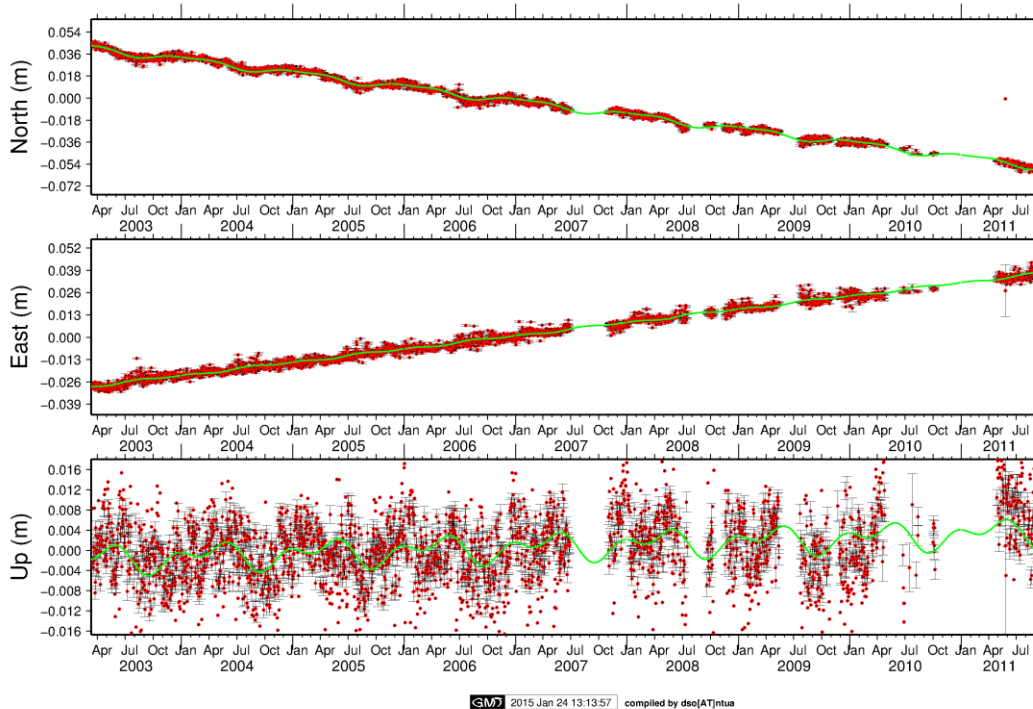


7	ERS-1	1993-03-26 09:04:37.27	1993-03-26 09:05:10.00	328	-76
8	ERS-1	1993-04-30 09:04:31.48	1993-04-30 09:05:08.73	-333	-737
9	ERS-1	1993-06-04 09:05:10.00	1993-06-04 09:05:25.99	1326	922
10	ERS-1	1993-07-09 09:04:39.13	1993-07-09 09:05:16.38	1525	1121
11	ERS-1	1993-09-17 09:04:47.13	1993-09-17 09:05:24.38	-198	-602
12	ERS-1	1993-10-22 09:05:17.00	1993-10-22 09:05:32.99	-308	-712
13	ERS-1	1993-11-26 09:04:36.06	1993-11-26 09:05:13.31	-318	-722
14	ERS-1	1995-04-23 09:04:42.56	1995-04-23 09:05:19.81	602	198
15	ERS-1	1995-05-28 09:04:46.56	1995-05-28 09:05:20.00	462	58
16	ERS-1	1995-07-02 09:04:47.41	1995-07-02 09:05:24.66	1305	901
17	ERS-2	1995-07-03 09:04:50.59	1995-07-03 09:05:27.84	-	-
18	ERS-2	1995-08-07 09:04:53.73	1995-08-07 09:05:30.98	199	-205
19	ERS-2	1995-09-11 09:04:49.90	1995-09-11 09:05:27.15	1315	911
20	ERS-2	1995-10-16 09:04:54.65	1995-10-16 09:05:31.90	-757	-1161
21	ERS-2	1995-12-25 09:04:51.72	1995-12-25 09:05:28.97		-404
22	ERS-1	1996-03-03 09:04:48.56	1996-03-03 09:05:25.81	-157	-561
23	ERS-2	1996-03-04 09:04:48.78	1996-03-04 09:05:26.03	-140	-544
24	ERS-1	1996-05-12 09:05:25.00	1996-05-12 09:05:40.99	-101	-505
25	ERS-2	1996-05-13 09:05:25.00	1996-05-13 09:05:40.99	63	-341
26	ERS-2	1996-06-17 09:04:48.86	1996-06-17 09:05:26.11	751	347
27	ERS-2	1996-07-22 09:04:49.04	1996-07-22 09:05:26.29	116	-288
28	ERS-2	1996-09-30 09:04:47.21	1996-09-30 09:05:24.46	614	210
29	ERS-2	1996-11-04 09:04:47.66	1996-11-04 09:05:24.91	-783	-1187
30	ERS-2	1997-03-24 09:04:43.28	1997-03-24 09:05:20.53	404	
31	ERS-2	1997-04-28 09:04:41.77	1997-04-28 09:05:19.02	831	427

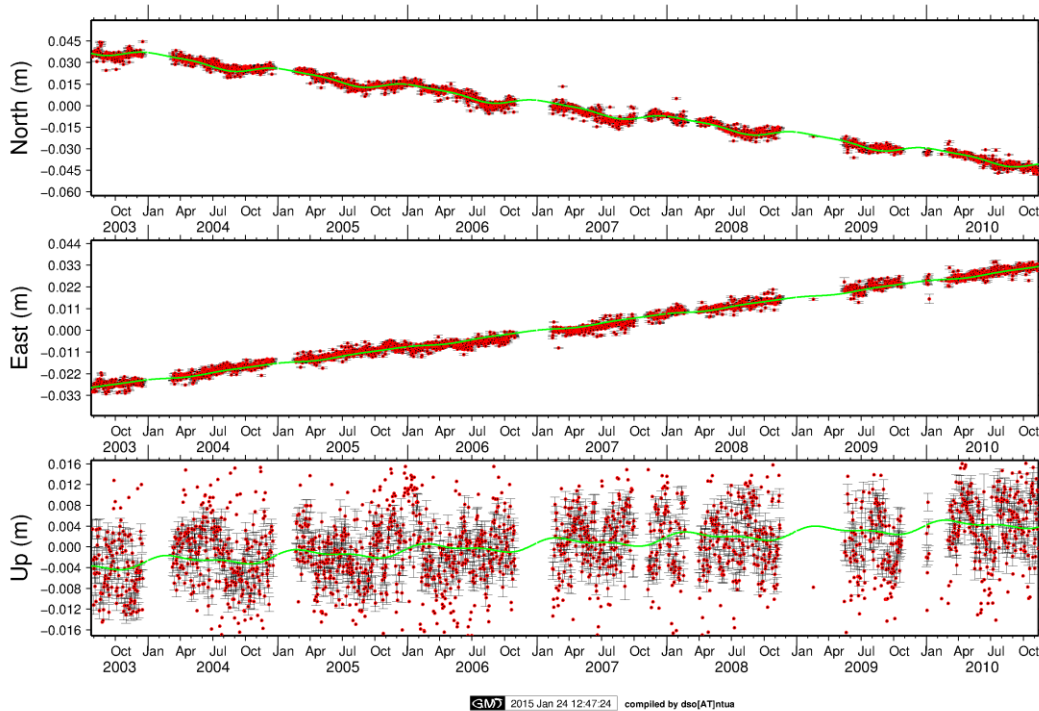
32	ERS-2	1997-08-11 09:04:45.73	1997-08-11 09:05:22.98	322	-82
33	ERS-2	1998-04-13 09:04:41.81	1998-04-13 09:05:19.06	522	118
34	ERS-2	1998-05-18 09:04:39.97	1998-05-18 09:05:17.22	21	-383
35	ERS-2	1998-06-22 09:04:36.00	1998-06-22 09:05:13.25	-8	-412
36	ERS-2	1998-07-27 09:04:40.62	1998-07-27 09:05:17.87	510	106
37	ERS-2	1998-08-31 09:04:43.65	1998-08-31 09:05:20.90	164	-240
38	ERS-2	1998-10-05 09:04:43.34	1998-10-05 09:05:20.59	-221	-625
39	ERS-2	1998-11-09 09:04:23.99	1998-11-09 09:04:40.00	-449	-853
40	ERS-2	1998-12-14 09:04:36.74	1998-12-14 09:05:13.99	1183	779
41	ERS-2	1999-02-22 09:04:39.13	1999-02-22 09:05:16.38	-656	-1060
42	ERS-2	1999-05-03 09:04:42.00	1999-05-03 09:05:19.25	-43	-447
43	ERS-1	1999-09-19 09:04:16.99	1999-09-19 09:04:33.00	-133	-537
44	ERS-2	1999-09-20 09:04:25.00	1999-09-20 09:04:41.00	141	-263
45	ERS-2	1999-11-29 09:04:34.66	1999-11-29 09:05:11.91	818	414
			AVERAGE:	230,9302326	-182,4651163

Πίνακας Α.2: Διαφορά διανυσμάτων βάσης με πιθανές εικόνες master Πηγή: Eolisa, ESA

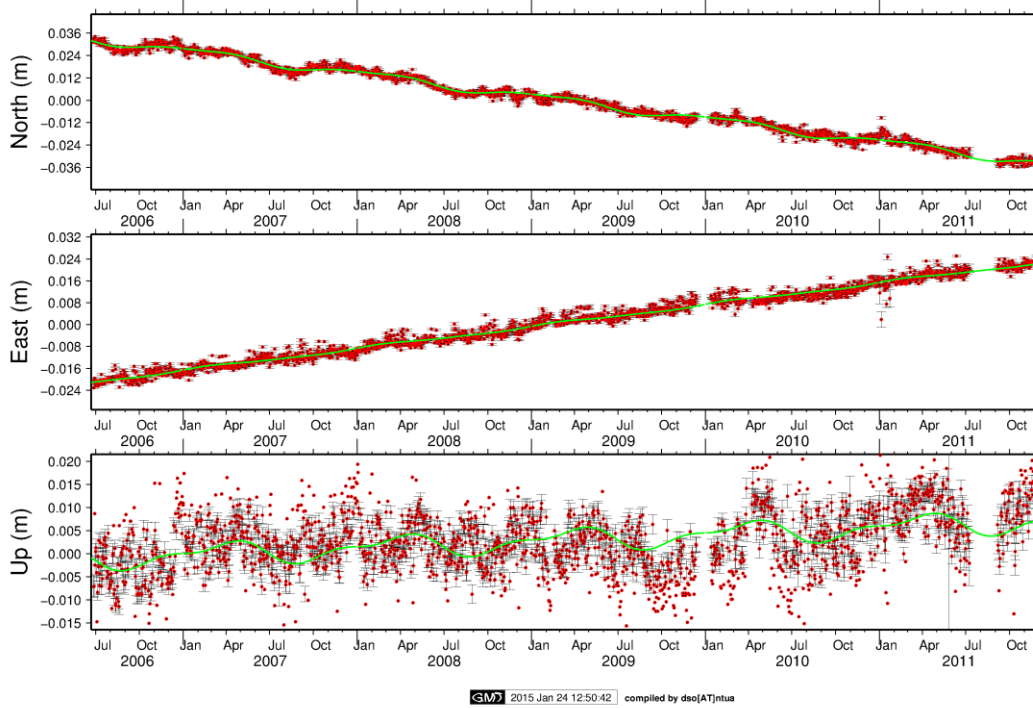
### cGPS station xrso



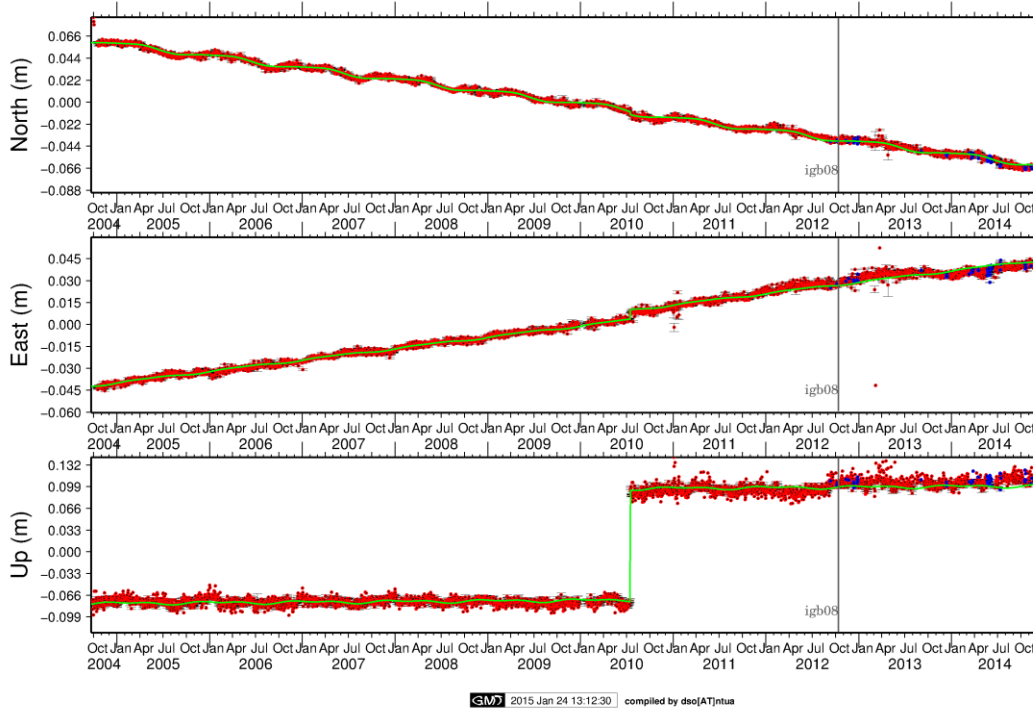
### cGPS station anop



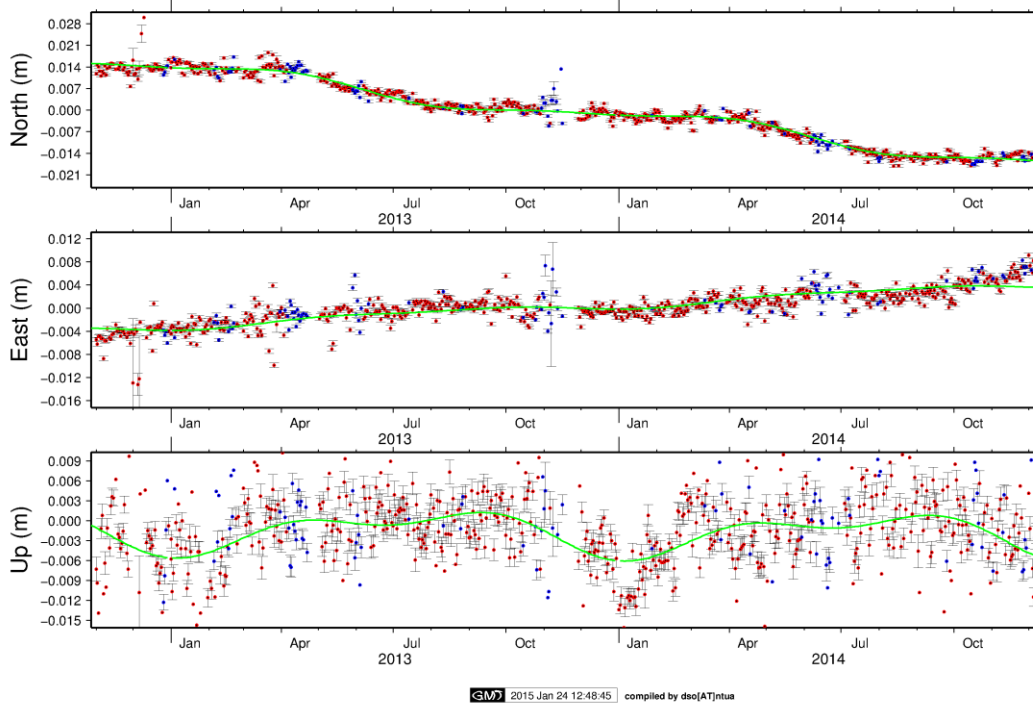
### cGPS station gvds



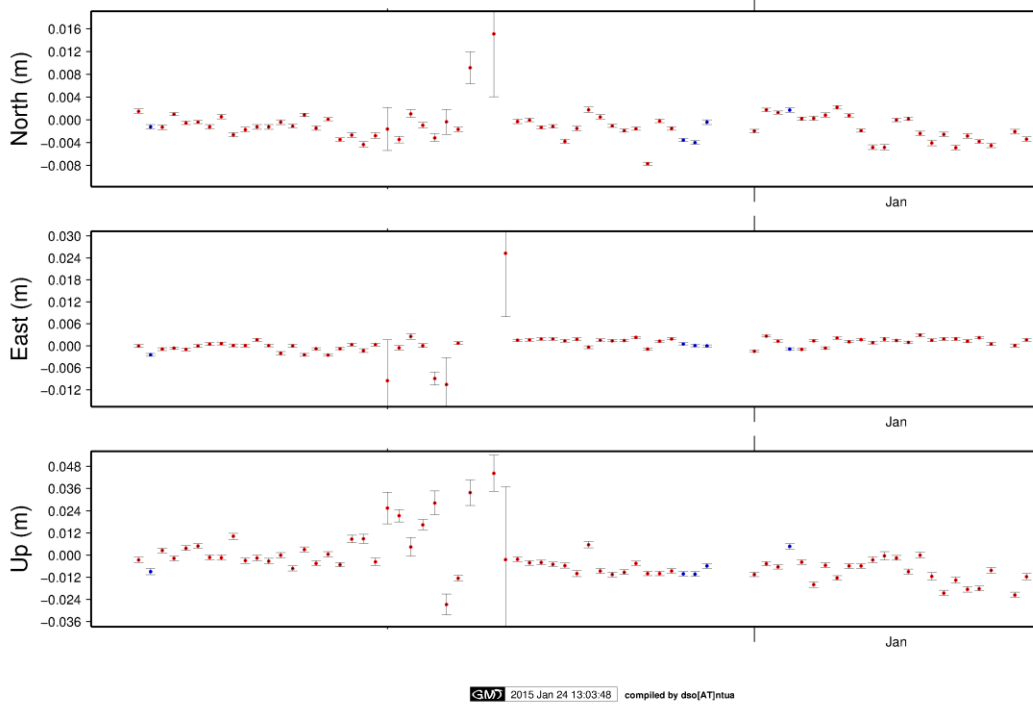
### cGPS station tuc2



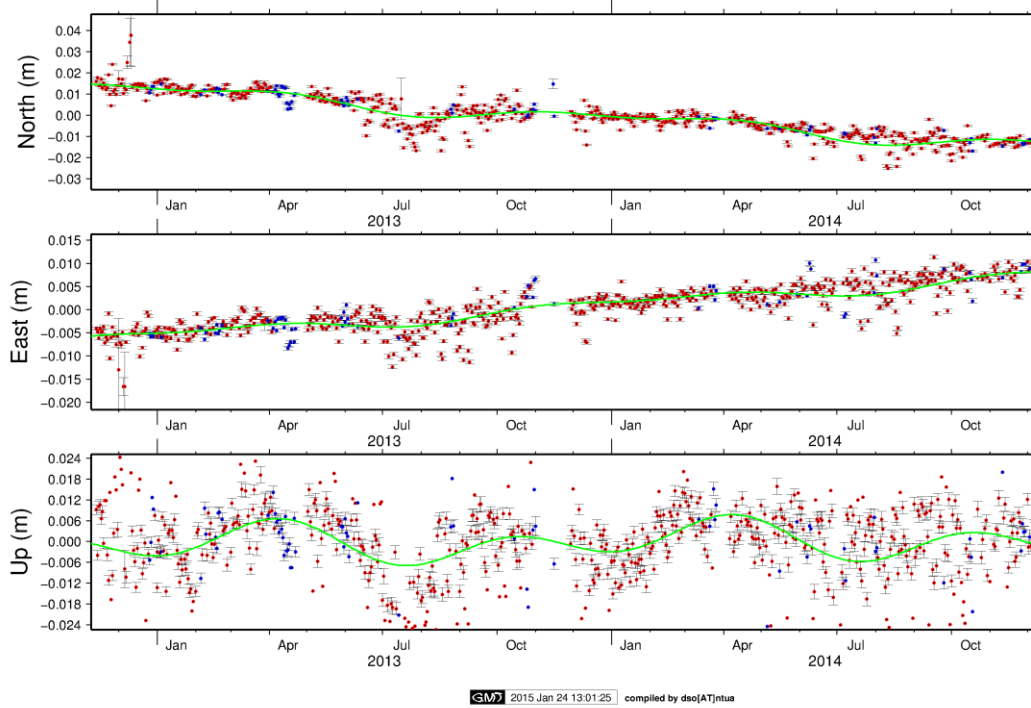
### cGPS station chan



### cGPS station pala



### cGPS station murt



Πίνακας Α3: Ανεπεξέργαστα δεδομένα GPS για τους σταθμούς XRSO, ANOP, GVDS, TUC2, CHAN, PALA και MURT αντίστοιχα