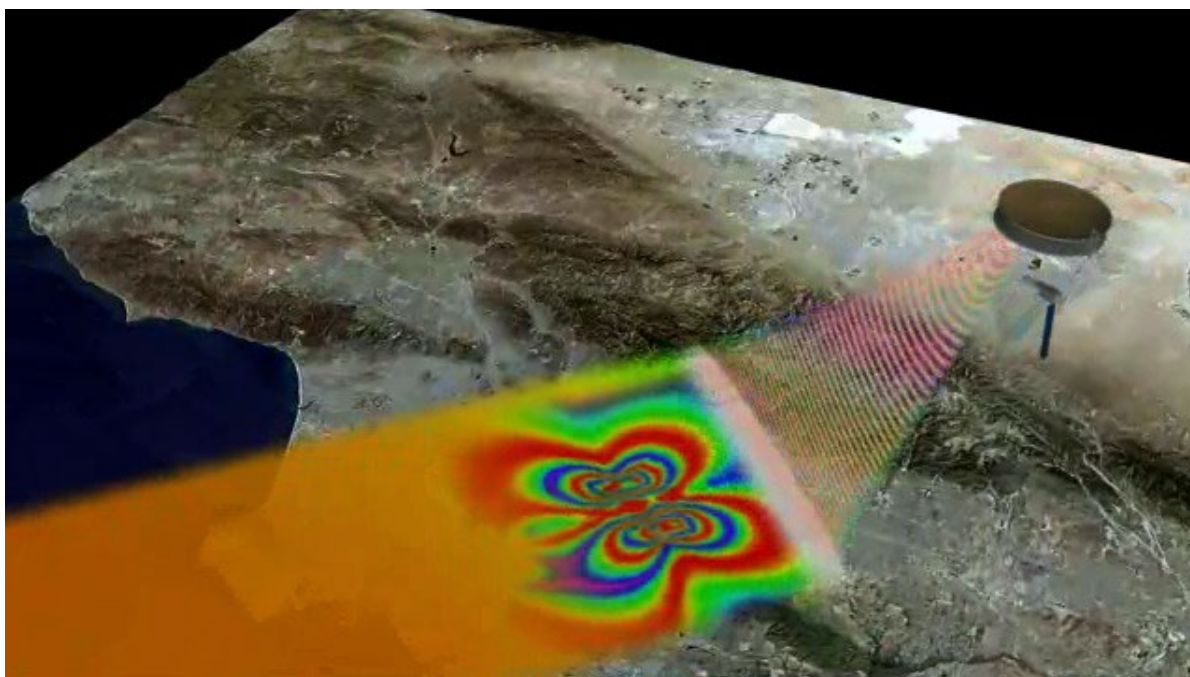


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»

Παρακολούθηση παραμορφώσεων εδάφους με συμβολομετρία δορυφορικών
εικόνων Radar



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΧΑΡΔΑΛΟΥΠΑΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ

Εξεταστική Επιτροπή
Στυλιανός Π. Μερτίκας, Καθηγητής (Επιβλέπων)
Παναγιώτης Παρτσινέβελος, Καθηγητής
Εμμανουήλ Βαρουχάκης, Επίκουρος Καθηγητής

Χανιά
Μάιος, 2023

Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η παρακολούθηση και ο εντοπισμός περιοχών που παρουσιάζουν παραμορφώσεις με τη χρήση δορυφορικών εικόνων SAR από την αποστολή Sentinel-1 της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (European satellite Agency, ESA) στο νομό Χανίων Κρήτης, Ελλάδα.

Η έντονη τοπογραφία του εδάφους της Κρήτης σε συνδυασμό με τη σεισμική δραστηριότητα της περιοχής αλλά και με τις παραμορφώσεις που προκαλούνται από τα ακραία καιρικά φαινόμενα, καθιστά αναγκαία τη συνεχή παρακολούθηση των εδαφικών παραμορφώσεων της.

Για την υλοποίηση του παραπάνω έργου στο νομό Χανίων δημιουργήθηκε χάρτης ταχυτήτων του εδάφους από 129 εικόνες SAR του δορυφόρου Sentinel-1A μέσω της διαχρονικής τεχνικής κατανεμημένων σκεδαστών (Distributed Scatterers, DS), υποσυνόλων μικρών βάσεων (Small Baseline Subset, SBAS). Επίσης πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων με δεδομένα από τους πέντε μόνιμους σταθμούς GPS/GNSS που έχουν εγκατασταθεί στην δυτική Κρήτη από το Εργαστήριο Γεωδαισίας και Πληροφορικής των Γεωεπιστημών της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων (ΜΗΧΟΠ) του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η χρήση της συμβολομετρίας δορυφορικών εικόνων Radar επιλέχθηκε έναντι άλλων τεχνικών παρακολούθησης εδαφικών παραμορφώσεων όπως το GPS λόγω της μεγάλης εδαφικής κάλυψης που παρέχει. Με την συμβολομετρία παρέχεται η δυνατότητα για παρατήρηση μικρομετακινήσεων σε έκταση 250km² στην επιφάνεια της Γης, ενώ με τους σταθμούς GNSS γίνεται μόνο σε συγκεκριμένα σημεία που είναι εγκαταστημένος ο δέκτης GPS.

Σημαντική πρόκληση για τη διαδικασία αποτέλεσαν τα μεγάλα όγκου δεδομένα (για την επεξεργασία τους χρειάστηκε αποθηκευτικός χώρος άνω των 3 TB), καθώς και η απαιτούμενη επεξεργαστική ισχύς.

Αρχικά, δημιουργήθηκαν 630 συμβολογραφήματα από τις 129 εικόνες SAR, στα οποία έγινε κατάλληλη επεξεργασία ώστε να αφαιρεθούν οι κύριες αιτίες που προκαλούν θόρυβο στη συμβολομετρική φάση όπως οι παλίρροιες της στερεάς Γης (Solid Earth Tides, SET) και η τροπόσφαιρα. Στη συνέχεια σχηματίστηκε ο χάρτης ταχυτήτων του εδάφους και πραγματοποιήθηκε σύγκριση με δεδομένα από τους μόνιμους σταθμούς GPS.

Μετά τη σύγκριση από τα δεδομένα GPS, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ήταν της τάξης του 1,54 mm/yr, κατά συνέπεια η μέθοδος της διαφορικής συμβολομετρίας διαπιστώθηκε πολύ ακριβής.

Εντοπίστηκαν 7 περιοχές που παρουσιάζουν επιφανειακές μετατοπίσεις κυρίως σε ορεινές περιοχές με ταχύτητες μετακίνησης εύρους από 7 έως 20 mm/yr.

Προτείνεται σε μελλοντική έρευνα να χρησιμοποιηθούν περισσότερες εικόνες και να πραγματοποιηθούν περισσότερες συνδέσεις μεταξύ των εικόνων SAR, ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Monitoring ground deformations with interferometry of Radar satellite images.

Abstract

The purpose of this Master's thesis is the monitoring and identification of areas that exhibit deformations using SAR satellite images from the Sentinel-1 mission of the European Space Agency (ESA) in the region of Chania, Crete, Greece. The intense topography of the terrain in Crete, in combination with the seismic activity of the region and the deformations caused by extreme weather phenomena, makes continuous monitoring of ground deformations necessary.

The rugged topography of the soil in Crete, combined with the seismic activity of the area and the deformations caused by extreme weather phenomena, makes continuous monitoring of soil deformations necessary.

To implement the above project in the region of Chania, a map of ground velocities was created from 129 SAR images of the Sentinel-1A satellite using the DInSAR (Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry) technique of Distributed Scatterers (DS) and Small Baseline Subset (SBAS). Additionally, a comparison was made between the results and data from the five permanent GPS/GNSS stations established by the Laboratory of Geodesy and Informatics of the School of Mineral Resources Engineering at the Polytechnic University of Crete in Chania.

The use of SAR satellite images was chosen over other ground deformation monitoring techniques such as GPS due to the large ground coverage it provides. With interferometry, it is possible to observe micro-movements in an area of 250 km² on the Earth's surface, while with GNSS stations it is done only at specific points where the GPS receiver is installed.

A significant challenge for the process was the large data volume (required storage space, over 3 TB), and the required processing power.

Initially, 630 interferograms were created from 129 SAR images, which were appropriately processed to remove the main causes of noise in the interferometric phase, such as the solid Earth tides (SET) and the troposphere. Then, the map of ground velocities was formed, and a comparison was made with data from permanent GPS stations.

After comparing GPS data, the average quadratic error was found to be on the order of 1,54 mm/yr, indicating that the differential interferometry method is highly accurate. Seven areas were identified that show surface displacements mainly in mountainous regions with displacement speeds ranging from 7 to 20 mm/yr.

It is suggested that in future research, more images should be used and more connections between SAR images should be made to improve the accuracy of the results.

Ευχαριστίες

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, επιθυμώ να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνεργάστηκαν μαζί μου και έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στην ολοκλήρωσή της.

Πρώτον από όλους θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Στυλιανό Μερτίκα, Διευθυντή του Εργαστηρίου Γεωδαισίας και Πληροφορικής των Γεωεπιστημών, για την πολύτιμη καθοδήγηση, εμπιστοσύνη και εκτίμηση που μου έδειξε.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω το εργαστηριακό διδακτικό προσωπικό και ιδιαίτερα τον κ. Ξενοφών Φραντζή που με υπομονή και επιμονή στάθηκε πολύτιμος αρωγός ώστε να ολοκληρωθεί η εργασία.

Την αγαπημένη μου Δήμητρα που με υπομονή αφιέρωσε το χρόνο της και με στήριζε κατά την διάρκεια της συγγραφής και τον αδερφό μου Ιάκωβο για την βοήθειά του και τις εύστοχες παρατηρήσεις του.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον παππού μου και τη γιαγιά μου Διονύσιο και Ευαγγελία Χαρδαλούπα, και τους γονείς μου για την στήριξη και την φροντίδα τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο.

Περιεχόμενα

Ευρετήριο Συντομεύσεων.....	x
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Δομή διατριβής	4
1.2 Συμβολή διατριβής.....	5
Κεφάλαιο 2 Δορυφορικά συστήματα παρακολούθησης	7
2.1 Radar πραγματικού ανοίγματος κεραίας RAR	8
2.2 Radar συνθετικού ανοίγματος κεραίας SAR	11
2.3 Οι Δορυφόροι SAR.....	13
2.4 Οι δορυφόροι Sentinel-1.....	16
Κεφάλαιο 3 Η εικόνα SAR	19
3.1 Γεωμετρικές ιδιότητες	19
3.2 Ραδιομετρικές ιδιότητες	21
3.3 Διηλεκτρική σταθερά	22
3.4 Τραχύτητα	23
3.5 Πόλωση.....	24
Κεφάλαιο 4 Συμβολομετρία	27
4.1 Συνάφεια (Coherence)	32
4.2 Προσδιορισμός απόλυτης συμβολομετρικής Φάσης (Phase Unwrapping)	33
Κεφάλαιο 5 Διαφορική συμβολομετρία εικόνων Radar	36
5.1 Διαχρονικές τεχνικές διαφορικής συμβολομετρίας	37
5.2 Συμβολομετρία μόνιμων σκεδαστών (PSI)	38
5.3 Συμβολομετρία κατανεμημένων σκεδαστών (DSI).....	38
Κεφάλαιο 6 Επεξεργασία.....	40
6.1 Δημιουργία συμβολογραφημάτων	43
6.2 Εφαρμογή της διαχρονικής μεθόδου υποσυνόλων μικρών βάσεων (SBAS) στο νομό Χανίων	47
6.3 Αποτελέσματα – Σύγκριση DInSAR με GPS	62
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	74
Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	77
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	88
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	92

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Τα δύο είδη δορυφορικών συστημάτων Radar.....	7
Σχήμα 2.2: Γεωμετρία Radar πραγματικού ανοίγματος κεραίας.....	9
Σχήμα 2.3: Τα Radar συνθετικού ανοίγματος κεραίας και η διαδικασία σύνθεσης της μεγάλης κεραίας με τη μετατόπιση της συχνότητας κατά Doppler.(Μερτίκας, 1999)	12
Σχήμα 2.4: Η διαδικασία μετατόπισης της συχνότητας κατά Doppler. (Μερτίκας, 1999).....	13
Σχήμα 2.5: Η τεχνική σάρωσης TOPSAR.(ESA).....	17
Σχήμα 3.1: Η γεωμετρική παραμόρφωση σμίκρυνση.....	20
Σχήμα 3.2: Η γεωμετρική παραμόρφωση αναστροφή.....	20
Σχήμα 3.3: Το φαινόμενο της σκίασης	21
Σχήμα 3.4: Τα στίγματα (speckles) σε εικόνα SAR.(Πηγή: https://earth.esa.int)	22
Σχήμα 3.5: Ο ρόλος της περιεχόμενης υγρασίας στη διηλεκτρική σταθερά (Μερτίκας, 1999).	23
Σχήμα 3.6: Εξάρτηση εδαφικής τραχύτητας με μήκος κύματος παλμού: Α) Λεία επιφάνεια Β) Μέση τραχύτητα Γ) Υψηλή τραχύτητα.....	24
Σχήμα 3.7: Κατηγορίες σκεδαστών: Α) Επιφανειακοί σκεδαστές Β) Χωρικοί σκεδαστές Γ) Σκεδαστές διπλή ανάκλασης.	25
Σχήμα 4.1: Πείραμα Young. (Πηγή: http://abyss.uoregon.edu).....	28
Σχήμα 4.2: Κατηγορίες συμβολομετρίας: Α) Εγκάρσια συμβολομετρία Β) Διαμήκη συμβολομετρία.	29
Σχήμα 4.3: Τυπική γεωμετρία συμβολομετρίας Radar.	29
Σχήμα 4.4: Συμβολογράφημα από σεισμό στην Ιαπωνία. (Πηγή: https://forum.step.esa.int).	30
Σχήμα 4.5: Χωρική συνάφεια στο νομό Χανίων στη γεωμετρία του δορυφόρου.	33
Σχήμα 4.6: Προσδιορισμός απόλυτης συμβολομετρικής φάσης.....	34
Σχήμα 6.1: Μόνιμοι σταθμοί GPS/GNSS στο νομό Χανίων.	40
Σχήμα 6.2 Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας.	42
Σχήμα 6.3: Πλαίσιο εικόνων SAR, με κίτρινο πλαίσιο η περιοχή ενδιαφέροντος και με κόκκινο πλαίσιο η περιοχή του καλύπτει η εικόνα SAR	43
Σχήμα 6.4: Το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο AW3D30.	45
Σχήμα 6.5: Διάγραμμα ροής προγράμματος stackSentinel. (Fattahi & Amelung, 2015)	46
Σχήμα 6.6: Δεδομένα εισαγωγής στο πρόγραμμα MintPy στη γεωμετρία του δορυφόρου: Α) Συμβολομετρική φάση Β) Χωρική συνάφεια Γ) Ενωμένα στοιχεία.....	47
Σχήμα 6.7: Διάγραμμα ροής προγράμματος MintPy. (Yunjun et al.,2019)	48
Σχήμα 6.8: Το δίκτυο των συμβολογραφημάτων με την μέση χωρική συνάφεια.....	49
Σχήμα 6.9: Τριάδα συμβολογραφημάτων για κλείσιμο φάσης.	51
Σχήμα 6.10: Αριστερά: Χάρτης με το πλήθος μη μηδενικών τριάδων T σε γεωμετρία δορυφόρου. Δεξιά: Κατανομή μη μηδενικών τριάδων T.	51
Σχήμα 6.11: Χάρτης με το πλήθος μη μηδενικών τριάδων T μετά τη διόρθωση σε γεωμετρία δορυφόρου. Δεξιά: Κατανομή μη μηδενικών τριάδων T μετά τη διόρθωση.	52
Σχήμα 6.12: Μέση ταχύτητα του εδάφους αμέσως μετά την αντιστροφή χωρίς διορθώσεις.....	53
Σχήμα 6.13: Διαχρονική συνάφεια.	54
Σχήμα 6.14: Παλίρροιες στερεάς Γης για το μόνιμο σταθμό GPS TUC2.....	55
Σχήμα 6.15: Επίδραση από τις παλίρροιες στερεάς Γης σε γεωμετρία δορυφόρου LOS (25/03/2018). ..	56

Σχήμα 6.16: Χρονοσειρές απόλυτης τροποσφαιρικής καθυστέρησης σε γεωμετρία δορυφόρου LOS (Line Of Sight) για τον μόνιμο σταθμό GPS TUC2 με χρήση ERA5. Οι πορτοκαλί, μαύρη και μπλε γραμμές δείχνουν τη συνεισφορά της υγρής, ξηρής και του συνδυασμού των δύο αντίστοιχα.	57
Σχήμα 6.17: Συσχέτιση τροποσφαιρικής καθυστέρησης – υψομέτρου.	58
Σχήμα 6.18: Εκτίμηση σφάλματος του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου σε γεωμετρία δορυφόρου... ..	59
Σχήμα 6.19: Αναγνώριση ημερομηνιών με θόρυβο.	61
Σχήμα 6.20: Μέση ταχύτητα του εδάφους στο νομό Χανίων.	62
Σχήμα 6.21: Χρονοσειρές μετατοπίσεων των σταθμών CRS1 και RDK1.	64
Σχήμα 6.22: Χρονοσειρές μετατοπίσεων των σταθμών CDN0 και MEN2.	65
Σχήμα 6.23: Σύγκριση μέσης ταχύτητας εδάφους – υψομέτρου.	67
Σχήμα 6.24: Σύγκριση μέσης ταχύτητας εδάφους με υψόμετρο άνω των 1000 m.	68
Σχήμα 6.25: Μέση ταχύτητα μετά από διορθώσεις και αφαίρεση συσχέτισης με υψόμετρο.	69
Σχήμα 6.26: Επιφανειακή μετακίνηση στην περιοχή Ακρωτήρι βόρεια από το Χωρδάκι.	70
Σχήμα 6.27: Επιφανειακή μετακίνηση κοντά στο Λουτράκι Χανίων.	70
Σχήμα 6.28: Επιφανειακή μετακίνηση νότια από τις Κορακιές Χανίων.	71
Σχήμα 6.29: Επιφανειακή μετακίνηση σε τμήμα του BOAK κοντά στη Σούδα Χανίων.	71
Σχήμα 6.30: Μετακίνηση πλαγίας στη Χερσόνησο Γραμβούσας.	72
Σχήμα 6.31: Μέση ταχύτητα εδαφικής μετακίνησης στο Δήμο Καντάνου.	73
Σχήμα 6.32: Μέση ταχύτητα εδαφικής μετακίνησης στα βορειοδυτικά του χωριού Καλλικράτης.	73

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Αποστολές δορυφόρων συνθετικού ανοίγματος κεραίας (SAR). (Jawak, 2015)	14
Πίνακας 2: Φασματικές ζώνες μικροκυματικής ακτινοβολίας. (www.nasa.gov).....	15
Πίνακας 4: Σχετική ένταση σκέδασης ανά πόλωση.....	26
Πίνακας 5: Λογισμικά πακέτα συμβολομετρίας εικόνων Radar.	38
Πίνακας 7: Συντεταγμένες TUC2 σε WGS-84.	50
Πίνακας 8: Χωρική συνάφεια TUC2.....	50
Πίνακας 9: Ταχύτητα εδάφους από μετρήσεις των σταθμών GPS στο νομό Χανίων.	63
Πίνακας 10: Ταχύτητα εδάφους από μετρήσεις των σταθμών GPS σε γεωμετρία δορυφόρου LOS.	63
Πίνακας 11: Σύγκριση ταχυτήτων του εδάφους σε γεωμετρία LOS GPS με DInSAR και υπολογισμός μέσου τετραγωνικού σφάλματος.	66

Ευρετήριο Συντομεύσεων

ASF	Alaska Satellite Facility
DEM	Digital Elevation Model
DInSAR	Differential Interferometric SAR, Διαφορική συμβολομετρία Radar
DS	Distributed Scatterers
DSI	Distributed Scatterers Interferometry
ECMWF	European Centre for Medium Range Weather Forecasts
ERA-5	European Environment Agency
ESA	European Satellite Agency
EUREF	European Reference Frame
GACOS	Generic Atmospheric Correction Online Service
GBInSAR,	Συστήματα Επίγειας Συμβολομετρίας Radar
GLONASS	Global navigation satellite system
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
HH	Horizontal - horizontal
HV	Horizontal- Vertical
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
ISCE2	Interferometric synthetic aperture radar Scientific Computing Environment
ISRO	Indian Space Research Organisation
IW	Interferometric Wide Swath mode
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
LOS	Line of sight
MAD	Median Absolute Deviation
MERRA	Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications
MERRIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer
MintPy	Miami INsar Time-series software in Python
MST	Minimum spanning tree
NARR	North American Regional Reanalysis
NASA	National Aeronautics and Space Administration

NISAR	NASA-ISRO SAR Mission
POD	Precise Orbit Determination
PSI	Persistent Scatterer Interferometry
PyAPS	Python based Atmospheric Phase Screen estimation
PySolid	Python based solid Earth tides
RADAR Detection and Ranging	
RAR	Real Aperture Radar
RMS	Root Mean Square
SAR	Synthetic Aperture Radar
SBAS	Small Baseline Subset
SCANSAR	Scanning synthetic aperture radar
SET	Solid Earth Tides
SLAR	Side Looking Airborne Radar
SLC	Single look complex
SVD	Singular Value Decomposition
TEC	Total electron content
TLS	Terrestrial Laser scanners
TOPSAR	Terrain Observation with Progressive Scans SAR
TUC	Technical University of Crete
V	Vertical
VV	Vertical-Vertical
BOAK	Βόρειος οδικός άξονας Κρήτης

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Με την πάροδο του χρόνου παρατηρούνται εδαφικές παραμορφώσεις οι οποίες είναι απόρροια φυσικών ή ανθρωπογενών διεργασιών. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα φυσικών διεργασιών αποτελούν οι σεισμοί, κατολισθήσεις, καθιζήσεις και η ηφαιστειακή δραστηριότητα ενώ στις ανθρωπογενείς εντάσσονται οι εξορύξεις πρώτων υλών και η υπεράντληση του υδροφόρου ορίζοντα. Για την παρακολούθηση των φυσικών και ανθρωπογενών διεργασιών και των επιπτώσεων τους στο έδαφος, έχουν αναπτυχθεί διάφορα επίγεια και δορυφορικά συστήματα παρακολούθησης.

Στα επίγεια συστήματα περιλαμβάνονται τα Συστήματα Επίγειας Συμβολομετρίας Radar (GBInSAR) και τα συστήματα επίγειας σάρωσης (Terrestrial Laser scanners). Στα δορυφορικά συστήματα παρακολούθησης ανήκουν τα παγκόσμια συστήματα δορυφορικού εντοπισμού (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) όπως, το αμερικάνικο GPS (Global Positioning System), το Κινεζικό Beidou, το Ρωσικό Glonass, το Ευρωπαϊκό Galileo και τα εικονοληπτικά δορυφορικά συστήματα Radar (Sentinel, ERS).

Η συμβολομετρία δορυφορικών εικόνων Radar αποτελεί μια τεχνική για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων του εδάφους σε διάφορες περιοχές του κόσμου. Χρησιμοποιεί τη συμβολή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για να μετρήσει ιδιότητες όπως η απόσταση και η μετατόπιση σημείων στην επιφάνεια της Γης.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης της συμβολομετρίας των δορυφορικών εικόνων Radar είναι η ικανότητά της να ανιχνεύει και να μετράει ακόμη και μικρές παραμορφώσεις του εδάφους με υψηλή ακρίβεια. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να δημιουργήσει χάρτες παραμόρφωσης και χρονοσειρές μετατοπίσεων στην επιφάνεια της Γης, που μπορούν να βοηθήσουν τους ερευνητές και τις αρχές να κατανοήσουν καλύτερα τις διεργασίες που προκαλούν παραμορφώσεις στο έδαφος.

Αναλύοντας τα χωρικά και χρονικά χαρακτηριστικά των παραμορφώσεων του εδάφους στην περιοχή μελέτης, οι ερευνητές μπορούν να αποκτήσουν γνώσεις για τις υποκείμενες γεωφυσικές διεργασίες που οδηγούν στην παραμόρφωση του εδάφους. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της κατανόησης των μηχανισμών που προκαλούν σεισμούς, κατολισθήσεις και άλλους γεωλογικούς κινδύνους.

Μια άλλη σημαντική πτυχή της συμβολομετρίας είναι η δυνατότητά της, να παρέχει έγκαιρη προειδοποίηση για κινδύνους λόγω εδαφικών μετατοπίσεων. Ανιχνεύοντας ακόμη και μικρές αλλαγές στην παραμόρφωση του εδάφους με την πάροδο του χρόνου, οι ερευνητές μπορούν να εντοπίσουν περιοχές που κινδυνεύουν από κατολισθήσεις, καθιζήσεις και άλλους γεωλογικούς κινδύνους. Αυτό μπορεί να βοηθήσει τις αρχές να λάβουν προληπτικά μέτρα για τον μετριασμό κινδύνων και την πρόληψη της απώλειας ζωής ή των υλικών ζημιών.

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής πραγματοποιήθηκε παρακολούθηση των παραμορφώσεων του εδάφους με συμβολομετρία δορυφορικών εικόνων Radar. Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε ο νομός Χανίων της Κρήτης στην Ελλάδα όπου εντοπίζεται έντονο ανάγλυφο του εδάφους και πλούσια βλάστηση.

Βασικός στόχος της διατριβής είναι η διερεύνηση της καταλληλότητας και της αποτελεσματικότητας της χρήσης συμβολομετρίας δορυφορικών εικόνων Radar, για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων εδάφους στην περιοχή μελέτης. Τόσο το έντονο ανάγλυφο του εδάφους αλλά και η πλούσια χλωρίδα του νομού Χανίων, δυνητικά θα μπορούσαν να αποτελέσουν πρόκληση για τη διαδικασία. Από τη μια το ανάγλυφο προκαλεί ανακλάσεις ή σκεδάσεις των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, ενώ η βλάστηση μπορεί να απορροφήσει και να διασκορπίσει ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Και οι δύο περιπτώσεις μπορούν να μειώσουν την ακρίβεια των μετρήσεων, διότι δημιουργούνται περιοχές με υψηλή αποσυσχέτιση (Decorrelation).

Κατά συνέπεια επιμέρους στόχος της παρούσας, ήταν η διερεύνηση της ακρίβειας της μεθόδου της συμβολομετρίας υπό τις συνθήκες του έντονου αναγλύφου και της πλούσιας βλάστησης του νομού Χανίων. Ενώ η μελέτη στοχεύει επίσης, αξιολογώντας τη δυνατότητα της συμβολομετρίας για την έγκαιρη προειδοποίηση των γεωκινδύνων, να εντοπίσει και να αναλύσει τα χωρικά και χρονικά χαρακτηριστικά των παραμορφώσεων του εδάφους.

Στην εφαρμογή της διαφορικής συμβολομετρίας στην παρούσα εργασία, οδήγησε η μελέτη της βιβλιογραφίας και συγκεκριμένα η μελέτη της εργασίας των Yunjun et al., το 2019. Οι Yunjun et al., (2019) εφάρμοσαν τη συγκεκριμένη μέθοδο στα νησιά του αρχιπελάγους Γκαλαπάγκος. Στα νησιά Γκαλαπάγκος συναντάται παρόμοιο εδαφικό ανάγλυφο και παρόμοια βλάστηση με την υπό εξέταση περιοχή των Χανίων. Στην εν λόγω περιοχή του αρχιπελάγους Γκαλαπάγκος οι ερευνητές παρήγαγαν χάρτες παραμόρφωσης υψηλής ανάλυσης και για μεγάλη περιοχή, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Αφετέρου η εφαρμογή της διαφορικής συμβολομετρίας RADAR συνθετικού ανοίγματος στην περιοχή της Χρυσοσκαλίτισσας Κρήτης, εφαρμόστηκε και σε άλλες μελέτες (Μπικουβαράκη, 2011) για να διαπιστωθεί μία τάση ανύψωσης που παρουσιάζει

στην περιοχή το έδαφος. Ωστόσο η χρήση μόνο δύο εικόνων SAR, σε συνδυασμό με την απουσία διορθώσεων για τις κύριες πηγές σφαλμάτων όπως των σφαλμάτων της τροπόσφαιρας είχαν σαν αποτέλεσμα να μην επιτρέψουν την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

Η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για την επεξεργασία και την ανάλυση συμβολομετρικών δεδομένων είναι επίσης μια σημαντική πτυχή της μελέτης. Διότι αυτή η μεθοδολογία θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως βάση για μελλοντική έρευνα παρακολούθησης των παραμορφώσεων εδάφους στα Χανιά της Κρήτης εφόσον αποτελεί μέθοδο οικονομικά προσιτή, εύκολη στην εφαρμογή και δίνει υψηλή ακρίβεια. Θα μπορούσε δυνητικά να χρησιμοποιηθεί για την διαχρονική παρακολούθηση εδαφικών παραμορφώσεων και σε εθνικό επίπεδο, όπως πραγματοποιείται ήδη μέσω ανοικτής πλατφόρμας από το 2018 στη Νορβηγία (<https://insar.ngu.no/>).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χρησιμοποιούμενη μέθοδος παρακολούθησης δίνει σημαντικές δυνατότητες στους ερευνητές αλλά και στους υπευθύνους λήψης αποφάσεων διότι ποσοτικοποιεί τους γεωκινδύνους της περιοχής, μέσω των χαρτών εδαφικών μετακινήσεων. Έτσι γίνεται δυνατός ο μετριασμός των κινδύνων και η διασφάλιση της ευημερίας των πολιτών.

Τα συστήματα που επιλέχθηκαν στην παρούσα μελέτη, ήταν τα δορυφορικά συστήματα SAR ενώ χρησιμοποιήθηκαν εικόνες Radar από τον δορυφόρο Sentinel-1A της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (European Space Agency, ESA). Επίσης έγινε χρήση δεδομένων από τους μόνιμους σταθμούς GPS που διατηρεί το Εργαστήριο Γεωδαισίας και Πληροφορικής των Γεωεπιστημών της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Για τον υπολογισμό των εδαφικών παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι εικόνες SAR, διότι παρέχουν μετρήσεις για όλη την έκταση του Νομού. Κάθε δορυφορική εικόνα καλύπτει έκταση 250 km². Τα δεδομένα του δορυφόρου είναι ελεύθερα διαθέσιμα και δωρεάν (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/>). Επιπλέον αξιοποιήθηκαν μετρήσεις από τους σταθμούς GPS, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της ακρίβειας της μεθόδου παρακολούθησης. Οι εν λόγω σταθμοί GPS παρέχουν σημειακές μετρήσεις υψηλής ακρίβειας και συχνότητας.

Τέλος, για την επεξεργασία των εικόνων Radar επιλέχθηκε η διαχρονική διαφορική συμβολομετρία InSAR (multi-temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar) ή αναλυτικότερα η διαφορική συμβολομετρία κατανεμημένων σκεδαστών (Distributed Scatterers Interferometry, DSI). Η μέθοδος DSI αναδείχθηκε από την βιβλιογραφική έρευνα ως η καταλληλότερη, δεδομένου του ισχυρού αναγλύφου και της έντονης βλάστησης της υπό εξέτασης περιοχής των Χανίων.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου DSI έναντι άλλων συμβολομετρικών τεχνικών είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιήσει μεγαλύτερο αριθμό σκεδαστών, γεγονός που βελτιώνει την ακρίβεια των

μετρήσεων και μειώνει την επίδραση της αποσυσχέτισης (Decorrelation) που προκαλείται από το έντονο ανάγλυφο του εδάφους και την πλούσια βλάστηση.

Πράγματι η συγκεκριμένη μέθοδος έχει εφαρμοστεί με επιτυχία, για την παρακολούθηση εδαφικών παραμορφώσεων έπειτα από μεγάλα γεωτεχνικά έργα στην πόλη Yan της Κίνας τα οποία είχαν προκαλέσει ευρείας κλίμακας καθίζηση του εδάφους (Liao et al., 2021). Η ίδια μέθοδος εφαρμόστηκε με επιτυχία για την παρακολούθηση της κατολίσθησης Baige στο Θιβέτ, της Κίνας σε μία περιοχή μεγάλου υψομέτρου (άνω των 2000 m) και έντονου αναγλύφου (Cai et al., 2022).

1.1 Δομή διατριβής

Η παρούσα διατριβή, αφορά στην εφαρμογή της συμβολομετρίας δορυφορικών εικόνων Radar για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων του εδάφους στην περιοχή του Νομού Χανίων Κρήτης και δομήθηκε σε 7 επιμέρους ενότητες.

Αρχικά, στο θεωρητικό μέρος, προσεγγίζονται οι βασικές αρχές και η ορολογία των δορυφορικών συστημάτων παρακολούθησης Radar, αποσαφηνίζεται η διαφορά μεταξύ συμβολομετρίας και διαφορικής συμβολομετρίας ενώ παρουσιάζονται εκτενώς οι ιδιότητες των εικόνων SAR και ποιοι παράγοντες τις επηρεάζουν.

Στο πρακτικό μέρος περιγράφονται αναλυτικά όλα τα στάδια της επεξεργασίας και των διορθώσεων που πραγματοποιήθηκαν για να εξαχθούν τα ευρήματα και συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.

Αναλυτικότερα, στο πρώτο Κεφάλαιο εισάγεται το πρόβλημα που καλείται να επιλύσει η διατριβή και παρουσιάζεται η δομή της, ενώ στο δεύτερο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα είδη των Radar που είναι διαθέσιμα, τον τρόπο λειτουργίας τους και μια σύντομη αναδρομή στον τρόπο ανάπτυξής τους. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα δορυφορικά συστήματα Radar πραγματικού ανοίγματος και συνθετικού ανοίγματος, αναφέροντας αναλυτικά την γεωμετρία τους αλλά και τα πλεονεκτήματα του δεύτερου ως προς το πρώτο.

Στο τρίτο Κεφάλαιο της διατριβής αναλύονται τόσο οι ιδιότητες των εικόνων SAR αλλά και οι παράγοντες οι οποίοι τις επηρεάζουν. Συγκεκριμένα αναπτύσσονται οι γεωμετρικές και ραδιομετρικές ιδιότητες των εικόνων SAR καθώς επίσης ο τρόπος που καταγράφεται σε αυτές η

τραχύτητα του εδάφους, η διηλεκτρική σταθερά και η πόλωση στην οπισθοσκεδαζόμενη μικροκυματική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τους δορυφόρους SAR.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο αναπτύσσεται η έννοια της συμβολομετρίας ενώ παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο προκύπτει ένα συμβολογράφημα από δύο δορυφορικές εικόνες SAR, καθώς επίσης αναλύονται οι κύριες συνιστώσες της συμβολομετρικής φάσης. Τέλος δίνεται η σημασία των όρων συνάφεια και προσδιορισμός της απόλυτης συμβολομετρικής φάσης.

Στο πέμπτο Κεφάλαιο αποσαφηνίζεται η διαφορά της διαφορικής συμβολομετρίας από τη συμβατική συμβολομετρία, ενώ πραγματοποιείται ανάλυση των δύο κύριων κατηγοριών διαχρονικής διαφορικής συμβολομετρίας, ήτοι της συμβολομετρίας των μόνιμων σκεδαστών και της συμβολομετρίας των κατανεμημένων σκεδαστών, ενώ δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στη δεύτερη κατηγορία των κατανεμημένων σκεδαστών, αφού η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για να πραγματοποιηθεί στην παρούσα διατριβή.

Στο έκτο Κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή των διάφορων σταδίων της επεξεργασίας από την πρώτη εικόνα του δορυφόρου Sentinel-1 μέχρι την δημιουργία χάρτη ταχυτήτων μετατοπίσεων του εδάφους για τον νομό Χανίων. Επιπρόσθετα πραγματοποιείται, σύγκριση του εν λόγω χάρτη ταχυτήτων του εδάφους με μετρήσεις από τους μόνιμους σταθμούς GPS/GNSS που διατηρεί το Εργαστήριο Γεωδαισίας και Πληροφορικής των Γεωεπιστημών της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης ώστε να γίνει επαλήθευση της ακρίβειας της μεθόδου.

Τέλος στο έβδομο Κεφάλαιο πραγματοποιείται, η εξαγωγή των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία. Γίνονται προτάσεις για τον τρόπο με τον οποίο θα μπορούσε να βελτιωθεί η εκτίμηση της μέσης ταχύτητας των μετατοπίσεων του εδάφους μέσω της δημιουργίας περισσότερων συνδέσεων στα συμβολογραφήματα. Σε μελλοντικές έρευνες θα μπορούσε να γίνει χρήση εικόνων SAR από τον δορυφόρο Sentinel-1B.

1.2 Συμβολή διατριβής

Η παρούσα διατριβή αποτελεί μελέτη για την παρακολούθηση των εδαφικών παραμορφώσεων στο νομό Χανίων, με τη χρήση επεξεργασίας εικόνων SAR του δορυφόρου Sentinel-1A και δεδομένων GPS.

Η μελέτη αυτή έχει ως στόχο να παρουσιάσει μια μεθοδολογία για την παρακολούθηση των εδαφικών παραμορφώσεων και τον εντοπισμό περιοχών με έντονες παραμορφώσεις στο νομό Χανίων.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στο νομό Χανίων και έλαβε υπ' όψιν της, σημαντικούς παράγοντες όπως η τροπόσφαιρα και οι παλίρροιες της στερεάς Γης σε αντίθεση με προγενέστερες εφαρμογές που είχαν τοπικό χαρακτήρα.

Στην παρούσα, επιπλέον πραγματοποιήθηκε υπολογισμός χρονοσειρών μετατοπίσεων και ταχύτητες μετακινήσεων του εδάφους του νομού Χανίων από το Μάιο 2017 έως τον Αύγουστο 2021. Κατά συνέπεια τα αποτελέσματα προέκυψαν από την επεξεργασία 129 εικόνων SAR του δορυφόρου Sentinel-1A και 630 συμβολογραφημάτων. Από τα 630 συμβολογραφήματα εντοπίστηκαν περιοχές με έντονες εδαφικές παραμορφώσεις. Μάλιστα μία από τις περιοχές παρουσιάζει κατολισθήσεις αρκετά χρόνια και έχουν γίνει τεχνικά έργα συγκράτησης των βράχων.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι για την εξαγωγή των συμπερασμάτων χρησιμοποιήθηκε μεγάλος όγκος δεδομένων των πολύπλοκων εικόνων Radar και της συμβολομετρικής επεξεργασίας τους. Ταυτόχρονα έγινε χρήση αρκετών διαφορετικών λογισμικών, ενώ η ακρίβεια των αποτελεσμάτων και κατ' επέκταση η ακρίβεια της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην παρούσα, ελέγχθηκε με αποτελέσματα από επεξεργασία δεδομένων GNSS.

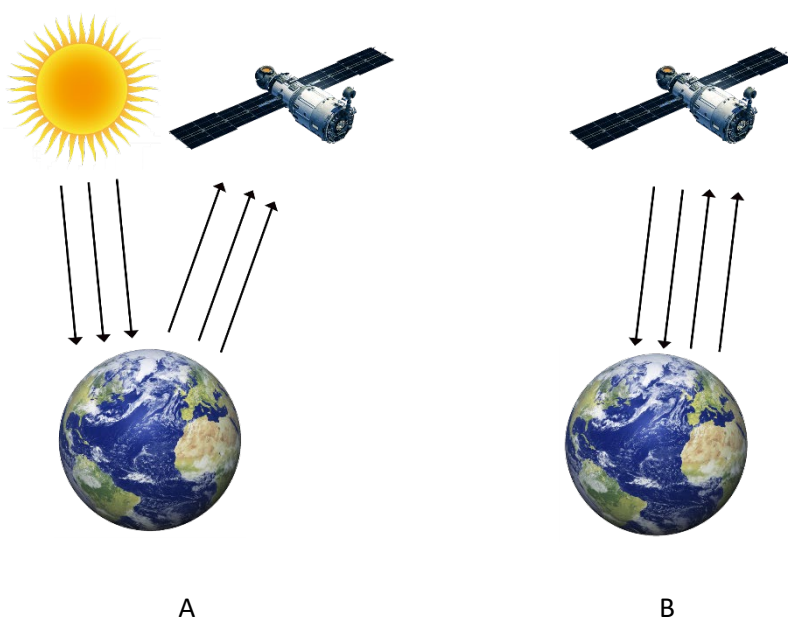
Κεφάλαιο 2 Δορυφορικά συστήματα παρακολούθησης

Στο Κεφάλαιο που ακολουθεί θα αναλυθούν τα δορυφορικά συστήματα παρακολούθησης Radar, με ιδιαίτερη έμφαση στα Radar συνθετικού ανοίγματος κεραίας (Synthetic Aperture Radar, SAR) και στον δορυφόρο Sentinel-1A ώστε να γίνουν κατανοητά η γεωμετρία τους, οι βασικές αρχές λειτουργίας τους και η ορολογία που τα διέπει.

Με το ακρώνυμο RADAR (RADio Detection and Ranging) αναφερόμαστε σε μια διάταξη οργάνων και μηχανισμών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανακάλυψη και τον προσδιορισμό της θέσης σημείων ή αντικειμένων στον αέρα, στη θάλασσα ή στην ξηρά. Υπάρχουν δύο είδη Radar που περιγράφονται στη συνέχεια.

A) Αυτά που καταγράφουν την ανακλώμενη ακτινοβολία που τα ίδια στέλνουν στον «στόχο». Λειτουργούν στο φάσμα των μικροκυμάτων και βασικό πλεονέκτημα τους αποτελεί ότι χρησιμοποιούν την ανακλώμενη ακτινοβολία εξάγοντας πληροφορίες για την απόσταση και τα χαρακτηριστικά της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας (ένταση και πολικότητα) (Σχήμα 2.1B).

B) Αυτά που διαθέτουν παθητικούς δέκτες και καταγράφουν την ακτινοβολία που εκπέμπεται ή ανακλάται από τον «στόχο». Λειτουργούν από το φάσμα των πολύ μικρών μηκών κυμάτων έως το άπω υπέρυθρο (Σχήμα 2.1A).



Σχήμα 2.1: Τα δύο είδη δορυφορικών συστημάτων Radar.

Η εφεύρεση του Radar χρονολογείται από τις αρχές του 20ου αιώνα και τυπικά πιστώνεται είτε στον Γερμανό εφευρέτη και επιχειρηματία Christian Huelsmeyer ο οποίος πρότεινε το λεγόμενο «Telemobiloskop» ως ενεργό σύστημα που βασίζεται σε φούρνο μικροκυμάτων για ανίχνευση μακρινών μεταλλικών αντικειμένων ή στον Βρετανό μηχανικό Robert Watson-Watt, ο οποίος τον Ιούνιο του 1935 παρουσίασε με επιτυχία ένα σύστημα ανίχνευσης που ήταν ικανό να εντοπίζει με ακρίβεια αερομεταφερόμενα αντικείμενα σε απόσταση περίπου 30 χλμ (Woodhouse, 2006). Η τεχνολογία Radar αναπτύχθηκε γρήγορα την εποχή του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου, με κύρια χρήση της την αεράμυνα. Από τα πρώτα χρόνια της δεκαετίας του 1940, τα Radar είχαν γίνει αρκετά μικρά ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν σε αεροπλάνα, επεκτείνοντας την εφαρμογή τους σε μια σειρά νέων πεδίων, συμπεριλαμβανομένης της αυξανόμενης τάσης παρατήρησης της επιφάνειας της Γης.

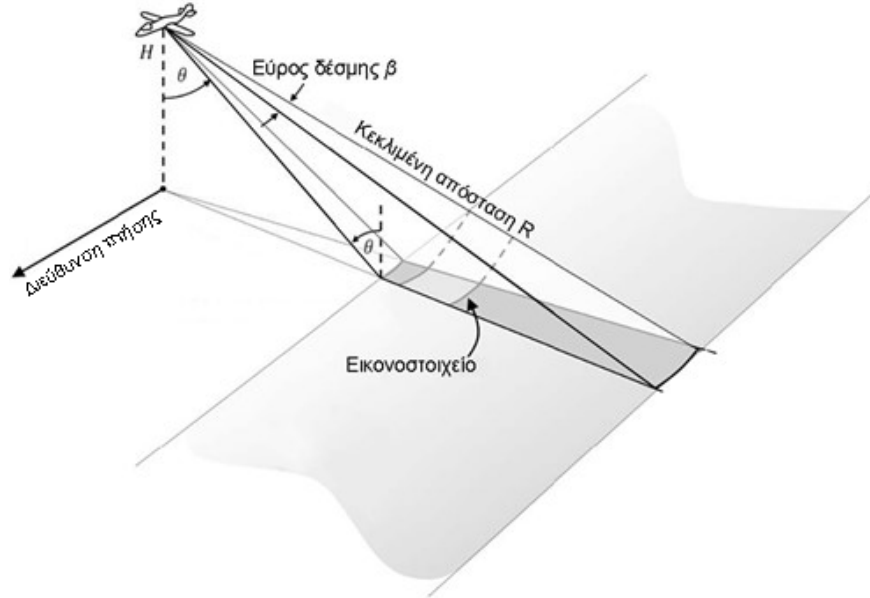
Η εκτεταμένη χρήση των συστημάτων Radar προκύπτει κυρίως από την δυνατότητα τους να παρέχουν παντός καιρού και ολοήμερη απεικόνιση. Αυτές οι δυνατότητες είναι επωφελείς για πολλές εφαρμογές παρακολούθησης, όπως η παρακολούθηση εδαφικών παραμορφώσεων σε περιοχές που επηρεάζονται από έντονη νεφοκάλυψη και βροχόπτωση, ή εκτεταμένες περιόδους με σκοτάδι. Επιπλέον, τα σήματα Radar αλληλεπιδρούν διαφορετικά με την επιφάνεια της ύλης από τα περισσότερα άλλα συστήματα ανίχνευσης, παρέχοντας ενδιαφέρουσες νέες πληροφορίες σχετικά με το παρατηρούμενο περιβάλλον.

2.1 Radar πραγματικού ανοίγματος κεραίας RAR

Τη δεκαετία του 1950, εμφανίστηκαν τα πρώτα αερομεταφερόμενα συστήματα Radar με αξιόπιστη απόδοση απεικόνισης. Συχνά αναφέρονται ως SLAR (Side Looking Airborne Radar) ή RAR (Real Aperture Radar), αποτελούνται από μια συσκευή παραγωγής παλμών Radar, κεραία για την εκπομπή και λήψη των μικροκυμάτων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 η πλατφόρμα κινείται στην τροχιά της σχεδόν παράλληλα με το επίπεδο της επιφάνειας της Γης σε υψόμετρο H . Σε αντίθεση με τα περισσότερα εικονοληπτικά συστήματα, τα οποία έχουν τους αισθητήρες τους να παρατηρούν προς το ναδίρ, στα SLAR (και οποιοδήποτε άλλο Radar) η κεραία είναι στραμμένη μακριά από το ναδίρ υπό γωνία θ . Η γωνία θ ονομάζεται γωνία παρατήρησης (Look Angle) και είναι τέτοια ώστε το αεροσκάφος καθώς κινείται κατά μήκος της τροχιάς του (Along Track) να ακτινοβολεί συνέχεια ένα μέρος του εδάφους. Κατά την διάρκεια της κατά μήκους διαδρομής του (Along Track) το σύστημα Radar εκπέμπει διαδοχικούς μικροκυματικούς παλμούς, με μήκος παλμού t_p , με τον καθένα να σαρώνει ένα κομμάτι στην επιφάνεια της Γης, που συχνά αποκαλείται αποτύπωμα κεραίας (Antenna Footprint). Το μέγεθος S (Εξίσωση 2.1) (Μερτίκας, 1999) της

περιοχής που σαρώνεται κάθε φορά εξαρτάται κυρίως από την Εξίσωση του μήκους κύματος λ των μικροκυματικών παλμών που χρησιμοποιεί το σύστημα, του μήκους L της κεραίας εκπομπής των παλμών καθώς και από την κεκλιμένη απόσταση του αισθητήρα από το έδαφος R :

$$S \approx \frac{\lambda}{L} R [m]. \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.2: Γεωμετρία Radar πραγματικού ανοίγματος κεραίας.

Για την δημιουργία μιας δισδιάστατης εικόνας Radar θα πρέπει να γίνει χρονικός διαχωρισμός άφιξης της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας στον αισθητήρα στην διεύθυνση πτήσης (azimuth direction, along-track) και στην απόσταση (look direction, across-track). Στην απόσταση, η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία επιστρέφει πρώτα από τα κοντινότερα σημεία και στη συνέχεια από τα πιο μακρινά. Έτσι μπορούμε να διακρίνουμε αντικείμενα που βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις, εφόσον η απόστασή τους είναι μεγαλύτερη από το μισό του μήκους κύματος του παλμού που χρησιμοποιεί το σύστημα. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει η διαχωριστική ικανότητα στην απόσταση (look resolution) ρ_R σε ένα SLAR σύστημα, που εξαρτάται από την ταχύτητα του φωτός c , το μήκος του παλμού t_p και ορίζεται ως:

$$\rho_R = \frac{c \cdot t_p}{2} [m]. \quad (2.2)$$

Η μεταβλητή ρ_R στην Εξίσωση (2.2) (Μερτίκας, 1999) συχνά αναφέρεται ως διαχωριστική ικανότητα κεκλιμένης απόστασης (slant range resolution). Περιγράφει την ελάχιστη (κεκλιμένη) απόσταση που θα πρέπει να έχουν δυο αντικείμενα ώστε να μπορεί το σύστημα Radar να τα διακρίνει. Ένα ακόμα πιο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός συστήματος Τηλεπισκόπησης είναι η διαχωριστική ικανότητα ρ_G (ground range resolution). Μεταφέρει την διαχωριστική ικανότητα κεκλιμένης απόστασης στην επιφάνεια της Γης (οριζόντιο επίπεδο) και υπολογίζεται από την μεταβλητή ρ_R μέσω την τοπικής γωνίας πρόσπτωσης θ ως εξής:

$$\rho_G = \frac{\rho_R}{\sin(\theta)} [m]. \quad (2.3)$$

Για τα συστήματα SLAR (Side Looking Airborne Radar), η διαχωριστική ικανότητα (ή χωρική ανάλυση) κατά την κατεύθυνση πτήσης ρ_{Az} εξαρτάται από το αποτύπωμα της κεραίας. Από την άλλη το αποτύπωμα της κεραίας στο έδαφος περιορίζεται από το μήκος της κεραίας σε αυτή την διεύθυνση. Από την Εξίσωση (2.1) η διαχωριστική ικανότητα κατά την κατεύθυνση πτήσης ορίζεται:

$$\rho_{Az} = S_{Az} \approx \frac{\lambda}{L_{Az}} R [m]. \quad (2.4)$$

Από την Εξίσωση (2.4) (Μερτίκας, 1999) βλέπουμε πως η χωρική ανάλυση κατά την κατεύθυνση πτήσης ρ_{Az} μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της απόστασης μεταξύ του μικροκυματικού αισθητήρα και του εδάφους R. Η ιδιότητα αυτή των συστημάτων SLAR (Side Looking Airborne Radar) έχει δύο επιπτώσεις:

1. Καθώς η απόσταση R αλλάζει από την εγγύς περιοχή (near-range) στην άπω περιοχή (far-range), η χωρική ανάλυση στην κατεύθυνση πτήσης ενός συστήματος SLAR δεν είναι σταθερή.
2. Η διαχωριστική ικανότητα ρ_{Az} εξαρτάται από την απόσταση R από το έδαφος, πράγμα που κάνει την εφαρμογή των συστημάτων SLAR μη πρακτική για μεγάλα υψόμετρα ή διαστημικές πλατφόρμες.

Προκειμένου να γίνει πιο ξεκάθαρη η δεύτερη περίπτωση, ας υποθέσουμε ένα σύστημα SLAR που λειτουργεί με μήκος κύματος $\lambda=0,03$ m και μήκος κεραίας $L=3$ m. Αν το αεροπλάνο που το μεταφέρει βρίσκεται σε υψόμετρο $H=3000$ m και παρατηρεί με γωνία $\theta = 30^\circ$, το σύστημα θα επιτύχει διαχωριστική ικανότητα κατά την κατεύθυνση πτήσης $\rho_{Az} = 0,01 * 3000 * 2 = 60$ m η οποία βρίσκεται σε ικανοποιητικά επίπεδα. Ωστόσο αν το ίδιο σύστημα λειτουργήσει τώρα από

μία δορυφορική πλατφόρμα σε ύψος $H=800\text{ km}$, το ρ_{Az} θα μειωθεί σε $\rho_{Az} = 16\text{ km}$, το οποίο είναι υποδεέστερο από την απαραίτητη απόδοση που θα πρέπει να έχει ένα σύστημα που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές παρακολούθησης επιφάνειας της Γης (Μερτίκας, 1999).

Για να διατηρηθεί η διαχωριστική ικανότητα του συστήματος κατά την διεύθυνση πτήσης σε αποδεκτά επίπεδα ακόμα και για διαστημικές εφαρμογές είναι η αύξηση του μήκους της κεραίας που χρησιμοποιεί το σύστημα έως ότου επιτύχουμε την επιθυμητή τιμή ρ_{Az} . Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι καθόλου πρακτικό, καθώς χρησιμοποιώντας το σύστημα του προηγούμενου παραδείγματος θα δούμε ότι προκειμένου να έχουμε μια ικανοποιητική χωρική ανάλυση $\rho_{Az} = 60\text{ m}$ θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κεραία μήκους $L=800\text{ m}$. Μια πιο πρακτική λύση για τη βελτίωση της ανάλυσης κατά την διεύθυνση πτήσης αναπτύχθηκε το 1952 με χρήση της αρχής συνθετικού ανοίγματος κεραίας (SAR) (Μερτίκας, 1999).

Τα συστήματα SLAR, παρόλο τους περιορισμούς που έχουν στη διαχωριστική ικανότητά τους κατά την διεύθυνση πτήσης, παραμένουν δημοφιλή για πολλές εφαρμογές, λόγω κυρίως της απλότητάς τους στο σχεδιασμό και τις λιγοστές απαιτήσεις επεξεργασίας των εικόνων τους.

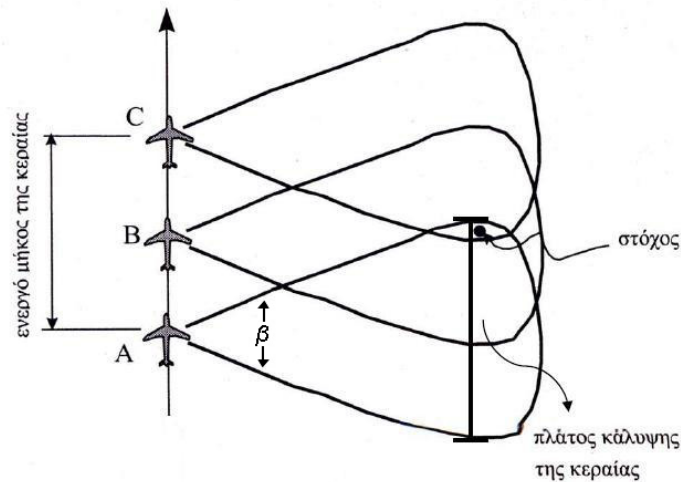
2.2 Radar συνθετικού ανοίγματος κεραίας SAR

Το 1952 ο Carl Wiley, ένας μηχανικός με την αεροπορική εταιρία Goodyear έκανε μια σημαντική ανακάλυψη που έδωσε λύση για την διαχωριστική ικανότητα κατά την διεύθυνση πτήσης που αποτελούσε μειονέκτημα των συστημάτων SLAR.

Η τεχνολογία που αναπτύχθηκε ονομάστηκε Radar συνθετικού ανοίγματος κεραίας (SAR) και βοήθησε να ξεπεραστεί το μειονέκτημα του πεπερασμένου μήκους κεραίας του συστήματος RAR (Real Aperature Radar) ή SLAR (Side Looking Airborne Radar) που περιόριζε την διαχωριστική ικανότητα κατά την διεύθυνση πτήσης ρ_{Az} . Το σύστημα συνθετικού ανοίγματος χρησιμοποιεί μια σχετικά μικρή κεραία που εκπέμπει μετρίου εύρους δέσμη ακτινοβολίας μικροκυμάτων, που παρότι βελτιώνει σημαντικά την χωρική ανάλυση κατά την κατεύθυνση πτήσης του συστήματος, του προσθέτει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και κόστος σε σχέση με ένα RAR.

Το σύστημα SAR έχει την ικανότητα να συνθέτει μια πάρα πολύ μεγάλη κεραία, χρησιμοποιώντας την πρόσω κίνηση του αεροσκάφους και την αρχή του φαινομένου Doppler, με μικρού όμως μήκους κεραία. Οι διαδοχικές θέσεις της κεραίας Radar (θέσεις A, B και C στο Σχήμα 2.3) κατά την διάρκεια της πτήσης, αξιοποιούνται με ηλεκτρονικά μέσα και μπορούν να θεωρηθούν ως θέσεις ενός τμήματος μιας πολύ μεγαλύτερης σε μήκος συνθετικής κεραίας. Το πλασματικό

(συνθετικό) μήκος της κεραίας μπορεί να φτάσει σε συγκλονιστικά μεγέθη. Για παράδειγμα, μια κεραία φυσικού μεγέθους 11 m μπορεί να συνθέσει τεχνητή κεραία μήκους 15 km (Μερτίκας, 1999).



Σχήμα 2.3: Τα Radar συνθετικού ανοίγματος κεραίας και η διαδικασία σύνθεσης της μεγάλης κεραίας με τη μετατόπιση της συχνότητας κατά Doppler. (Μερτίκας, 1999)

Για τον υπολογισμό του μήκους L_{SA} (Μερτίκας, 1999) της συνθετικής κεραίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος:

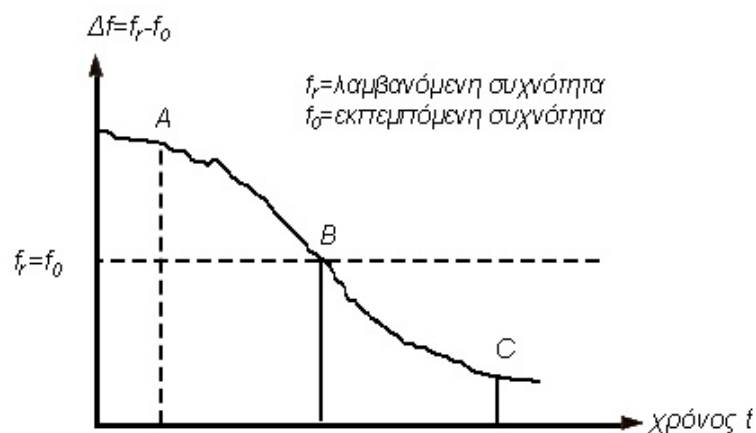
$$L_{SA} = \frac{\lambda}{L} \cdot R_0 \approx \beta \cdot R_0 [m] \quad (2.5)$$

που είναι αντίστοιχος με την Εξίσωση (2.1) για τον υπολογισμό του αποτυπώματος S της (μικρότερης) πραγματικής κεραίας που εγκαθίσταται σε ένα δορυφορικό σύστημα. Η διαχωριστική ικανότητα κατά την κατεύθυνση πτήσης ρ_{AZ} (Μερτίκας, 1999) του SAR παραμένει η ίδια ανεξάρτητα από το ύψος πτήσης h , την κεκλιμένη απόσταση R , το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας του Radar και είναι περίπου ίση με το μισό του πραγματικού μήκους της κεραίας:

$$\rho_{AZ} = \frac{L}{2} [m]. \quad (2.6)$$

Η λειτουργία και η μετέπειτα επεξεργασία των καταγεγραμμένων σημάτων στο SAR είναι αρκετά πολύπλοκη. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί με πρακτικό τρόπο εξαιτίας των συστηματικών αλλαγών που εμφανίζονται στη συχνότητα του σήματος του Radar καθώς ανακλάται από τους στόχους. Τα αντικείμενα - στόχοι παρουσιάζουν διαφορετικές μετατοπίσεις στη συχνότητα κατά Doppler σε σχέση με τις αποστάσεις τους από τη γραμμή πτήσης του αεροσκάφους.

Η μικρή κεραία SAR εκπέμπει δέσμη ακτινοβολίας στα μικροκύματα μεγάλου γωνιακού πλάτους β κατά την εγκάρσια διεύθυνση της πτήσης σε τακτά χρονικά διαστήματα και κατά μήκος της γραμμής πτήσης (Σχήμα 2.3). Λόγω του μεγάλου γωνιακού πλάτους β των παλμών, οι στόχοι εμφανίζονται αρχικά στην άκρη του πεδίου της κεραίας, κατόπιν μετακινούνται εντός του πεδίου και τελικά εξέρχονται. Την ίδια συμπεριφορά βλέπουμε αναπαριστώντας το ιστορικό της μετατόπισης της συχνότητας κατά Doppler ενός παλμού (Σχήμα 2.4). Αρχικά, όταν ο στόχος εισέρχεται στο οπτικό πεδίο της δέσμης μπροστά από το δορυφόρο, τότε το σήμα επιστροφής μετατοπίζεται προς υψηλότερες συχνότητες (θετική συχνότητα κατά Doppler). Στη συνέχεια όταν ο δορυφόρος είναι κάθετος προς την θέση του στόχου, δεν υπάρχει μετατόπιση στη συχνότητα (μηδενική συχνότητα κατά Doppler). Και τέλος, καθώς ο δορυφόρος απομακρύνεται από το στόχο, τα σήματα επιστροφής εμφανίζουν μικρότερες συχνότητες (αρνητική συχνότητα κατά Doppler) (Μερτίκας, 1999).



Σχήμα 2.4: Η διαδικασία μετατόπισης της συχνότητας κατά Doppler. (Μερτίκας, 1999)

Τα δεδομένα που προκύπτουν από την διεργασία του συνθετικού ανοίγματος, όπως περιγράφηκε πιο πάνω, ονομάζονται εικόνες SAR και έχουν πολύ μεγαλύτερη ανάλυση από μια εικόνα SLAR με την ίδια απόσταση από το έδαφος.

2.3 Οι Δορυφόροι SAR

Οι δορυφόροι SAR χρησιμοποιούνται για περισσότερα από 40 και χρόνια. Ο πρώτος δορυφόρος SAR που εκτοξεύτηκε ήταν ο Seasat της NASA στις 28 Ιουνίου του 1978, του οποίου αποστολή ήταν η παρακολούθηση ωκεανογραφικών φαινομένων. Ο Seasat έκανε χρήση της φασματικής

ζώνης L και ο αισθητήρας του ήταν τοποθετημένος υπό σταθερή γωνία ώστε να παρακολουθεί τα επιφανειακά κύματα σε παγκόσμια κλίμακα και την κατάσταση των πάγων στους πόλους. Λόγω βραχυκυκλώματος του ηλεκτρονικού κυκλώματος του δορυφόρου η λειτουργία του σταμάτησε μετά από 106 ημέρες στις 10 Οκτωβρίου 1979, με την αποστολή όμως να κρίνεται ως άκρως επιτυχής, αναδεικνύοντας τις μεγάλες δυνατότητες των δορυφόρων SAR στην παρακολούθηση μεγάλων εκτάσεων τόσο στη θάλασσα όσο και στην ξηρά (Woodhouse, 2006).

Με αρχή τον δορυφόρο ERS-1 το 1991 δημιουργήθηκαν όλο και πιο βελτιωμένοι δορυφόροι από διεθνείς οργανισμούς, εξασφαλίζοντας συλλογικά τη συνεχή παρακολούθηση και διάθεση δεδομένων SAR. Οι διάφοροι δορυφόροι που τέθηκαν σε τροχιά διαφέρουν ως προς τη φασματική ζώνη λειτουργίας τους, το είδος των δεδομένων που παράγουν, τις εφαρμογές τους. Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί υπάρχουν οι δορυφόροι που έχουν μπει σε λειτουργία από το 1978 μαζί με τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους (Jawak, 2015).

Πίνακας 1: Αποστολές δορυφόρων συνθετικού ανοίγματος κεραίας (SAR). (Jawak, 2015)

Δορυφόρος	Οργανισμός	Έτος Εκτόξευσης	Φασματική ζώνη	Λειτουργία Απεικόνισης	Χωρική Ανάλυση (m)	Περίοδος (ημέρες)
SeaSAT	NASA/JPL	1978	L	Stripmap	25	3
ERS-1	ESA	1991	C	Stripmap	18	3,35,168
J-ERS-1	JAXA	1992	L	Stripmap	18	44
SIR-C	NASA	1992	L	ScanSAR	18	μη σταθερό
ERS-2	ESA	1995	C	Stripmap	30	35
RADARSAT-1	Canada Space Agency	1995	C	Stripmap	10	24
SRTM	NASA,NGA,DLR,ASI	2000	X, C	Stripmap	12	35
ENVISAT/ASAR	ESA	2002	C	Stripmap, ScanSAR	30	35
ALOS/PALSAR	Japan Aerospace Exploration Agency	2006	L	Stripmap, ScanSAR	10	46
RADARSAT-II	Canada Space Agency	2007	C	Stripmap, ScanSAR	1	24
TerraSAR-X/ TANDEM-X	German Aerospace Center	2007	X	Stripmap, ScanSAR, Spotlight	1	11
COSMO-SkyMed	Italian Space Agency	2007	X	Stripmap, ScanSAR, Spotlight	11	16
RISAT-1	Indian Space Agency	2012	C	Stripmap, ScanSAR, Spotlight	25	25
SENTINEL-1A/B	ESA	2014	C	ScanSAR(TOP-SAR)	25	12
ALOS-2	JAXA	2014	L	Stripmap, ScanSAR, Spotlight	1-100	14
Biomass NISAR	ESA NASA, ISRO	2023 2024	P S, L	Stripmap SweepSAR	200 3-10	3 12

Οι δορυφόροι SAR όπως αναφέρθηκαν και προηγουμένως εκπέμπουν ενέργεια που ανήκει στη φασματική ζώνη των μικροκυμάτων. Γενικά, οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται είναι από 1 έως και 90 GHz και το φάσμα αυτό υποδιαιρείται σε μικρότερες φασματικές ζώνες όπως φαίνεται στον Πίνακα 2. Τα ονόματα των επιμέρους φασματικών ζωνών δόθηκαν κατά την περίοδο του Δεύτερου Παγκοσμίου Πολέμου και ο μόνος σκοπός τους ήταν να αποκρύψουν την συχνότητα λειτουργίας από τον εχθρό.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί πως δεν χρησιμοποιούνται όλες οι φασματικές ζώνες του Πίνακα 2 από τα εικονοληπτικά Radar. Υπάρχουν κάποια πειραματικά συστήματα SAR που χρησιμοποιούν τις φασματικές ζώνες Ka και Ku. Όλα τα πολιτικά συστήματα χρησιμοποιούν κατά αποκλειστικότητα φασματικές ζώνες χαμηλότερης συχνότητας μεταξύ X και P.

Πίνακας 2: Φασματικές ζώνες μικροκυματικής ακτινοβολίας. (www.nasa.gov)

Φασματική Ζώνη	Συχνότητα (GHz)	Μήκος Κύματος (cm)
Ka	27 – 40	1,1 – 0,8
K	18 – 27	1,7 – 1,1
Ku	12 – 18	2,4 – 1,7
X	8 – 12	3,8 – 2,4
C	4 – 8	7,5 – 3,8
S	2 – 4	15 – 7,5
L	1 – 2	30 – 15
P	0.3 – 1	100 – 30

Το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας είναι άμεσα συνδεδεμένο με την ικανότητα διείσδυσης σε περιοχές με έντονη βλάστηση αλλά και στο έδαφος, όπως συμβαίνει με την ακτινοβολία που ανήκει στις ζώνες L και P. Πιο συγκεκριμένα δορυφόροι που κάνουν χρήση της ζώνης X χρησιμοποιούνται κυρίως για την παρακολούθηση κατασκευών του αστικού ιστού. Λόγω της μεγάλης ανάλυσης που προσφέρουν τα Radar αυτά χρησιμοποιούνται στην παρακολούθηση, τον εντοπισμό και μερικές φορές για την παρακολούθηση βιομηχανικών εγκαταστάσεων, ενώ μεγάλο μειονέκτημά τους αποτελεί η χαμηλή διείσδυση τους σε περιοχές με έντονη βλάστηση.

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1 οι περισσότεροι δορυφόροι που έχουν τεθεί σε λειτουργία τα τελευταία 30 χρόνια χρησιμοποιούν την φασματική ζώνη C. Η μέτρια έως υψηλή ανάλυση της παρέχει αυξημένη δυνατότητα να διαπερνά την έντονη βλάστηση. Η ζώνη C αποτελεί μια καλή μέση λύση μεταξύ της ζώνης X και της ζώνης L με μεγαλύτερο μήκος κύματος. Σε σχέση με τους δορυφόρους SAR που χρησιμοποιούν την ζώνη X, εκείνοι που χρησιμοποιούν τη C έχουν μεγαλύτερη εδαφική κάλυψη για εφαρμογές εθνικής και παγκόσμιας κλίμακας.

Στο παρελθόν σπάνια χρησιμοποιήθηκαν δορυφόροι που να εκμεταλλεύονται την ζώνη S, αλλά η συχνότητα αυτή θα έχει αυξημένη χρήση στο άμεσο μέλλον. Το Σεπτέμβριο του 2018 εκτοξεύτηκε ο δορυφόρος NonaSAR-S και παρόλο που στην αρχή η πρόσβαση σε δεδομένα του μπορεί να είναι περιορισμένη, στη συνέχεια της αποστολής του θα παρέχει εικόνες SAR μέσης ανάλυσης με σκοπό την διερεύνηση της απόδοσης τους σε εφαρμογές παρακολούθησης κινδύνων, καλλιεργειών, δασών και χρήσης Γης. Επίσης ακόμα περισσότερα δεδομένα της ζώνης S, θα έχουμε με την εκτόξευση του δορυφόρου SAR των NASA και ISRO, NISAR το 2024 (<https://nisar.jpl.nasa.gov/>). Ο συγκεκριμένος δορυφόρος θα χρησιμοποιεί κύματα της ζώνης L εκτός από την P και παρόλο που η εδαφική κάλυψη με ζώνη S δεν θα είναι παγκόσμια, όλα τα δεδομένα της αποστολής θα είναι δωρεάν και ευρέως διαθέσιμα όπως της αποστολής Sentinel-1 της ESA (Woodhouse, 2006).

Ενώ τα περισσότερα δορυφορικά συστήματα του παρελθόντος λειτουργούσαν στη ζώνη C, τα μελλοντικά θα χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο την ζώνη L. Παρόλο που η ζώνη αυτή λόγω του μεγάλου μήκους κύματος που έχει δεν παρέχει την δυνατότητα για υψηλής ανάλυσης εικόνες, αναπληρώνει την αδυναμία της αυτή με την εξαιρετική της ικανότητα να διεισδύει σε περιοχές με έντονη βλάστηση. Για το λόγο αυτό η ζώνη L είναι ιδιαίτερως χρήσιμη στη χαρτογράφηση πλημμυρών σε δασικές περιοχές αλλά στη συμβολομετρία SAR, καθώς έχει μεγαλύτερη συνάφεια (Coherence) και καλύτερες ικανότητες παρακολούθησης παραμορφώσεων (Woodhouse, 2006).

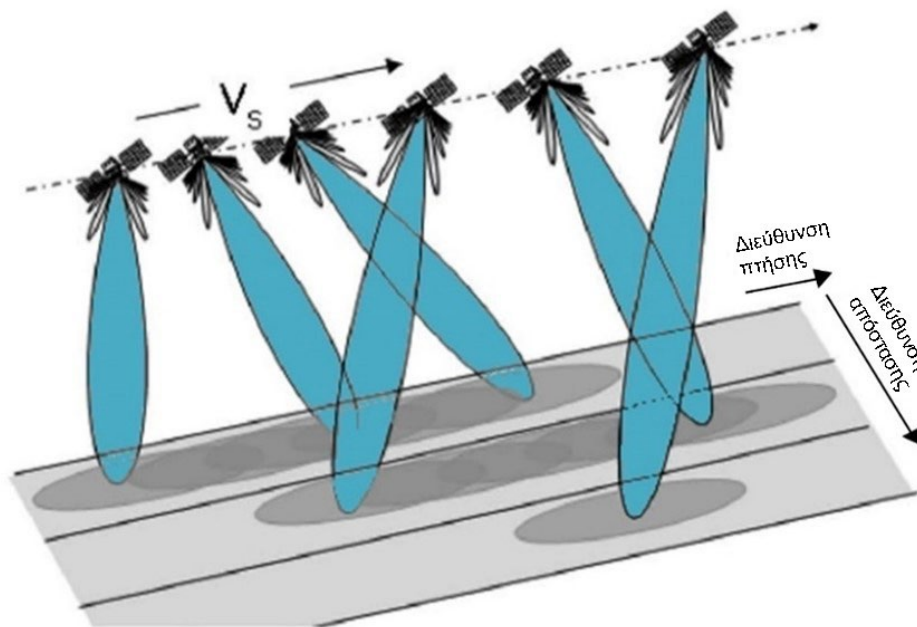
Τέλος, οι δορυφόροι που πρόκειται να κάνουν χρήση της ζώνης P είναι ακόμα σε στάδιο ανάπτυξης. Μεγάλο πρόβλημα των διαστημικών εφαρμογών στη συχνότητα αυτή είναι η επίδραση της ιονόσφαιρας και τεχνικές διόρθωσης των επιδράσεων αυτών αναπτύχθηκαν μόλις την προηγούμενη δεκαετία. Η πρώτη διαστημική αποστολή SAR στη ζώνη P θα είναι η Biomass της ESA με πιθανή ημερομηνία εκτόξευσης το 2024 (<https://earth.esa.int/eogateway/missions/biomass/description>). Η αποστολή του δορυφόρου θα είναι η χαρτογράφηση της κατάστασης των δασών της Γης.

2.4 Οι δορυφόροι Sentinel-1

Οι δορυφόροι Sentinel 1 ανήκουν στην αποστολή Copernicus που αναπτύχθηκε από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA) και χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (EU). Πρόκειται για δύο δορυφόρους τον Sentinel-1A, Sentinel-1B οι οποίοι υποστηρίζουν τέσσερις τρόπους λήψης εικόνων SAR (Stripmap, Interferometric Wide Swath, Extra Wide Swath and Wave). Ο Sentinel-1A τέθηκε σε τροχιά τον Απρίλιο του 2014 ενώ ο Sentinel-1B εκτοξεύτηκε δύο

χρόνια αργότερα. Οι δορυφόροι έχουν ηλιοσύγχρονη, σχεδόν πολική τροχιά ύψους 693 km. Επίσης διαθέτουν ίδια περίοδο περιστροφής 12 ημερών γύρω από τη Γη ενώ συνδυάζοντας εικόνες από τους δύο μπορούμε να επιτύχουμε υψηλότερη συχνότητα περιστροφής ίση με 6 ημέρες. Η αποστολή διαδέχθηκε τις επιτυχημένες αποστολές ERS και ENVISAT και παρέχει συνεχή, δωρεάν, ανοικτά δεδομένα με υψηλή χωρική ανάλυση και μεγάλη εδαφική κάλυψη λειτουργώντας στη ζώνη των μικροκυμάτων C (https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1).

Η λειτουργία Interferometric Wide Swath (IW) είναι ο κύριος τρόπος λήψης εικόνων πάνω από χερσαίες περιοχές. Το μέγεθος της περιοχής σάρωσης είναι 250 km² με χωρική ανάλυση 5 × 20 m. Με την IW σάρωση, η περιοχή χωρίζεται σε τρία επιμέρους μικρότερα τμήματα, χρησιμοποιώντας την τεχνική TOPSAR. Η τεχνική TOPSAR, επιτρέπει τόσο τη μετακίνηση του αισθητήρα κατά τη διεύθυνση της απόστασης όσο και τη μετακίνηση του, εμπρός και πίσω κατά τη διεύθυνση πτήσης. Πλεονέκτημα της εν λόγω τεχνικής αποτελεί το γεγονός ότι η ποιότητα της εικόνας είναι ίδια σε όλη της την έκταση (Σχήμα 2.5) (https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1).



Σχήμα 2.5: Η τεχνική σάρωσης TOPSAR. (ESA)

Τα προϊόντα της αποστολής Sentinel 1 έχουν στόχο να εξυπηρετήσουν εφαρμογές και υπηρεσίες θαλάσσιου περιβάλλοντος, υπηρεσίες εδάφους και υπηρεσίες έκτακτων αναγκών του προγράμματος Copernicus. Τα δεδομένα του δορυφόρου συμβάλλουν στην παρακολούθηση του θαλάσσιου πάγου, των παγόβουνων της Αρκτικής θάλασσας, τον εντοπισμό πετρελαιοκηλίδων πλοίων ή παράνομων ενεργειών όπως την παράνομη αλιεία. Στις υπηρεσίες εδάφους, ανήκουν η παρακολούθηση και χαρτογράφηση των δασών, των υδάτων, των μετατοπίσεων και καθιζήσεων του εδάφους. Τέλος, στις υπηρεσίες έκτακτων αναγκών τα δεδομένα του δορυφόρου βοηθούν στην πρόληψη ή αντιμετώπιση των έκτακτων φυσικών φαινομένων όπως των πλημμυρών, των σεισμών, των κατολισθήσεων και των ηφαιστειακών εκρήξεων (Potin et al., 2012, ESA 2020). Τα δεδομένα των δορυφόρων Radar δηλαδή οι εικόνες SAR αναλύονται στην ενότητα που ακολουθεί.

Κεφάλαιο 3 Η εικόνα SAR

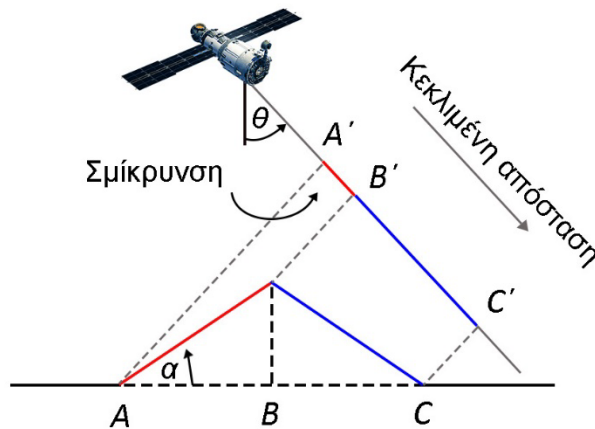
Στην συγκεκριμένη ενότητα περιγράφονται οι ιδιότητες των εικόνων SAR και οι παράγοντες οι οποίοι τις επηρεάζουν για να γίνουν κατανοητές οι διαφορετικές διεργασίες που είναι αναγκαίες για τη ψηφιακή επεξεργασία και ανάλυσή τους.

Η εικόνα SAR είναι ένας δισδιάστατος πίνακας με γραμμές και στήλες τα οποία αποκαλούνται εικονοστοιχεία (pixels). Κάθε εικονοστοιχείο αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη έκταση Γης και φέρει πληροφορίες για την πλάτος (amplitude) και την φάση (phase) της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας από τους στόχους στο έδαφος. Οι τιμές που παίρνουν η ένταση και η φάση εξαρτώνται από την πόλωση (polarization) της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, την διηλεκτρική σταθερά και την τραχύτητα του στόχου καθώς επίσης τις γεωμετρικές και ραδιομετρικές ιδιότητες που περιγράφονται παρακάτω.

3.1 Γεωμετρικές ιδιότητες

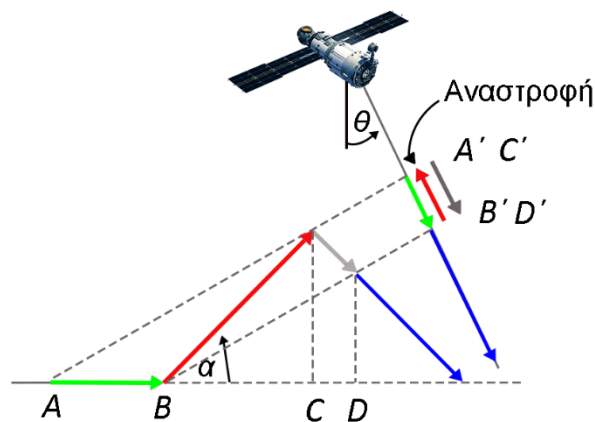
Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 στα συστήματα παρατήρησης Radar, οι αισθητήρες δεν είναι τοποθετημένοι στο ναδίρ της τροχιάς τους αλλά στο πλάι και συνήθως από την δεξιά πλευρά, με αποτέλεσμα οι επιφανειακές κλίσεις και η έντονη τοπογραφία του εδάφους να οδηγούν σε γεωμετρικές παραμορφώσεις στις εικόνες SAR. Οι πιο συχνές μορφές είναι η σμίκρυνση (Foreshortening), η αναστροφή (Layover) και η σκίαση (Shadowing).

- Σμίκρυνση (Foreshortening) προκύπτει όταν η εκπεμπόμενη ακτινοβολία φτάνει πρώτα στη βάση ενός βουνού το οποίο έχει κλίση παράλληλη με αυτή του Radar και έπειτα φτάνει στην κορυφή του, τότε το βουνό θα απεικονίζεται «συμπιεσμένο» σαν να «γέρνει» προς τον δορυφόρο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 η κλίση μεταξύ των σημείων A και B θα φαίνεται μικρότερη στην εικόνα SAR και ίση με A'B'. Η ένταση του φαινομένου εξαρτάται από τη γωνία παρατήρησης θ του δορυφόρου, την κλίση α της πλαγιάς του βουνού και εμφανίζεται όσο ισχύει $\theta > \alpha$. Το φαινόμενο μειώνεται καθώς αυξάνεται η γωνία παρατήρησης, με την πιο ακραία μορφή της να εμφανίζεται όταν η ακτινοβολία προσπίπτει κάθετα, όπου δε θα εμφανιστεί καθόλου η πλευρά του βουνού. Τμήματα Γης που έχουν υποστεί σμίκρυνση εμφανίζονται φωτεινότερα σε σχέση με τα γειτονικά τους, γιατί η ανακλώμενη ενέργεια μεγάλης επιφάνειας «συμπιέζεται» σε μικρότερη (Woodhouse, 2006).



Σχήμα 3.1: Η γεωμετρική παραμόρφωση σμίκρυνση.

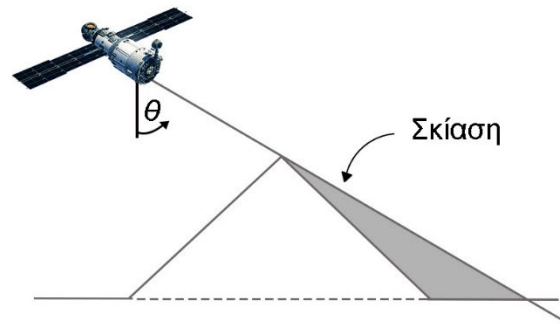
- Σε περιοχές που η γωνία παρατήρησης θ είναι μικρότερη ή ίση της κλίσης α έχουμε την εμφάνιση της αναστροφής (Layover). Στην περίπτωση αυτή η ακτινοβολία φτάνει πρώτα στην κορυφή του βουνού και έπειτα στη βάση του, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται «επικάλυψη» της πλαγιάς του βουνού και των πιο μακρινών προς τον δορυφόρο περιοχών (Σχήμα 3.2). Η ένταση του φαινομένου μειώνεται με την αύξηση της γωνίας παρατήρησης θ (Woodhouse, 2006).



Σχήμα 3.2: Η γεωμετρική παραμόρφωση αναστροφή.

Όπως είδαμε μέχρι τώρα προκειμένου να μειώσουμε την εμφάνιση της σμίκρυνσης (Foreshortening) και της αναστροφής (Layover) θα πρέπει να αυξήσουμε τη γωνία παρατήρησης θ , όμως η αύξηση αυτή οδηγεί στην εμφάνιση της σκίασης (Shadowing). Σκίαση έχουμε όταν η

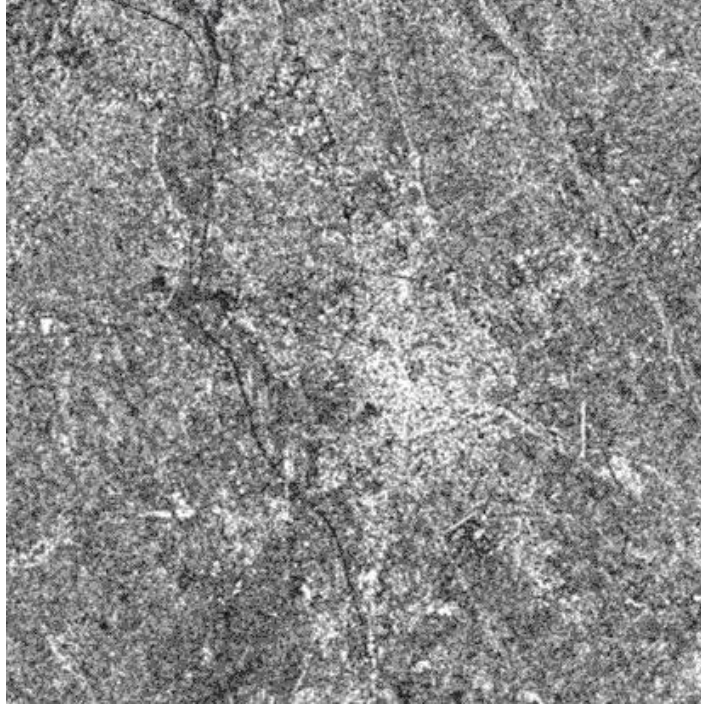
εκπεμπόμενη ακτινοβολία δεν μπορεί να φτάσει σε όλη την επιφάνεια που θέλουμε να απεικονίσουμε λόγω κάποιου εμποδίου (Σχήμα 3.3) (Woodhouse, 2006).



Σχήμα 3.3: Το φαινόμενο της σκίασης

3.2 Ραδιομετρικές ιδιότητες

Εκτός από τις γεωμετρικές παραμορφώσεις οι εικόνες SAR χαρακτηρίζονται ακόμα από μια κοκκώδη υφή που θυμίζει τον θόρυβο «αλάτι και πιπέρι». Το μοτίβο αυτό (Σχήμα 3.4) συχνά αναφέρεται και ως στίγματα (Speckles) (Μερτίκας, 1999). Το φαινόμενο των σιγμάτων είναι εγγενές σε όλα τα σύμφωνα (Coherent) εικονοληπτικά συστήματα στενής ζώνης. Είναι αποτέλεσμα των συμβολών που λαμβάνουν χώρα ανάμεσα στα πολλά οπισθοσκεδαζόμενα σήματα και αντιστοιχούν σε ένα εικονοστοιχείο (pixel). Για παράδειγμα σε μία εικόνα SAR μέσης ανάλυσης η απόκριση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας από ένα εικονοστοιχείο είναι το άθροισμα όλων των επιμέρους σκεδάσεων που συνέβησαν από την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με έκταση Γης η οποία αντιστοιχεί σε αυτό το εικονοστοιχείο (pixel).

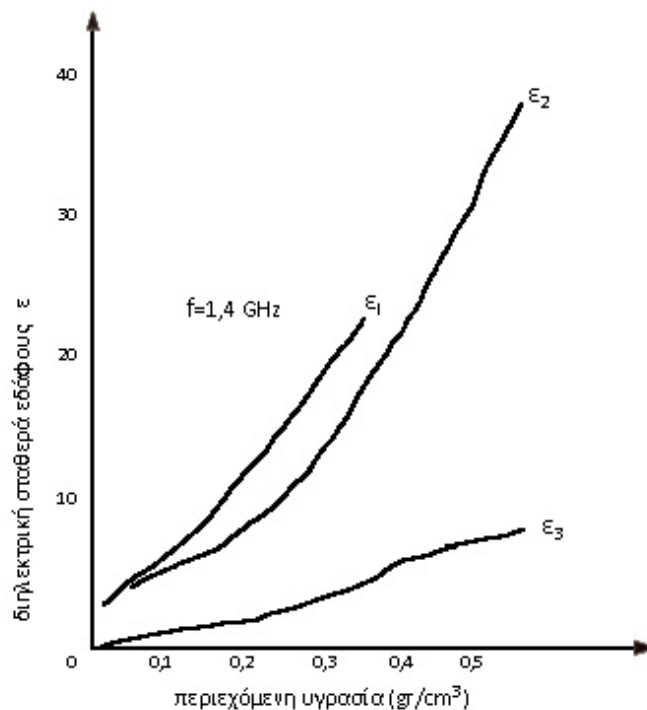


Σχήμα 3.4: Τα στίγματα (speckles) σε εικόνα SAR. (Πηγή: <https://earth.esa.int>)

Η ύπαρξη των στίγμάτων εικόνας επηρεάζει την ποιότητα των εικόνων SAR. Μερικοί τρόποι για να μειώσουμε το φαινόμενο είναι η λήψη περισσότερων εικόνων από ελαφρώς διαφορετικές γωνίες παρατήρησης και το φιλτράρισμα της εικόνας που όμως μπορεί να μειώσει αισθητά την ανάλυση της.

3.3 Διηλεκτρική σταθερά

Η διηλεκτρική σταθερά ϵ_r ενός στόχου επηρεάζει την αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την επιφάνειά του. Η διηλεκτρική σταθερά των πετρωμάτων και των εδαφών αυξάνει σχεδόν γραμμικά με την αυξανόμενη περιεκτικότητα σε υγρασία (Σχήμα 3.5). Μια αύξηση στη διηλεκτρική σταθερά αυξάνει την ανακλαστικότητα της επιφάνειας. Επομένως, τα υγρά εδάφη εμφανίζονται φωτεινότερα σε εικόνες Radar σε σχέση με τα ξηρά εδάφη (Μερτίκας, 1999).



Σχήμα 3.5: Ο ρόλος της περιεχόμενης υγρασίας στη διηλεκτρική σταθερά (Μερτίκας, 1999).

Αντίθετα, σώματα που έχουν μικρή διηλεκτρική σταθερά ανακλούν λιγότερη ενέργεια σε σχέση με εκείνα που έχουν μεγαλύτερη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα όσο πιο μικρή η διηλεκτρική σταθερά τόσο καλύτερη η διείσδυση των μικροκυμάτων σε κάποιο βάθος από την επιφάνεια της Γης. Θα πρέπει να τονιστεί πως το βάθος διείσδυσης εξαρτάται ακόμα από την συχνότητα της ακτινοβολίας όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.3.

3.4 Τραχύτητα

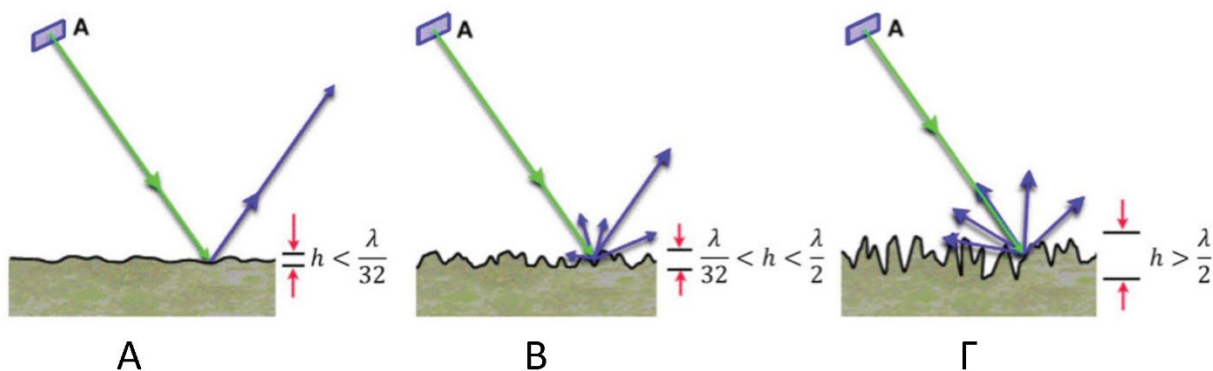
Οι περισσότερες επιφάνειες με χαμηλή ή καθόλου βλάστηση (εκτός από ξηρό χιόνι, ξηρά αμμώδη εδάφη) δεν επιτρέπουν την διείσδυση της μικροκυματικής ακτινοβολίας με αποτέλεσμα το ποσοστό της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας να εξαρτάται κυρίως από την επιφανειακή σκέδαση η οποία είναι ανάλογη της τραχύτητας του εδάφους.

Στα εικονοληπτικά συστήματα, η τραχύτητα του εδάφους εξαρτάται από το μήκος κύματος λ και την γωνία πρόσπτωσης θ_i της μικροκυματικής ακτινοβολίας που χρησιμοποιεί το Radar. Έχουν

γίνει διάφορες προσπάθειες ώστε να προσδιοριστούν κριτήρια για τον καθορισμό της τραχύτητας μιας επιφάνειας και σύμφωνα με το κριτήριο Fraunhofer, μια επιφάνεια θεωρείται τραχιά αν οι υψομετρικές αποκλίσεις της υπερβαίνουν την τιμή h_{rough} , όπως φαίνεται στην Εξίσωση (3.1) (Woodhouse, 2006):

$$h_{rough} > \lambda / (32 \cdot \cos \theta_i) \quad (3.1)$$

Την εξάρτηση της τραχύτητας από το μήκος κύματος μπορούμε να τη δούμε καλύτερα στο Σχήμα 3.6, η οποία δείχνει επιφάνειες με όλο και αυξανόμενη τραχύτητα από τα αριστερά προς τα δεξιά και την μετάβαση από την λεία επιφάνεια (Σχήμα 3.6Α) στην ενδιάμεσης τραχύτητας επιφάνεια (Σχήμα 3.6Β) και τραχιά επιφάνεια (Σχήμα 3.6Γ) σύμφωνα με το κριτήριο Fraunhofer (Εξίσωση 3.1) (Woodhouse, 2006). Ακόμα μπορούμε να δούμε, πως η ένταση της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας (μπλε βέλος με φορά προς τον δέκτη) μειώνεται καθώς η τραχύτητα αυξάνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η επιφάνεια να φαίνεται όλο και πιο σκοτεινή καθώς αυξάνεται το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.



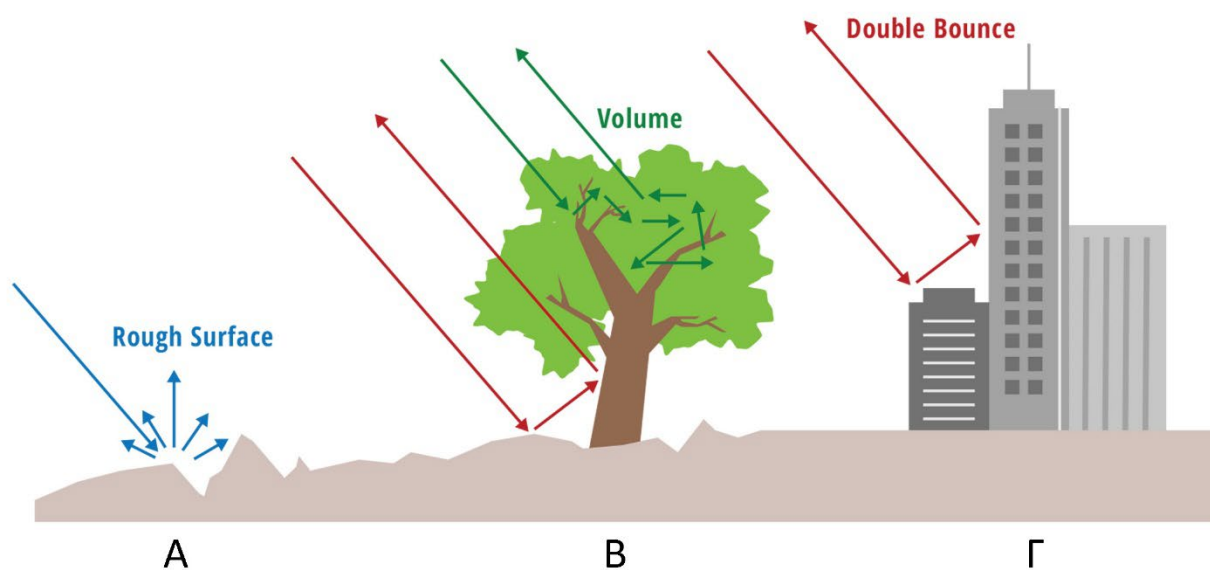
Σχήμα 3.6: Εξάρτηση εδαφικής τραχύτητας με μήκος κύματος παλμού: Α) Λεία επιφάνεια Β) Μέση τραχύτητα Γ) Υψηλή τραχύτητα

3.5 Πόλωση

Καθώς τα δορυφορικά συστήματα SAR διαθέτουν την δική τους πηγή μικροκυματικής ακτινοβολίας, είναι από τα λίγα όργανα Τηλεπισκόπησης που επιτρέπουν τον πλήρη έλεγχο και

αξιοποίηση της πόλωσης των σημάτων τόσο κατά την εκπομπή όσο και κατά τη λήψη τους. Η πόλωση περιγράφει τον προσανατολισμό του επιπέδου ταλάντωσης του διαδιδόμενου σήματος. Σε γραμμικά πολωμένα συστήματα, ο προσανατολισμός του επιπέδου ταλάντωσης είναι σταθερός κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Η πλειοψηφία των σημερινών δορυφόρων SAR είναι γραμμικά πολωμένοι και οι διαδιδόμενες κυματομορφές είναι οριζόντια και/ή κατακόρυφα πολωμένες. Πολλοί από τους παλιότερους δορυφόρους είχαν μονής πόλωσης αισθητήρες και υποστήριζαν μόνο γραμμική πόλωση. Οι αισθητήρες αυτοί λειτουργούσαν στην HH (οριζόντια πόλωση στην εκπομπή και οριζόντια πόλωση στη λήψη) ή VV πόλωση (κατακόρυφη πόλωση στην εκπομπή και κατακόρυφη πόλωση στη λήψη), ενώ οι μονής πόλωσης αισθητήρες που εξέπεμπαν μία γραμμική πόλωση και λάμβαναν την άλλη δηλαδή είχαν την HV πόλωση (οριζόντια πόλωση στην εκπομπή και κατακόρυφη στη λήψη) ήταν σπάνιοι.



Σχήμα 3.7: Κατηγορίες σκεδαστών: Α) Επιφανειακοί σκεδαστές Β) Χωρικοί σκεδαστές Γ) Σκεδαστές διπλή ανάκλασης.

Οι πιο πρόσφατοι δορυφόροι παρέχουν δυνατότητες είτε διπλής πόλωσης είτε τετραπλής πόλωσης. Στην τελευταία περίπτωση ο αισθητήρας εναλλάσσει τις εκπεμπόμενες κυματομορφές μεταξύ V και H πόλωσης ενώ λαμβάνει ταυτόχρονα και τις δύο, παρέχοντας εικόνες με πολώσεις HV, HH, VH, VV. Η γνώση της πόλωσης στην οποία μια εικόνα SAR αποκτήθηκε είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς η εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε διαφορετικές πολώσεις αλληλεπιδρά διαφορετικά με τα αντικείμενα, τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν την ένταση

της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Στην πολωσιμετρία SAR υπάρχουν τρία κύρια είδη σκεδαστών, οι επιφάνειας (rough surface scatterers), διπλής ανάκλασης (double bounce scatterers) και χωρικοί σκεδαστές (volume scatterers) (Σχήμα 3.7). Η κατηγορία επιφανειακών σκεδαστών (Σχήμα 3.7Α) περιλαμβάνει χώμα χωρίς βλάστηση, δρόμους και άλλες πλακόστρωτες επιφάνειες. Στους σκεδαστές διπλής ανάκλασης ανήκουν τα κτήρια, κορμοί δένδρων, κολώνες και άλλες κατακόρυφες δομές (Σχήμα 3.7Β). Τέλος, στην κατηγορία των χωρικών σκεδαστών ανήκουν τα δέντρα, θάμνοι και η χλωρίδα γενικότερα (Σχήμα 3.7Γ).

Έχει αποδειχτεί πως οι τύποι σκεδαστών που αναφέρθηκαν πριν δεν συνεισφέρουν το ίδιο σε όλα τα πολωσιμετρικά κανάλια. Αντίθετα, φαίνεται πως κάθε πολωσιμετρικό κανάλι «προτιμά» συγκεκριμένους τύπους σκεδαστών έτσι ώστε η ένταση της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας να ακολουθεί τον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Σχετική ένταση σκέδασης ανά πόλωση.

Είδος Σκεδαστή	Πόλωση
Τραχιές επιφάνειες	VV > HH > HV ή VH
Διπλής ανάκλασης	HH > VV > HV ή VH
Χωρικός	Κυρίως HV ή VH

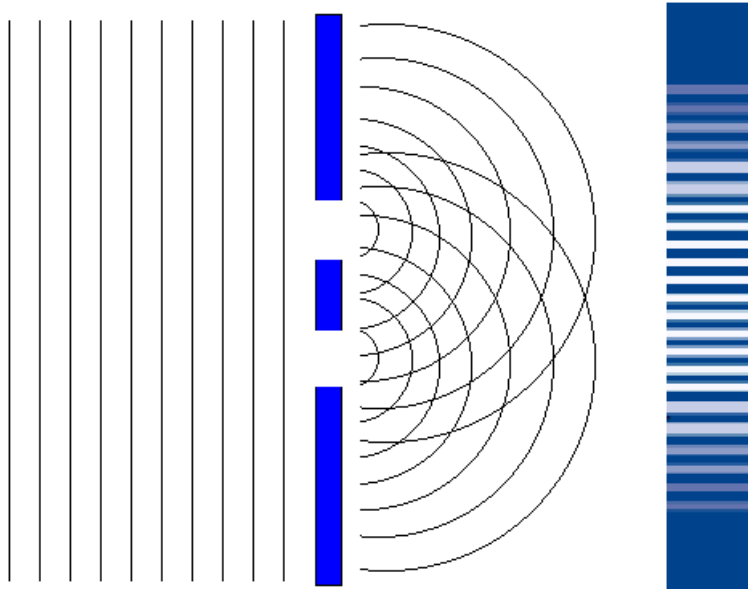
Μετά την εξοικείωση με την έννοια των εικόνων Radar και των παραμέτρων που τις επηρεάζουν το επόμενο βήμα είναι η κατανόηση της τεχνικής της συμβολομετρίας που τις αξιοποιεί για την δημιουργία συμβολογραφημάτων.

Κεφάλαιο 4 Συμβολομετρία

Στο παρόν Κεφάλαιο αναλύεται η μέθοδος της συμβολομετρίας (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR), και ο τρόπος που δημιουργούνται τα συμβολογραφήματα. Τα συμβολογραφήματα παράγονται από τις εικόνες SAR και απεικονίζουν την συμβολομετρική φάση, η οποία αποτελείται από διάφορες συνιστώσες, από τις οποίες μερικές θεωρούνται θόρυβος που θα πρέπει να εντοπιστεί, υπολογιστεί και να αφαιρεθεί όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Η συμβολομετρία είναι μια τεχνική η οποία αναπτύχθηκε μετά την εκτόξευση της πρώτης αποστολής της ESA, με τους δορυφόρους ERS-1 και ERS-2, οι οποίοι παρείχαν εικόνες SAR από δύο ξεχωριστούς αισθητήρες σε τακτά χρονικά διαστήματα. Οι κύριες χρήσεις αυτής της τεχνικής Τηλεπισκόπησης είναι η δημιουργία ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων (Digital Elevation Model, DEM) και εφαρμογές παρακολούθησης της Γης, όπως παραμορφώσεις της επιφάνειας της Γης, υδρολογία, μελέτη τήξης των παγετώνων, δασολογία και τεκτονικών διεργασιών. Ο τρόπος που λειτουργεί η συμβολομετρία κατανοείται καλύτερα με το πείραμα του Thomas Young που συχνά αναφέρεται ως συμβολόμετρο διπλών σχισμών (Double-slit interferometer). (Woodhouse, 2006)

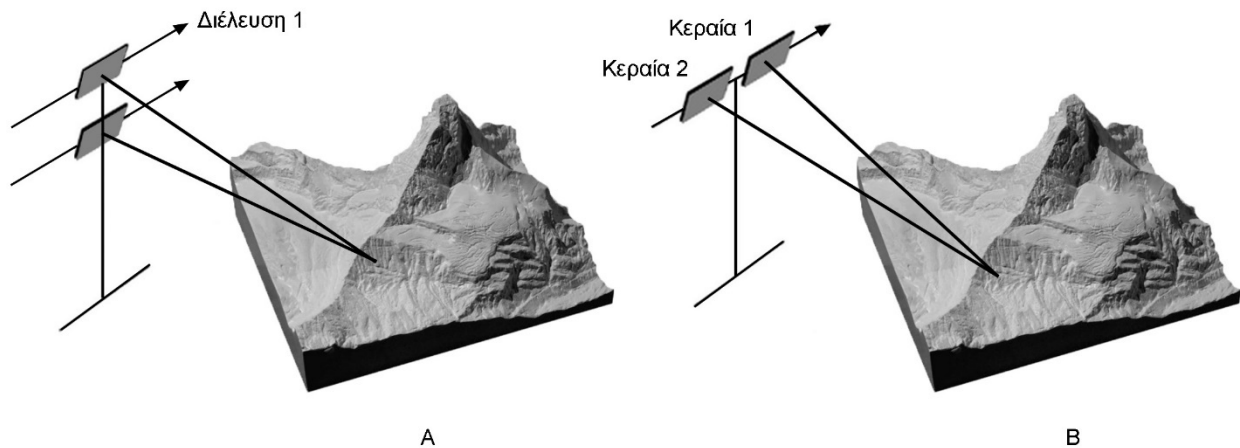
Στον πείραμα του Young υπάρχει μια σημειακή μονοχρωματική πηγή ακτινοβολίας η οποία φωτίζει δύο σχισμές που απέχουν μεταξύ τους και βρίσκονται σε μία κατακόρυφη αδιαφανή επιφάνεια (Σχήμα 4.1). Οι σχισμές είναι πολύ μικρές με αποτέλεσμα να λειτουργούν σαν γραμμικές πηγές. Γενικά, συμβολή συμβαίνει όταν δύο κύματα αλληλεπιδρούν και έχουν διαφορά φάσης. Η παρατηρούμενη ένταση είναι η χρονική μέση τιμή του αθροίσματος των κυματικών πεδίων. Στην επιφάνεια παρατήρησης που προσπίπτουν τα συμβαλλόμενα κύματα εμφανίζεται το μοτίβο των διακυμάνσεων της έντασής τους. Το μοτίβο των διακυμάνσεων έχει φωτεινές και σκοτεινές ζώνες οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις δημιουργικές και καταστρεπτικές συμβολές αντίστοιχα. Η απόσταση που έχουν οι ζώνες εξαρτώνται από την απόσταση που έχουν οι οπές.



Σχήμα 4.1: Πείραμα Young. (Πηγή: <http://abyss.uoregon.edu>)

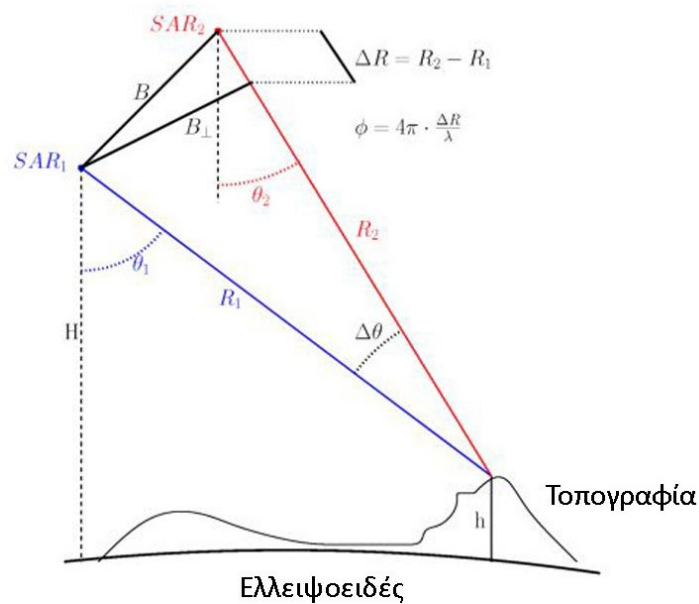
Η συμβολομετρία Radar ή αλλιώς η συμβολομετρία συνθετικού ανοίγματος Radar αποτελεί μια επέκταση του συμβολομετρικού πειράματος του Young, καθώς οι δορυφόροι SAR έχουν σύμφωνες (coherent) πηγές όπως το laser στο πείραμά του. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες συμβολομετρικών Radar που διακρίνονται από τη γεωμετρική διαμόρφωση του διανύσματος βάσης B, το οποίο είναι η απόσταση που χωρίζει τις κεραίες των δορυφόρων, οπότε έχουμε:

- Εγκάρσια συμβολομετρία (Across-track interferometry) η οποία χρησιμοποιείται για μετρήσεις τοπογραφίας, Φ , εδαφικών παραμορφώσεων και οι κεραίες όπως αναφέρει και το όνομά της χωρίζονται στη κατά πλάτος διεύθυνση (Σχήμα 4.2A). Ακόμα αυτή η διαμόρφωση περιλαμβάνει τη συμβολομετρία μονής διέλευσης (single-pass interferometry) χρησιμοποιώντας δύο κεραίες και την επαναληπτική συμβολομετρία (repeat-pass interferometry) με χρήση μίας κεραίας.
- Διαμήκη συμβολομετρία (Along-track interferometry) η οποία χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μέτρησης ακτινικής ταχύτητας σωμάτων. Η διάταξη της αποτελείται από δύο κεραίες οι οποίες χωρίζονται στην κατά μήκος διεύθυνση (Σχήμα 4.2B).

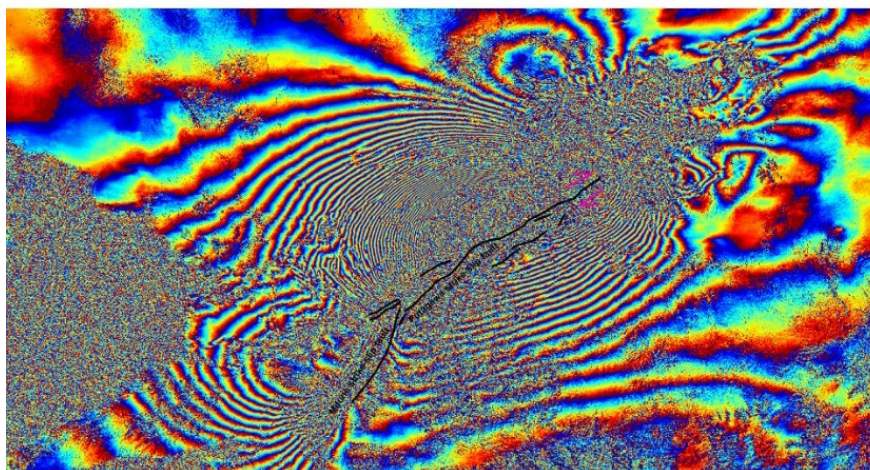


Σχήμα 4.2: Κατηγορίες συμβολομετρίας: Α) Εγκάρσια συμβολομετρία Β) Διαμήκη συμβολομετρία.

Μία τυπική γεωμετρία της τεχνικής InSAR φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Βασική παράμετρος της γεωμετρίας αυτής είναι το B_{\perp} που ονομάζεται κατακόρυφο διάνυσμα βάσης (perpendicular baseline), το οποίο είναι η κατακόρυφη συνιστώσα του διανύσματος βάσης B στο διάνυσμα παρατήρησης (LOS) του δεύτερου δορυφόρου. Τα θ_1, θ_2 είναι οι γωνίες πρόσπτωσης των δορυφόρων s_1, s_2 προς τους στόχους στο έδαφος αντίστοιχα. Ακόμα το υψόμετρο από τις δορυφορικές πλατφόρμες μέχρι το έδαφος είναι H και το υψόμετρο από το ελλειψοειδές αναφοράς μέχρι το έδαφος είναι h . Επίσης θα πρέπει να τονιστεί πως το διάνυσμα βάσης B είναι σταθερό.



Σχήμα 4.3: Τυπική γεωμετρία συμβολομετρίας Radar.



Σχήμα 4.4: Συμβολογράφημα από σεισμό στην Ιαπωνία. (Πηγή: <https://forum.step.esa.int>).

Πιο συγκεκριμένα η τεχνική της συμβολομετρίας εκμεταλλεύεται την διαφορά φάσης μεταξύ δύο ή περισσότερων εικόνων SAR, που ελήφθησαν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ή υπό διαφορετική γεωμετρία και παράγει μια καινούργια η οποία ονομάζεται συμβολογράφημα (interferogram) (Σχήμα 4.4). Το συμβολογράφημα παράγεται από τον πολλαπλασιασμό των δύο εικόνων, εικονοστοιχείο προς εικονοστοιχείο, με την πρώτη εικόνα να είναι ο συζυγής μιγαδικός της δεύτερης. Θεωρώντας δύο εικόνες SAR, η πρώτη $u_1(R, x)$ και η δεύτερη $u_2(R, x)$, το συμβολογράφημα που προκύπτει είναι:

$$u(R, x) = u_1(R, x) \cdot u_2^*(R, x) = |u_1(R, x)| |u_2(R, x)| e^{j\varphi(R, x)} \quad (4.1)$$

όπου R είναι η απόσταση (LOS), x το αζιμούθιο (azimuth) και με $*$ συμβολίζεται ο συζυγής μιγαδικός (Woodhouse, 2006). Με $\Delta\varphi(R, x) = \varphi_1(R, x) - \varphi_2(R, x)$ είναι η συμβολομετρική φάση και είναι ανάλογη του ΔR :

$$\Delta\varphi(R, x) = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta R \quad (4.2)$$

Το ΔR και κατ' επέκταση η συμβολομετρική φάση $\Delta\varphi(R, x)$ (Woodhouse, 2006) στην ιδανική περίπτωση θα εμπεριείχε μόνο το σήμα ενδιαφέροντος, που με βάση τις χρήσεις της μεθόδου που αναφέρθηκαν προηγουμένως συνήθως είναι η παραμόρφωση της επιφάνειας της Γης. Αυτό όμως δεν γίνεται ποτέ καθώς το σήμα που επιστρέφει και καταγράφουν τελικά οι δορυφόροι επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες. Οι κύριες συνιστώσες που αποτελούν την συμβολομετρική φάση είναι:

$$\Delta\varphi = \varphi_{topo} + \varphi_{disp} + \varphi_{orbit} + \varphi_{tropo} + \varphi_{ion} + \varphi_{flat} + \varphi_{noise} + \varphi_{SET} \quad (4.3)$$

όπου φ_{topo} είναι η συνεισφορά της τοπογραφίας στη συμβολομετρική φάση, φ_{disp} αντιστοιχεί στην παραμόρφωση της Γης, φ_{orbit} η συνεισφορά από τα σφάλματα στις τροχιές των δορυφόρων, φ_{tropo} η συνεισφορά από την τροπόσφαιρα, φ_{ion} η συνεισφορά της ιονόσφαιρας, φ_{flat} ο όρος της επίπεδης Γης, φ_{SET} οι παραμορφώσεις από τις παλίρροιες της στερεάς Γης και τέλος ο όρος του θορύβου φ_{noise} .

Στη συνέχεια θα γίνει περιγραφή των κύριων συνιστωσών της συμβολομετρικής φάσης, δηλαδή από τί προκαλούνται καθώς και ο τύπος ή ο τρόπος υπολογισμού της συνεισφοράς τους.

- $\varphi_{topo} = 4\pi/\lambda \cdot B_{\perp} \cdot \Delta\theta = 4\pi/\lambda \cdot \frac{B_{\perp}}{R \sin\theta} \Delta z$, (Yunjun et al., 2019) η οποία προκύπτει επειδή δεν έχουμε ακριβή γνώση της τοπογραφίας. Από τον τύπο βλέπουμε πως η έντασή της εξαρτάται από ο Δz που είναι η διαφορά υψομέτρου, θ τη γωνία παρατήρησης, λ το μήκος κύματος, B_{\perp} την κατακόρυφη βάση και R που είναι η κεκλιμένη απόσταση μεταξύ δορυφόρου και εδάφους. Η αφαίρεση της τοπογραφικής φάσης μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας κατάλληλο για την περιοχή μελέτης DEM.
- $\varphi_{disp} = 4\pi/\lambda \cdot d_{LOS}$, (Yunjun et al., 2019) είναι η συνεισφορά στη συμβολομετρική φάση λόγω κάποιας παραμόρφωσης του εδάφους στη διεύθυνση παρατήρησης LOS του δορυφόρου.
- φ_{orbit} , προκύπτει από σφάλματα στις τροχιές των δορυφόρων. Στις παλιότερες αποστολές, όπως ERS το μέγεθος της συνιστώσας ήταν σημαντικό καθώς οι τροχιές τους είχαν αποκλίσεις που έφταναν μέχρι μερικά χιλιόμετρα, αλλά με τις καινούργιες όπως οι δορυφόροι Sentinel είναι ελάχιστο καθώς έχουν πιο καλά ορισμένες τροχιές με απόκλιση $\pm 100 \text{ m}$.
- φ_{tropo} , αναφέρεται στην καθυστέρηση που προκαλεί στη μικροκυματική ακτινοβολία η τροπόσφαιρα. Χωρίζεται σε δύο επιμέρους συνιστώσες την ξηρή και την υγρή. Η αφαίρεση της μπορεί να γίνει είτε με χρήση εμπειρικών μοντέλων που χρησιμοποιούν την συσχέτιση (Corellation) της τροποσφαιρικής καθυστέρησης με την τοπογραφία ή με χρήση γενικευμένων ατμοσφαιρικών μοντέλων όπως το ERA-5, MERRA, NARR κ.α.
- φ_{ion} είναι η επίδραση της ιονόσφαιρας. Κυρίως αφορά τους δορυφόρους που χρησιμοποιούν μικροκυματική ακτινοβολία χαμηλής συχνότητας όπως η ζώνη L. Για την αφαίρεσή της χρησιμοποιούνται συνήθως χάρτες κατανομής ηλεκτρονίων (Total Electron

Content, TEC) οι οποίοι αποτελούν μια αναπαράσταση των ελεύθερων ηλεκτρονίων στην Ιονόσφαιρα.

- φ_{SET} είναι οι παραμορφώσεις που προκαλούνται στην επιφάνεια της Γης από τις ελκτικές δυνάμεις που της ασκούν ο Ήλιος και η Σελήνη. Χρησιμοποιώντας κατάλληλες εξισώσεις λαμβάνεται υπ' όψιν η θέση του Ήλιου και της Σελήνης. Έτσι μπορεί να υπολογιστεί η μετακίνηση της επιφάνειας της Γης στη γεωμετρία του δορυφόρου που σε αντίθετη περίπτωση θα μπορούσε να θεωρηθεί παραμόρφωση.
- $\varphi_{flat} = \frac{-4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{R \tan \theta}$ (Yunjun et al., 2019) είναι το κομμάτι της φάσης που οφείλεται στην καμπυλότητα της Γης. Λόγω της μερικώς διαφορετικής γεωμετρίας (τροχιακής και οπτικής) των εικόνων SAR από τις οποίες παράγεται ένα συμβολογράφημα εμφανίζεται μια αυξητική τάση στη φάση του. Σε ένα συμβολογράφημα που έχει αφαιρεθεί η συνεισφορά αυτή οι συμβολομετρικοί κροσσοί ακολουθούν την τοπογραφία σαν ισοϋψείς.
- φ_{noise} αφορά πολύ μικρό μέρος της συμβολομετρικής φάσης που δεν γνωρίζουμε τι ακριβώς το προκαλεί ώστε να το αφαιρέσουμε, όπως με τις υπόλοιπες συνιστώσες. Γι' αυτό, το αποκαλούμε θόρυβο.

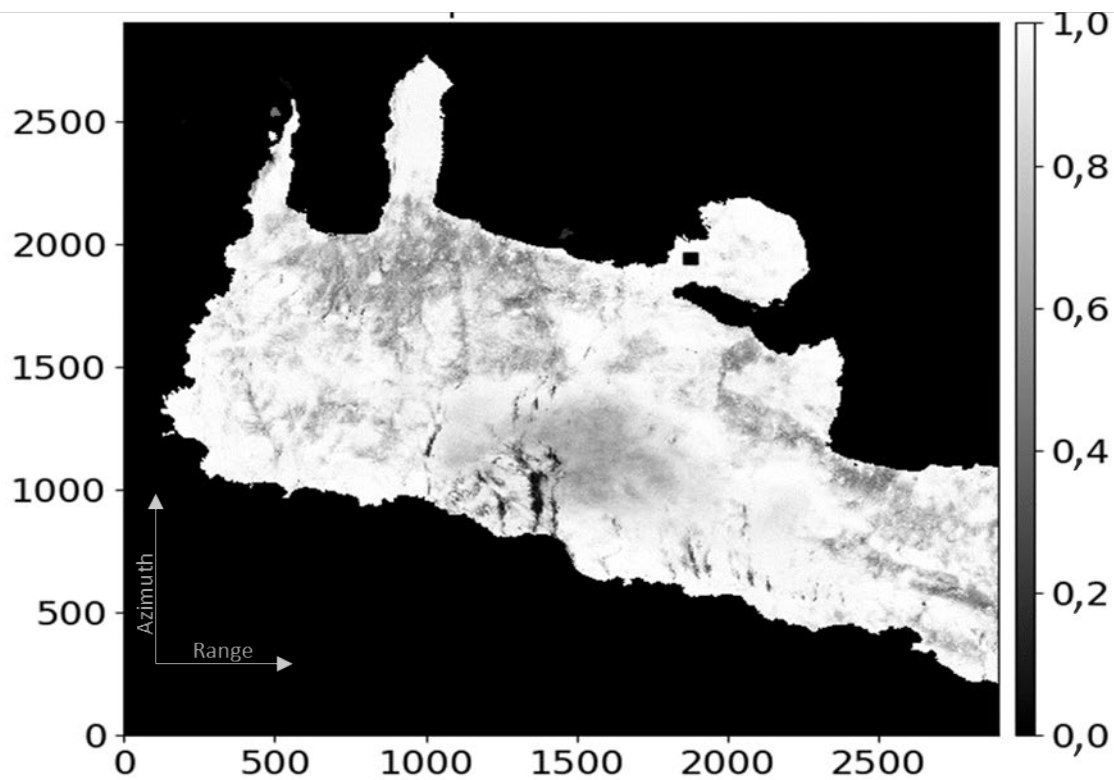
4.1 Συνάφεια (Coherence)

Υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια της συμβολομετρικής φάσης. Οι παράγοντες αυτοί ονομάζονται πηγές αποσυσχέτισης (Decorrelation) σήματος. Συνάφεια είναι μια παράμετρος που δείχνει την αναλογία σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio) σε ένα συμβολογράφημα και υπολογίζεται ως εξής:

$$\gamma = \frac{E[u_1 u_2^*]}{\sqrt{E[|u_1|^2]} \sqrt{E[|u_2|^2]}} \quad (4.4)$$

όπου $|u_2|$, $|u_1|$ τα πλάτη των δύο εικόνων SAR και E ο χωρικός μέσος όρος.

Η συνάφεια παίρνει τιμές από μηδέν, για περιοχές που παρουσιάζουν ολοκληρωτική αποσυσχέτιση (Decorrelation), έως και 1 σε περιοχές χωρίς θόρυβο στη συμβολομετρική φάση (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: Χωρική συνάφεια στο νομό Χανίων στη γεωμετρία του δορυφόρου.

Αλλαγές στα σκεδαστικά χαρακτηριστικά ενός στόχου στην πάροδο του χρόνου έχουν έντονη επίδραση στη συνάφεια ενός συμβολογραφήματος. Υδάτινα σώματα όπως θάλασσα, λίμνες, ποτάμια χαρακτηρίζονται από πλήρη αποσυσχέτιση (Decorrelation) ή συσχέτιση (Corellation) ίση με μηδέν λόγω της συνεχούς τους κίνησης και εμφανίζονται με χρώμα μαύρο (Σχήμα 4.5). Ακόμα η εποχή και το είδος των δένδρων (φυλλοβόλα ή κωνοφόρα) μπορούν να μειώσουν τη συνάφεια αν οι εικόνες εμφανίζουν διαφορετικά είδη δένδρων σε διαφορετικές εποχές.

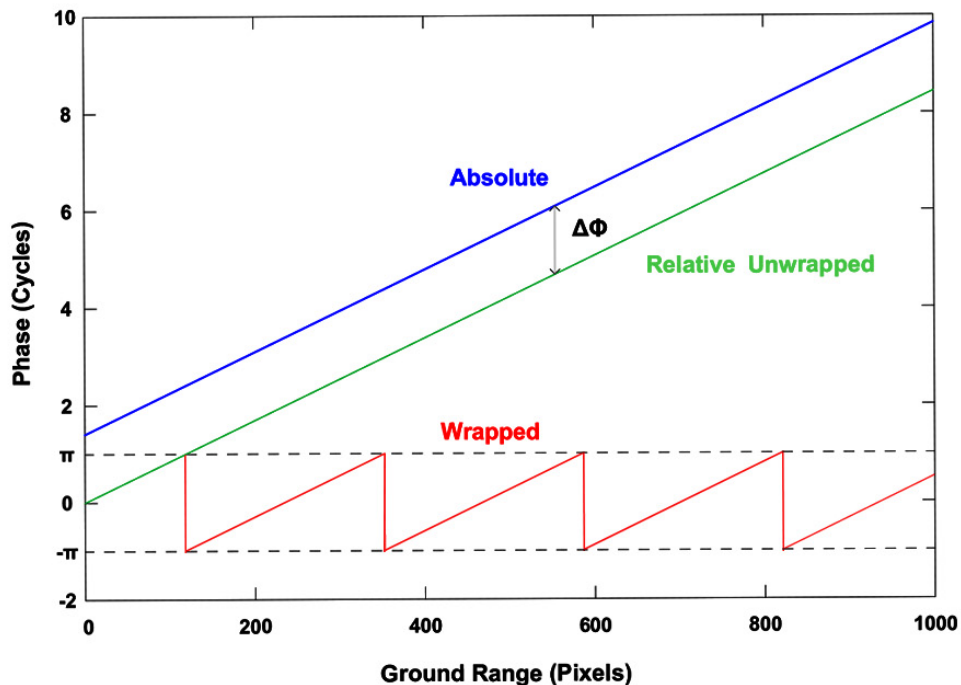
4.2 Προσδιορισμός απόλυτης συμβολομετρικής Φάσης (Phase Unwrapping)

Ο προσδιορισμός της απόλυτης συμβολομετρική φάσης ενός συμβολογραφήματος από το οποίο έχει αφαιρεθεί ο όρος της επίπεδης Γης αποτελεί ένα δύσκολο και απαιτητικό στάδιο. Η συμβολομετρική φάση σε ένα συμβολογράφημα παίρνει τιμές από $-π$ έως $π$, δηλαδή εμπεριέχει

πληροφορίες μόνο για το μη ακέραιο μέρος της φάσης. Οπότε αρχικά υπολογίζεται η φάση για κάθε εικονοστοιχείο και στη συνέχεια προστίθεται το κατάλληλο ακέραιο πολλαπλάσιο κύκλων n στη φάση κάθε εικονοστοιχείου προκειμένου να αποκατασταθεί η απόλυτη τιμή της φάσης (Σχήμα 4.6):

$$\Phi = \varphi + 2n$$

Η διαδικασία προϋποθέτει γνώση της απόλυτης φάσης ενός εικονοστοιχείου αναφοράς από το οποίο θα ξεκινήσει ο προσδιορισμός της απόλυτης συμβολομετρικής φάσης και η ενσωμάτωση της φάσης όλων των εικονοστοιχείων κατά μήκος μιας διεύθυνσης στο συμβολογράφημα. Συνήθως η απόλυτη φάση Φ του σημείου αναφοράς δεν είναι γνωστή, οπότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κάποιο γνωστό σημείο ελέγχου στο έδαφος ώστε να ξεκινήσει από αυτό ο προσδιορισμός της απόλυτης συμβολομετρικής φάσης .



Σχήμα 4.6: Προσδιορισμός απόλυτης συμβολομετρικής φάσης.

Ωστόσο θα πρέπει να αναφερθεί ότι έχουν αναπτυχθεί αρκετοί αλγόριθμοι οι οποίοι επιδιώκουν τον υπολογισμό της βέλτιστης λύσης στην απροσδιοριστία της συμβολομετρικής φάσης. Οι περισσότεροι από τους αλγόριθμους υποθέτουν πως η διαφορά φάσης μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων είναι, μικρή, της τάξης του ενός π και ότι η κλίση του διανύσματος της προσδιοριζόμενης συμβολομετρικής φάσης έχει ομαλή κλίση κατά μήκος της εικόνας.

Ένας τέτοιος αλγόριθμος ιδιαίτερα διαδεδομένος που χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα είναι ο Goldstein (Goldstein et al., 1988). Η λειτουργία του βασίζεται στην υπόθεση που προαναφέρθηκε, ότι δηλαδή οι διαφορές φάσης μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων είναι μικρές και ομαλές. Έτσι αναζητά εικονοστοιχεία που έχουν διαφορά φάσης μεγαλύτερη από ένα όριο, συνήθως $\pm \pi$ και χρησιμοποιεί τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων ώστε να προσδιορίσει την τιμή της φάσης που ελαχιστοποιεί τις διαφορές μεταξύ των γειτονικών εικονοστοιχείων. Ο αλγόριθμος είναι ιδιαίτερα αποδοτικός υπολογιστικά οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλα δεδομένα. Ωστόσο σε περιοχές με μεγάλες εναλλαγές φάσης ή σύνθετες εδαφικές παραμορφώσεις (σε ρήγματα ή περιοχές με έντονη βλάστηση) μπορεί να δημιουργήσει λάθος αποτελέσματα.

Έχοντας κατανοήσει την έννοια της συμβολομετρίας, τον τρόπο δημιουργίας των συμβολογραφημάτων και τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν την συμβολομετρική φάση, στη συνέχεια θα αναπτυχθούν, η τεχνική της διαφορικής συμβολομετρίας και οι διαχρονικές τεχνικές διαφορικής συμβολομετρίας.

Κεφάλαιο 5 Διαφορική συμβολομετρία εικόνων Radar

Η διαφορική συμβολομετρία Radar (Differential InSAR, DInSAR) είναι μια τεχνική που αναπτύχθηκε στα τέλη του 1980 με αρχές 1990 λίγο μετά την εδραίωση της τεχνολογίας SAR για την παρακολούθηση εδαφικών παραμορφώσεων. Βασίζεται στη συμβολομετρία εικόνων Radar (InSAR) και χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση της επαναληπτικής εγκάρσια συμβολομετρίας (repeat-pass across-track interferometry).

Για την εφαρμογή της τεχνικής χρησιμοποιούνται δύο ή περισσότερες εικόνες SAR που αφορούν την ίδια περιοχή στην επιφάνεια της Γης και έχουν ληφθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Η μία ονομάζεται κύρια (Main) και η άλλη δευτερεύουσα (Secondary). Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας αυτές τις εικόνες, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4 για την συμβολομετρία (InSAR), δημιουργούνται συμβολογραφήματα. Η διαφορά φάσης $\Delta\phi$ που απεικονίζεται στα συμβολογραφήματα είναι της μορφής της Εξίσωσης (4.3) με ζητούμενο την απομόνωση του συντελεστή ϕ_{disp} , που αφορά την εδαφική παραμόρφωση στην περιοχή ενδιαφέροντος κατά την χρονική περίοδο που έγινε η λήψη των εικόνων.

Η τεχνική αυτή έχει δύο τρόπους για τον υπολογισμό της συνεισφοράς που έχει το τοπογραφικό ανάγλυφο στη συμβολομετρική φάση. Ο πρώτος είναι η διαφορική συμβολομετρία τριπλής διέλευσης (3-pass InSAR) και χρησιμοποιεί τρεις εικόνες SAR. Η γνώση της τοπογραφίας μέσω ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου δεν είναι απαραίτητη. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή δημιουργούνται δύο συμβολογραφήματα ένα για τον προσδιορισμό της τοπογραφίας και ένα για το προσδιορισμό παραμορφώσεων. Στη συνέχεια αφαιρούμε από το συμβολογράφημα των παραμορφώσεων εκείνο που αντιστοιχεί στην τοπογραφία και έτσι έχουμε ένα νέο συμβολογράφημα χωρίς την επίδραση του αναγλύφου. Η μέθοδος έχει το πλεονέκτημα της εύκολης εφαρμογής αλλά ελλοχεύει μεγάλος κίνδυνος διάδοσης σφαλμάτων στη φάση καθώς δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η διαφορετική γεωμετρία λήψης των εικόνων. Η δεύτερη αναφέρεται ως διαφορική συμβολομετρία διπλής διέλευσης (2-pass InSAR), που χρησιμοποιεί δύο εικόνες SAR για τη δημιουργία ενός συμβολομετρικού ζεύγους και ένα DEM. Η χρήση DEM σήμερα είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη καθώς έχουν παγκόσμια κάλυψη ακόμα και για μεγάλα γεωγραφικά πλάτη με την οριζοντιογραφική και κατακόρυφη ανάλυσή τους να έχει φτάσει ακρίβεια μερικών μέτρων. Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι τα σφάλματα που μπορεί να έχουν τα DEM τα οποία μεταφέρονται στη συμβολομετρική φάση.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου DInSAR είναι πολλά με κύρια την υψηλή εδαφική κάλυψη, υψηλή ακρίβεια, χαμηλό κόστος εφαρμογής. Από την άλλη το βασικό της μειονέκτημα σε σχέση με τις

διαχρονικές τεχνικές συμβολομετρίας είναι πως η χρήση εικόνων με ημερομηνία λήψης μεγαλύτερου διαστήματος του ενός μήνα μπορεί να δημιουργήσει συμβολογράφημα αποτελούμενο μόνο από θόρυβο. Ένα τέτοιο συμβολογράφημα δεν μπορεί να δώσει καμία ουσιαστική πληροφορία για την περιοχή ενδιαφέροντος.

5.1 Διαχρονικές τεχνικές διαφορικής συμβολομετρίας

Οι διαχρονικές τεχνικές διαφορικής συμβολομετρίας (Multi-temporal Interferometry DInSAR) αποτελούν επέκταση της συμβολομετρίας SAR και της διαφορικής συμβολομετρίας SAR που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια. Με την ανάπτυξή τους ελαχιστοποιήθηκαν τα προβλήματα της διαχρονικής και γεωμετρικής αποσυσχέτισης (Decorrelation) καθώς και των ατμοσφαιρικών επιδράσεων. Οι τεχνικές βασίζονται στη χρήση πολλών εικόνων SAR μιας περιοχής ενδιαφέροντος και την ανάλυση τους στη διάσταση του χρόνου σαν χρονοσειρές. Διαχρονικά έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές και όλες εμπίπτουν σε δύο κύριες κατηγορίες. Η πρώτη, ονομάζεται συμβολομετρία μόνιμων σκεδαστών (Persistent Scatterer Interferometry, PSI) (Ferretti et al., 2001). Στοχεύει στην εύρεση σύμφωνων σκεδαστών στην πάροδο του χρόνου. Η τεχνική αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό με υψηλή ακρίβεια εδαφικών παραμορφώσεων μικρής κλίμακας ακόμα και σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από χαμηλή συνάφεια. Η δεύτερη, είναι γνωστή ως συμβολομετρία κατανεμημένων σκεδαστών (Distributed scatterer Interferometry, DSI), διότι χρησιμοποιεί κατανεμημένους σκεδαστές σε αντίθεση με την πρώτη των μεμονωμένων σταθερών σκεδαστών. Η δεύτερη τεχνική αντιστρέφει τα δημιουργηθέντα συμβολογραφήματα για τον υπολογισμό χρονοσειρών φάσης.

Οι τεχνικές αυτές είναι διαθέσιμες σε διάφορα λογισμικά πακέτα, είτε ανοικτού κώδικα είτε κατόπιν αγοράς κατάλληλης άδειας τα οποία διατηρούνται από ερευνητικά κέντρα, διαστημικές υπηρεσίες και ιδιωτικές εταιρείες (Πίνακας 4). Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής έγινε χρήση του λογισμικού πακέτου MintPy (Yunjun et al., 2019). Πρόκειται για ένα ελεύθερο λογισμικό, ανοικτού κώδικα το οποίο χρησιμοποιεί την τεχνική των κατανεμημένων σκεδαστών.

Πίνακας 4: Λογισμικά πακέτα συμβολομετρίας εικόνων Radar.

Λογισμικό	Δημιουργός	Άδεια	Τεχνική InSAR
ROI_PAC	NASA JPL	Open Source	DInSAR
GAMMA	French Space Agency	Commercial	DInSAR, PSI
StaMPS	Stanford University	Open Source	PSI, DSI
SARscape	SARMAP	Commercial	DInSAR, PSI
MintPy	Miami University	Open Source	DSI
GMTSAR	San Diego State University	Open Source	DInSAR, DSI
Snap	ESA	Open Source	DInsar

5.2 Συμβολομετρία μόνιμων σκεδαστών (PSI)

Η μέθοδος PSI βασίζεται στην εύρεση φυσικών ή τεχνητών σκεδαστών που παραμένουν σύμφωνοι για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Οι διαστάσεις αυτών των μόνιμων σκεδαστών είναι μικρότερες από την ανάλυση του εικονοστοιχείου και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην έχουν αποσυσχέτιση (Decorrelation) λόγω μεγάλου διανύσματος βάσης και να μπορούν να δημιουργηθούν συμβολογραφήματα των οποίων το διάνυσμα βάσης είναι μεγαλύτερο από το κρίσιμο. Η εύρεση μόνιμων σκεδαστών είναι ιδιαίτερα δύσκολη σε περιοχές με βλάστηση και καλυμμένες με χιόνι. Αντίθετα σε περιοχές βραχώδεις χωρίς βλάστηση και σε αστικές περιοχές το πλήθος των μόνιμων σκεδαστών είναι αρκετά μεγάλο ώστε η μέθοδος να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Για να χαρακτηριστούν οι σκεδαστές ως μόνιμο θα πρέπει να έχουν ελάχιστη διαχρονική και γεωμετρική αποσυσχέτιση (Decorrelation) ώστε το πλάτος τους στις εικόνες SAR να παραμένει σχετικά σταθερό.

5.3 Συμβολομετρία κατανεμημένων σκεδαστών (DSI)

Η συμβολομετρία κατανεμημένων σκεδαστών παρέχει υψηλή χρονική δειγματοληψία σε περιοχές που παρουσιάζουν παραμορφώσεις και παράλληλα μεγάλη χωρική κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος.

Ανάλογα με τον τρόπο που έχει ενωθεί το δίκτυο των συμβολογραφημάτων, η συμβολομετρία κατανεμημένων σκεδαστών χωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία χρησιμοποιεί ένα δίκτυο συμβολογραφημάτων με μικρά χρονικά και χωρικά διανύσματα βάσης και ονομάζονται υποσύνολα μικρών βάσεων (Small BAseline Subsets, SBAS) (Berardino et al., 2002, Schmidt & Bürgmann, 2003). Οι τεχνικές αυτές λύνουν ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων παρατήρησης

χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων ή την ελαχιστοποίηση της νόρμας L1 (Lauknes et al., 2010). Στις περιπτώσεις που το δίκτυο δεν είναι πλήρως ενωμένο, προκειμένου να βρεθεί μια λύση με φυσική σημασία χρησιμοποιείται η ανάλυση πίνακα σε ιδιάζουσες τιμές (Singular Value Decomposition, SVD) ή μια σταθερά κανονικοποίησης (López-Quiroz et al., 2009). Οι εν λόγω τεχνικές απαιτούν συμβολογραφήματα στα οποία έχει γίνει προσδιορισμός της απόλυτης συμβολομετρικής φάσης. Η δεύτερη κατηγορία χρησιμοποιεί ένα δίκτυο με όλα τα δυνατά συμβολογραφήματα που μπορούν να δημιουργηθούν (Ferretti et al., 2011, Fornaro 2015, Guarnieri & Tebaldini 2008). Η λύση του δικτύου δίνεται από τον εκτιμητή μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood estimator) με απόδοση κοντά στο όριο Cramer-Rao (Ansari et al. 2018, Samiei-Esfahany et al. 2016, Yunjun et al., 2019).

Το λογισμικό MintPy που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των εικόνων SAR εφαρμόζει έναν εκτιμητή σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων για τον προσδιορισμό της φάσης, ο οποίος είναι βασισμένος στη μέθοδο υποσυνόλων μικρών βάσεων (SBAS) με γραμμικές βελτιστοποιήσεις (Yunjun et al., 2019).

Μετά την επεξήγηση όλων των θεωρητικών όρων, στη συνέχεια θα γίνει αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας, παρουσιάζοντας όλα τα βήματα επεξεργασίας των εικόνων SAR.

Κεφάλαιο 6 Επεξεργασία

Στόχος της εργασίας είναι η παρακολούθηση των παραμορφώσεων στο νομό Χανίων με χρήση της μεθόδου κατανεμημένων σκεδαστών, υποσυνόλων μικρών βάσεων (SBAS). Για το σκοπό αυτό, δημιουργήθηκαν συμβολογραφήματα από εικόνες δορυφόρου, οι οποίες εκτείνονται χρονικά από τον Μάιο του 2017 μέχρι και τον Αύγουστο 2021. Τα συμβολογραφήματα χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του χάρτη επιφανειακών ταχυτήτων, ενώ η ακρίβεια των αποτελεσμάτων επαληθεύτηκε από τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των παρατηρήσεων των μόνιμων σταθμών GPS που συντηρεί το Εργαστήριο Γεωδαισίας και Πληροφορικής των Γεωεπιστημών της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων (ΜΗΧΟΠ) του Πολυτεχνείου Κρήτης στο νομό Χανίων (Σχήμα 6.1).

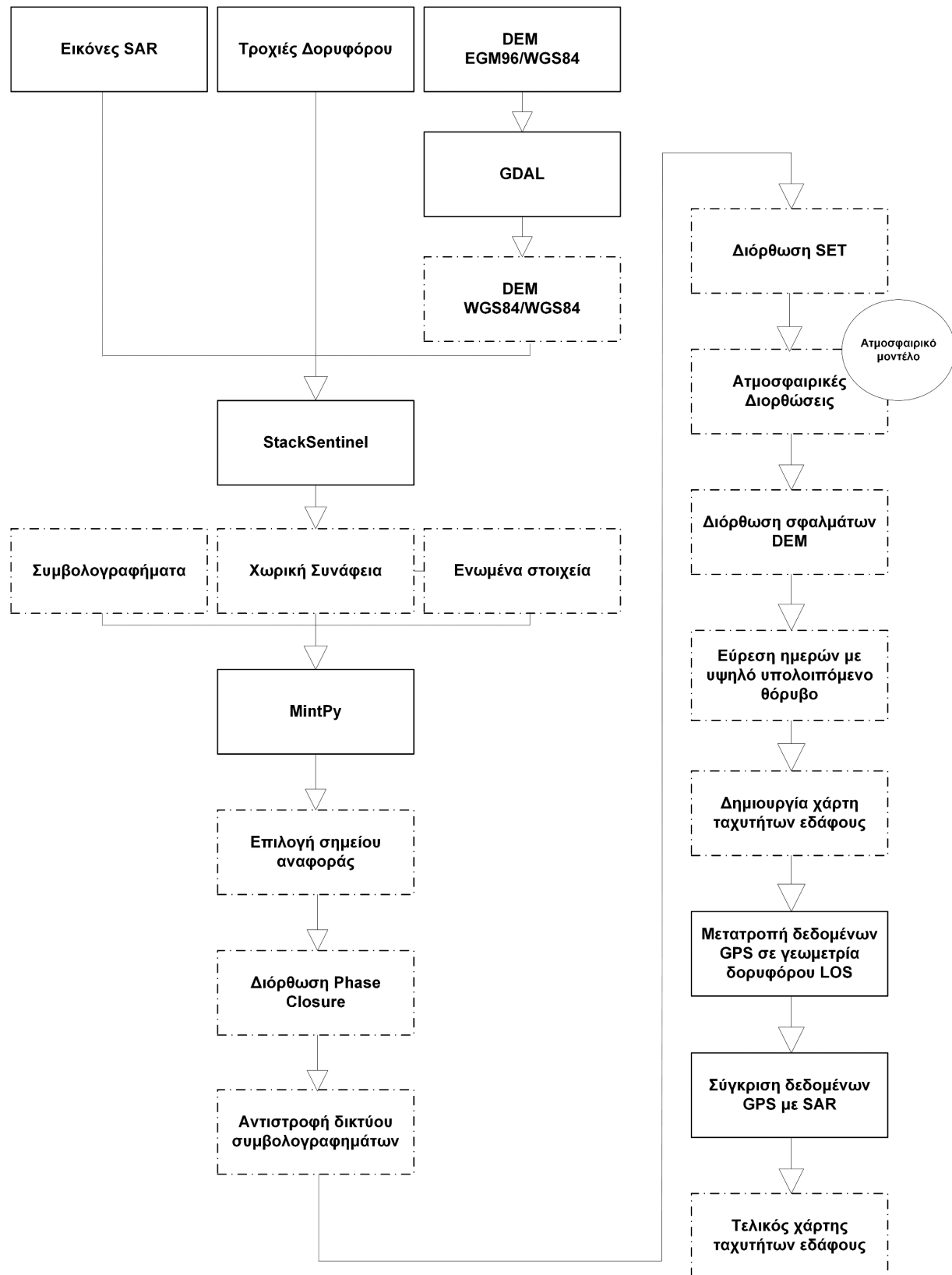


Σχήμα 6.1: Μόνιμοι σταθμοί GPS/GNSS στο νομό Χανίων.

Τα βασικά βήματα της επεξεργασίας είναι τα παρακάτω:

- Αλλαγή υψομετρικού συστήματος αναφοράς στο DEM από EGM96 σε WGS84.
- Δημιουργία συμβολογραφημάτων.
- Εισαγωγή στο λογισμικό Mintpy των συμβολογραφημάτων, χωρική συνάφεια, ενωμένα στοιχεία.
- Επιλογή σημείου αναφοράς για την αντιστροφή των συμβολογραφημάτων.
- Διόρθωση σφαλμάτων κλεισίματος φάσης (Phase Closure).
- Αντιστροφή δικτύου συμβολογραφημάτων.
- Διόρθωση για τις παλίρροιες της στερεάς Γης (Solid Earth Tides, SET).
- Ατμοσφαιρικές διορθώσεις.
- Διόρθωση σφαλμάτων DEM.
- Δημιουργία χάρτη ταχυτήτων εδάφους.
- Μετατροπή των δεδομένων GPS στη γεωμετρία δορυφόρου LOS των συμβολογραφημάτων.
- Σύγκριση δεδομένων GPS με SAR.
- Τελικός χάρτης ταχυτήτων εδάφους.

Τα βήματα της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία, απεικονίζονται στο Σχήμα 6.2. με τη μορφή διαγράμματος ροής. Με διακεκομμένες γραμμές εμφανίζονται τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν από ενσωματωμένες λειτουργίες των χρησιμοποιούμενων προγραμμάτων.



Σχήμα 6.2 Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας.

6.1 Δημιουργία συμβολογραφημάτων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία προέρχονται από το δορυφόρο Sentinel-1A της ESA. Οι εικόνες της αποστολής είναι ελεύθερα διαθέσιμες και δωρεάν για μεταφόρτωση από την ιστοσελίδα της ESA (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/>) αρκεί ο ενδιαφερόμενος να δημιουργήσει λογαριασμό χρήστη. Η μεταφόρτωση των εικόνων μπορεί να γίνει και από την σελίδα του Alaska Satellite Facility (ASF) στο σύνδεσμο (<https://search.asf.alaska.edu/#/>) χρησιμοποιώντας τον ίδιο λογαριασμό χρήσης της ιστοσελίδας της ESA.

Επιλέγοντας την περιοχή ενδιαφέροντος (Σχήμα 6.3), δηλαδή τον νομό Χανίων και τα έτη για τα οποία αναζητούμε εικόνες, εμφανίζονται όλοι οι διαθέσιμοι τύποι εικόνων. Για την παρούσα, επιλέχθηκε ο τύπος εικόνας πρώτου επιπέδου (L1) SLC (Single Look Complex) ο οποίος φέρει πληροφορίες πλάτους και φάσης. Ως τρόπος λήψης ορίστηκε ο IW (Interferometric Wide Swath) λόγω της μεγάλης εδαφικής κάλυψης που έχει, ενώ ως προς το είδος της πόλωσης επιλέχθηκε η VV (Vertical-Vertical) καθώς είναι πιο ευαίσθητη σε εδαφικές μετακινήσεις. Έτσι επιλέχθηκαν 129 εικόνες από τις 29/05/2017 έως τις 24/08/2021 των οποίων τα χαρακτηριστικά φαίνονται στο Παράρτημα Α.



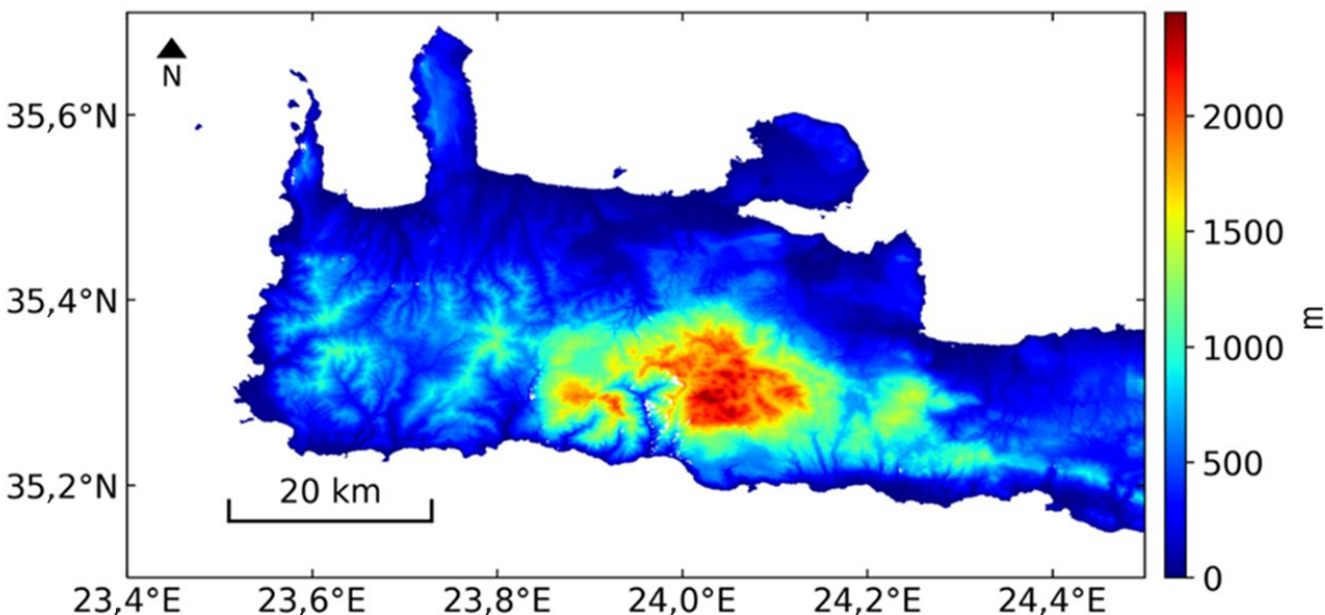
Σχήμα 6.3: Πλαίσιο εικόνων SAR, με κίτρινο πλαίσιο η περιοχή ενδιαφέροντος και με κόκκινο πλαίσιο η περιοχή του καλύπτει η εικόνα SAR .

Εκτός από τις εικόνες SAR, είναι απαραίτητο να συλλεχθούν οι τροχιές των δορυφόρων ώστε να μπορεί να γίνει η συμπροσαρμογή των εικόνων SAR για την δημιουργία συμβολογραφημάτων. Υπάρχουν δύο κατηγορίες τροχιών, οι μεσαίας ανάλυσης, οι οποίες είναι διαθέσιμες μερικές ώρες

από την ημερομηνία λήψης και οι υψηλής ακρίβειας που είναι διαθέσιμες μετά από 20 ημέρες. Τροχιακά και άλλα βοηθητικά δεδομένα της αποστολής Sentinel-1 είναι διαθέσιμα στην ιστοσελίδα της ESA (<https://scihub.copernicus.eu/gnss/#/home>). Για την παρούσα, χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά τροχιές υψηλής ακρίβειας (Precise Orbit Determination, POD) των οποίων τα στοιχεία βρίσκονται στο Παράρτημα Β.

Μια ακόμα σημαντική πληροφορία που απαιτείται για τη δημιουργία των συμβολογραφημάτων είναι αυτή του τοπογραφικού αναγλύφου, η οποία λαμβάνεται από τα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα DEM. Κατά τα τελευταία 20 χρόνια της ανάπτυξής τους, έχουν δημιουργηθεί διάφορα DEM τα οποία ποικίλουν όσον αφορά την ανάλυση. Έτσι ο χρήστης βρίσκει διαθέσιμα, DEM με πολύ υψηλή ανάλυση τοπικής εμβέλειας (LiDAR DEM) και υψηλής ή μέσης ανάλυσης DEM παγκόσμιας εμβέλειας (GDEM) (SRTM, ASTER, AW3D30, Copernicus DEM, NASADEM). Τα παγκόσμια ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα θα πρέπει να ελέγχονται για την ακρίβειά τους ανά περιοχή εφαρμογής, διότι μπορεί να έχουν σε κάποιες περιοχές μικρά σφάλματα ενώ σε άλλες αρκετά μεγαλύτερα (Hui Li, 2022).

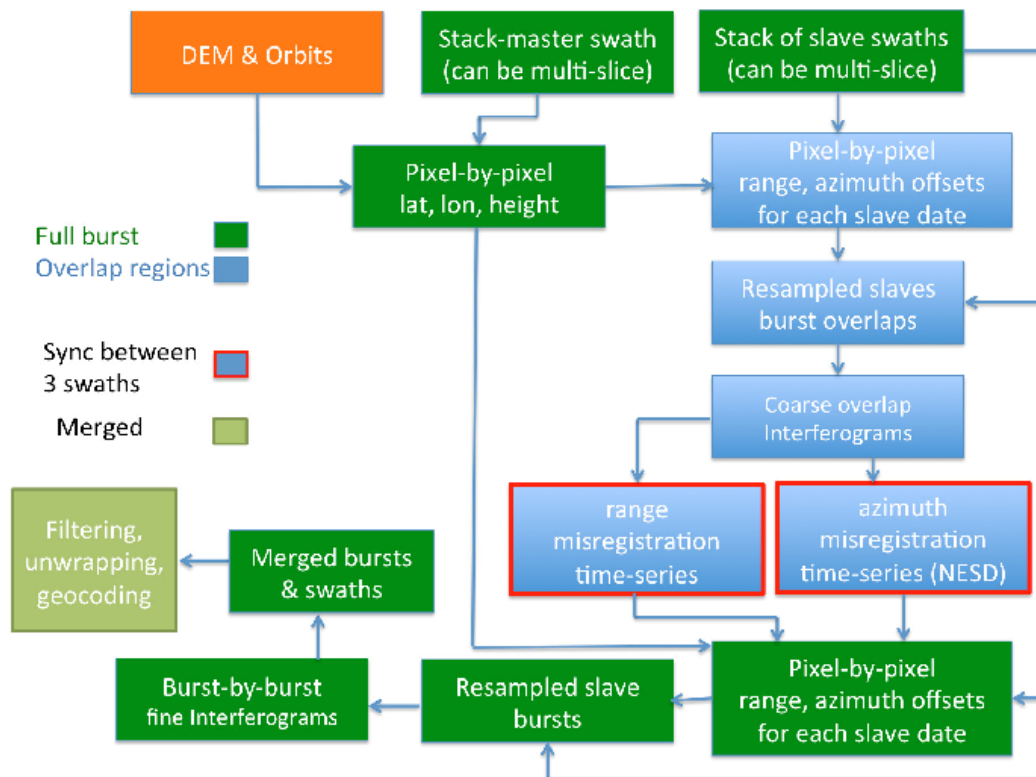
Για την περιοχή μελέτης του νομού Χανίων χρησιμοποιήθηκε το παγκόσμιο DEM AW3D30 (Σχήμα 6.4) (Tadono et al., 2014, Takaku & Tadono, 2017, Takaku et al., 2014, 2016, 2018, 2020) με χωρική ανάλυση 30 m διότι έχει καλή προσαρμογή στο έντονο ανάγλυφο του Νομού και έχει μέσο τετραγωνικό σφάλμα 14,2 m (Nikolakopoulos, 2020). Το συγκεκριμένο μοντέλο προέκυψε από δορυφορικές εικόνες του παγχρωματικού αισθητήρα Τηλεπισκόπησης για στερεοσκοπική χαρτογράφηση (PRISM) του δορυφόρου ALOS της Ιαπωνικής Υπηρεσίας Αεροδιαστημικής Εξερεύνησης (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) και έπειτα από επαναδειγματοληψία του αρχικού μοντέλου AW3D5 οριζόντιας και υψομετρικής ανάλυσης πέντε μέτρων. Το μοντέλο AW3D30 είναι ανοιχτό και δίνεται δωρεάν στην ιστοσελίδα της JAXA (https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm). Για το κατακόρυφο επίπεδο αναφοράς χρησιμοποιεί το γεωειδές EGM96 ενώ για το οριζόντιο επίπεδο, το παγκόσμιο σύστημα αναφοράς WGS84.



Σχήμα 6.4: Το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο AW3D30.

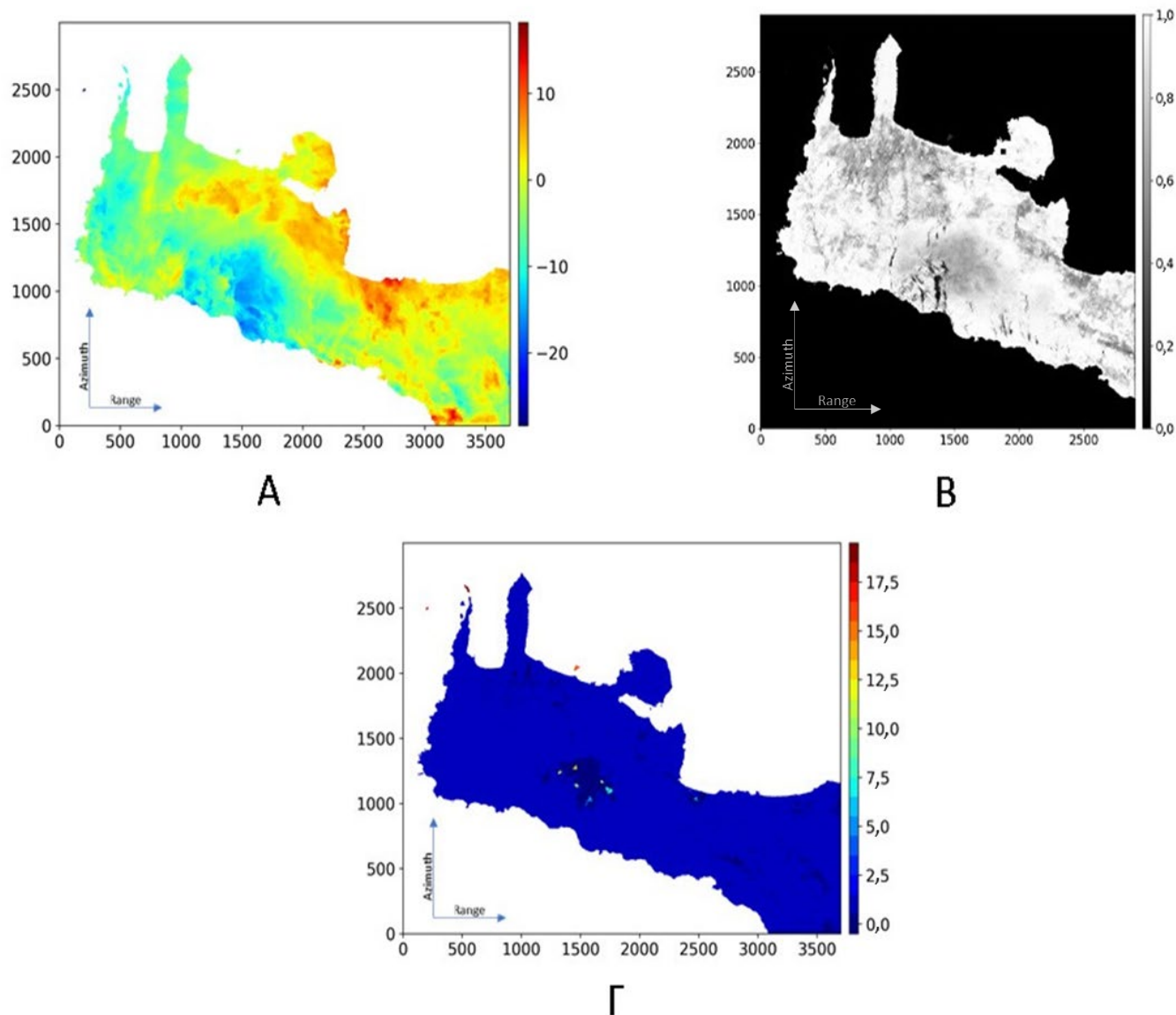
Για τις ανάγκες της επεξεργασίας έγινε αλλαγή του κατακόρυφου επιπέδου αναφοράς από το γεωειδές EGM96 σε WGS84 καθώς αποτελεί το ελλειψοειδές αναφοράς των δορυφόρων συμβολομετρίας και κατ' επέκταση του Sentinel-1. Επιπλέον χρειάστηκε να διαφοροποιηθεί η μορφοποίηση του DEM από GeoTIFF σε SRTM HGT με την βοήθεια προγράμματος που διατίθεται δωρεάν στην ιστοσελίδα της JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency). Στη συνέχεια έγινε αλλαγή του κατακόρυφου επιπέδου αναφοράς με το πρόγραμμα GDAL (<https://gdal.org/>).

Ακολούθως χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα stackSentinel (Fattahi et al., 2016) που αποτελεί μέρος του λογισμικού ανοικτού κώδικα ISCE2 (GitHub - isce-framework/isce2: InSAR Scientific Computing Environment version 2). Όπως φαίνεται από το διάγραμμα λειτουργίας του προγράμματος (Σχήμα 6.5), δέχεται εικόνες σε μορφή SLC των δορυφόρων Sentinel-1A/B, τροχιακά δεδομένα και το DEM. Όλα αυτά τα δεδομένα είναι απαραίτητα για να πραγματοποιηθεί η εγγραφή των εικόνων έτσι ώστε να συμπίπτουν εικονοστοιχείο προς εικονοστοιχείο (Fattahi, 2016). Μετά την εγγραφή των εικόνων σε εικόνες (Coregistration) δημιουργήθηκαν τα συμβολογραφήματα. Τελικά τα συμβολογραφήματα φιλτράρονται, γίνεται προσδιορισμός της απόλυτης συμβολομετρικής φάσης (unwrapping) και τη μετατροπή της σε τοπογραφική πληροφορία (geocoding) από συντεταγμένες Radar σε WGS84.



Σχήμα 6.5: Διάγραμμα ροής προγράμματος stackSentinel. (Fattahi & Amelung, 2015)

Συγκεκριμένα από την επεξεργασία προέκυψαν 630 συμβολογραφήματα, δηλαδή από τις 129 εικόνες SAR σχηματίστηκαν 5 ζευγάρια ανά εικόνα με τελική χωρική ανάλυση 30 x 30 m. Για κάθε συμβολογράφημα υπολογίστηκε η χωρική συνάφεια (Σχήμα 6.6A), η οποία λαμβάνει τιμές από 1 για περιοχές χωρίς θόρυβο και 0 για περιοχές με τυχαία φάση (Σχήμα 6.6B). Κατά τον προσδιορισμό της απόλυτης συμβολομετρικής φάσης δημιουργήθηκε ο χάρτης με τα ενωμένα στοιχεία (Connected Components) (Σχήμα 6.6Γ). Ο όρος προέρχεται από τη τοπολογία και χαρακτηρίζει περιοχές μέσα στις οποίες ο προσδιορισμός της απόλυτης συμβολομετρικής φάσης έγινε αξιόπιστα. Τελικά υπολογίστηκε η γεωμετρία του Radar η οποία λαμβάνει υπ' όψιν το υψόμετρο, την κεκλιμένη απόσταση, τη γωνία αζιμουθίου και πρόσπτωσης.

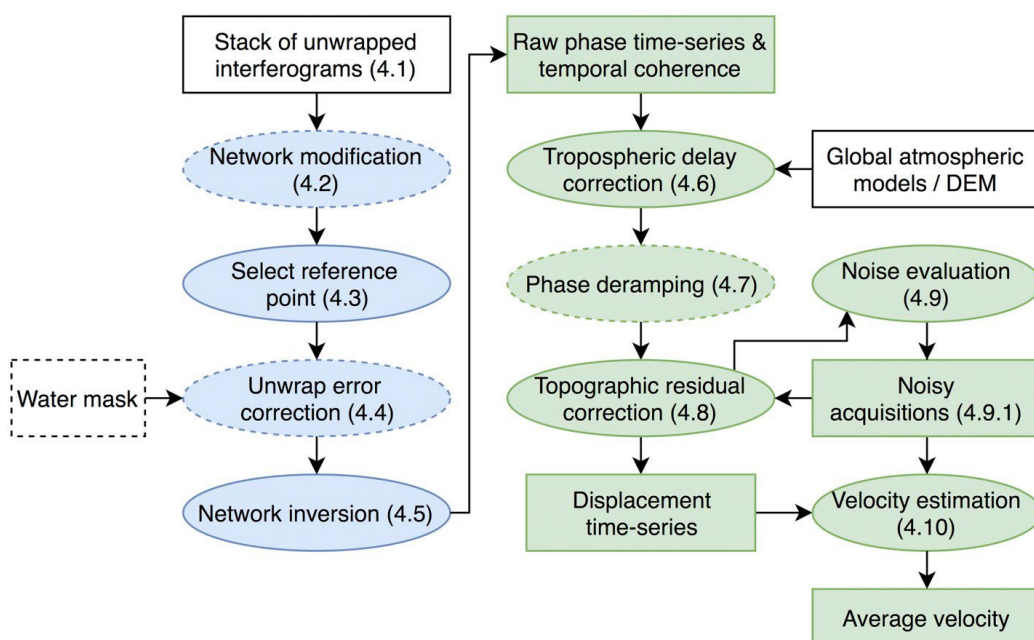


Σχήμα 6.6: Δεδομένα εισαγωγής στο πρόγραμμα *MintPy* στη γεωμετρία του δορυφόρου: Α) Συμβολομετρική φάση Β) Χωρική συνάφεια Γ) Ενωμένα στοιχεία

6.2 Εφαρμογή της διαχρονικής μεθόδου υποσυνόλων μικρών βάσεων (SBAS) στο νομό Χανίων

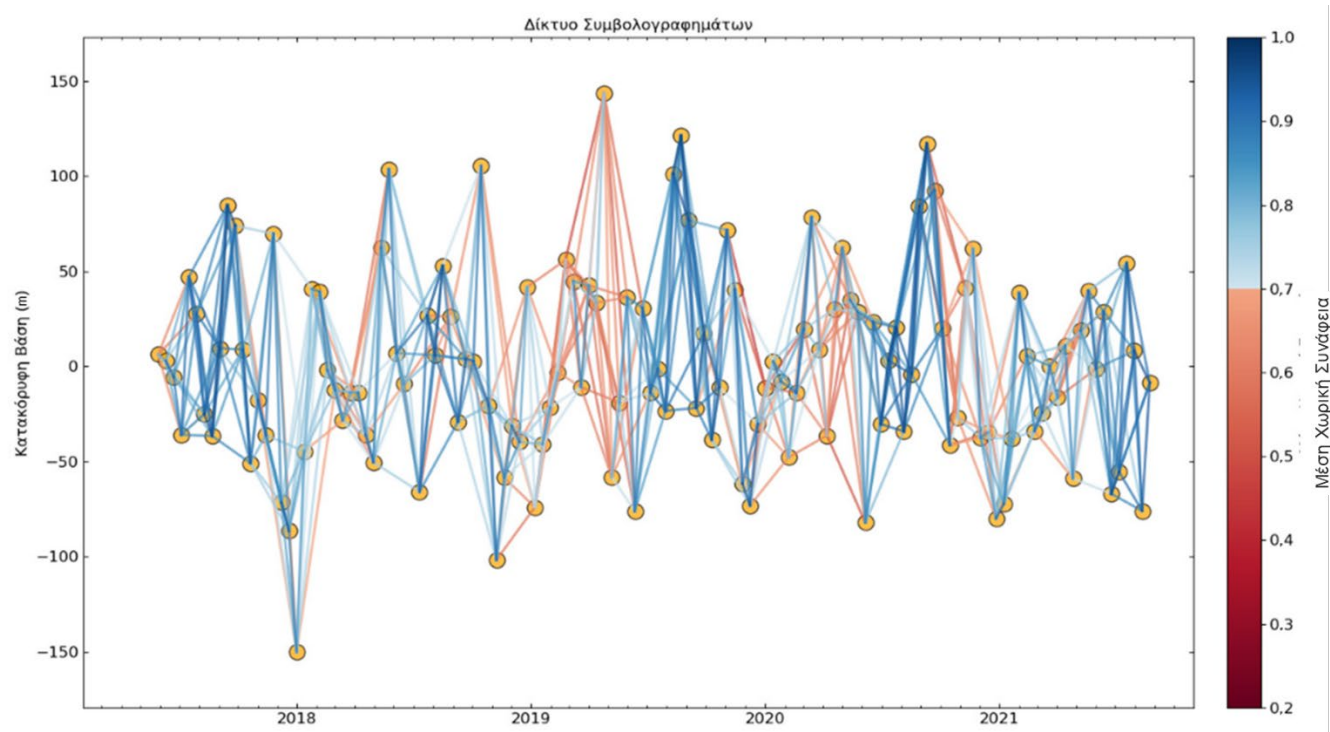
Στη συνέχεια τα συμβολογραφήματα εισήχθησαν στο ανοικτού κώδικα πρόγραμμα *MintPy* για την εφαρμογή της μεθόδου καταμερισμένων σκεδαστών SBAS (Yunjun et al., 2019). Στο Παράρτημα Γ υπάρχουν στιγμιότυπα από την επεξεργασία. Στο Σχήμα 6.7 φαίνεται το διάγραμμα ροής του

λογισμικού καθώς και η βασική διαφορά του από άλλα προγράμματα που εφαρμόζουν την τεχνική SBAS. Με τη μέθοδο SBAS, αφαιρούνται από τα συμβολογραφήματα οι κύριες πηγές σφαλμάτων. Συγκεκριμένα οι διορθώσεις που εφαρμόζονται, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η ομάδα διορθώσεων που συντελούνται στο δισδιάστατο χώρο του συμβολογραφήματος (μπλε σκίαση) και η ομάδα διορθώσεων που συντελούνται στον τρισδιάστατο χώρο των χρονοσειρών (πράσινη σκίαση).



Σχήμα 6.7: Διάγραμμα ροής προγράμματος MintPy. (Yunjun et al., 2019)

Σε πρώτη φάση, εισάγονται τα συμβολογραφήματα στο λογισμικό, άρα αναγνωρίζεται από το πρόγραμμα η γεωμετρία τους, η χωρική συνάφεια και τα ενωμένα στοιχεία. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.8 η ποιότητα των συμβολογραφημάτων που δημιουργήθηκαν ήταν αρκετά υψηλή καθώς, η πλειοψηφία τους έχει μέση χωρική συνάφεια άνω του 0,6 , ενώ το μεγαλύτερο διάνυσμα βάσης είναι περίπου 220 m και η μέγιστη διαχρονική απόσταση είναι 72 ημέρες.



Σχήμα 6.8: Το δίκτυο των συμβολογραφημάτων με την μέση χωρική συνάφεια.

Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή σημείου αναφοράς στο έδαφος. Η μέθοδος των υποσυνόλων μικρών βάσεων (SBAS) είναι μια τεχνική διπλών διαφορών, το οποίο σημαίνει ότι οι ταχύτητες των σημείων στην επιφάνεια της Γης, υπολογίζονται ως προς ένα σταθερό σημείο στο χώρο και ως προς μια συγκεκριμένη στιγμή στο χρόνο. Το σημείο αναφοράς που επιλέγεται στο έδαφος είναι πάρα πολύ σημαντικό καθώς μπορεί να επηρεάσει την αξιοπιστία της επεξεργασίας. Για το λόγο αυτό, το σημείο αναφοράς, θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή συνάφεια, να μην υπόκειται το ίδιο σε κάποιου είδους παραμόρφωση ενώ θα πρέπει να είναι γνωστή η συμπεριφορά του στο χώρο και στο χρόνο.

Για την επεξεργασία της παρούσας επιλέχθηκε ο μόνιμος δορυφορικός σταθμός GNSS TUC2 ο οποίος είναι εγκατεστημένος σε περιφραγμένο χώρο στο τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Παρέχει δε, δεδομένα GNSS (GPS και GLONASS) από τον Ιούλιο του 2004 και ακολουθεί τις προδιαγραφές και τα διεθνή πρότυπα των μόνιμων σταθμών GPS της International GPS Service. Από τον Οκτώβριο του 2004 ο σταθμός έχει συνδεθεί με το πανευρωπαϊκό δίκτυο μόνιμων δορυφορικών παρατηρήσεων GPS της υπηρεσίας European Reference Frame Permanent Network (EUREF). Όλα τα δεδομένα για τον μόνιμο σταθμό GPS

TUC2 είναι διαθέσιμα και διατίθενται δωρεάν στην ιστοσελίδα της EUREF (<http://www.epncb.oma.be/networkdata/siteinfo4onestation.php?station=TUC200GRC>). Οι συντεταγμένες του σταθμού στο παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα WGS-84 για το έτος 2017, καθώς και η τιμή της χωρικής συνάφειάς του, παρουσιάζονται στους Πίνακες 5 και 6:

Πίνακας 5: Συντεταγμένες TUC2 σε WGS-84.

ϕ	λ	h(m) Γεωμετρικό υψόμετρο
24° 04' 14,01622"	35° 31' 59,48113"	160,920

Πίνακας 6: Χωρική συνάφεια TUC2.

Συνάφεια
0,95

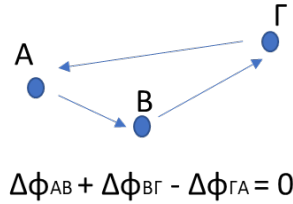
Η συμβολομετρική φάση αποτελείται από τις εξής συνιστώσες (αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4):

$$\varphi = \varphi_{topo} + \varphi_{disp} + \varphi_{orbit} + \varphi_{tropo} + \varphi_{flat} + \varphi_{noise} + \varphi_{SET} \quad (6.1)$$

Η επεξεργασία στοχεύει στο να απομονώσει τη συνιστώσα φ_{disp} , αφαιρώντας τις υπόλοιπες συνιστώσες. Από τη μέχρι τώρα επεξεργασία έχουν αφαιρεθεί οι όροι φ_{topo} , φ_{flat} με τη χρήση του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου στην Ενότητα (6.1). Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι η συνιστώσα φ_{orbit} θεωρείται αμελητέα για τους δορυφόρους Sentinel-1 λόγω των μικρών διακυμάνσεων που έχουν οι τροχιές τους ενώ η συνιστώσα φ_{noise} είναι εγγενής στα ηλεκτρονικά κυκλώματα του δορυφόρου οπότε δεν υπάρχει κάποια μέθοδος μέχρι τώρα για την εξάλειψή της. Κατά συνέπεια, πλέον η συμβολομετρική φάση περιλαμβάνει:

$$\varphi = \varphi_{residual topo} + \varphi_{disp} + \varphi_{tropo} + \varphi_{SET} + \varphi_{phase closure} \quad (6.2)$$

Ωστόσο στην παραπάνω Εξίσωση παρατηρείται πως ενώ αφαιρέθηκαν κάποιες πηγές θορύβου προστέθηκαν άλλες. Συγκεκριμένα προστέθηκε η συνιστώσα $\varphi_{residual topo}$, η οποία προέκυψε από τα σφάλματα του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου (το οποίο έχει μέσο τετραγωνικό σφάλμα 14,2 m). Επίσης προστέθηκε η συνιστώσα $\varphi_{phase closure}$ διότι κατά τον προσδιορισμό της απόλυτης συμβολομετρικής φάσης δεν έγινε η προσθήκη του σωστού ακέραιου πολλαπλασίου του 2π. Η διόρθωση της πρώτης συνιστώσας σφάλματος θα γίνει στη συνέχεια στο χώρο των χρονοσειρών, ενώ η συνιστώσα $\varphi_{phase closure}$ μπορεί να βελτιωθεί στο χώρο των συμβολογραφημάτων.

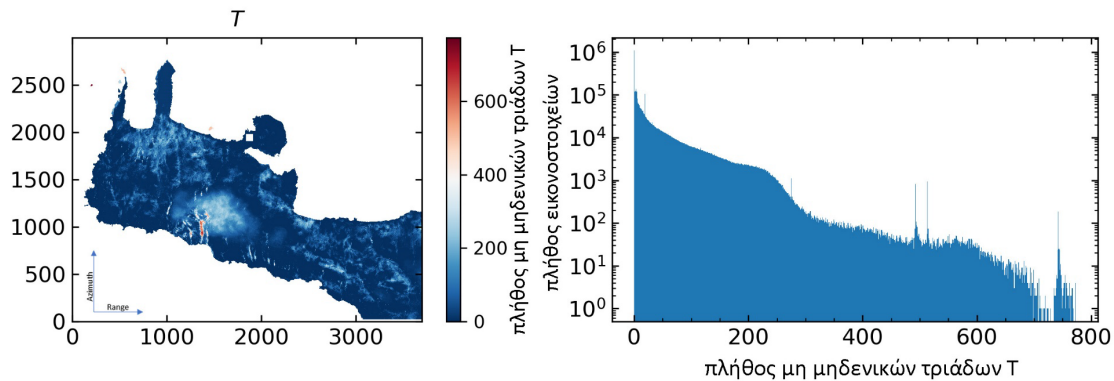


Σχήμα 6.9: Τριάδα συμβολογραφημάτων για κλείσιμο φάσης.

Το σφάλμα κλεισίματος φάσης (Phase Closure) γίνεται πιο κατανοητό αν σκεφτεί κανείς τρία συμβολογραφήματα όπως στο Σχήμα 6.9. Η Εξίσωση κλεισίματος φάσης δηλώνει ότι το άθροισμα των διαφορών φάσης γύρω από οποιοδήποτε κλειστό τρίγωνο που σχηματίζεται από τα τρία συμβολογραφήματα θα πρέπει να είναι μηδέν, εφόσον δεν υπάρχουν σφάλματα στον προσδιορισμό της απόλυτης συμβολομετρικής φάσης. Εάν το άθροισμα των διαφορών φάσης γύρω από ένα κλειστό τρίγωνο δεν είναι μηδέν, σημαίνει ότι υπάρχουν σφάλματα φάσης στην τριάδα συμβολογραφημάτων. Η εν λόγω τριάδα είναι μία μη μηδενική τριάδα T .

Κανονικά, αν κατά την διαδικασία προσδιορισμού της πραγματικής συμβολομετρικής φάσης δεν υπήρχε κανένα σφάλμα, προσθέτοντας τα συμβολογραφήματα AB και $B\Gamma$ και αφαιρώντας το συμβολογράφημα ΓA , θα έπρεπε το υπόλοιπο της φάσης να είναι ίσο με το μηδέν, δηλαδή το πλήθος άθροισμα των μη μηδενικών τριάδων T να είναι μηδέν.

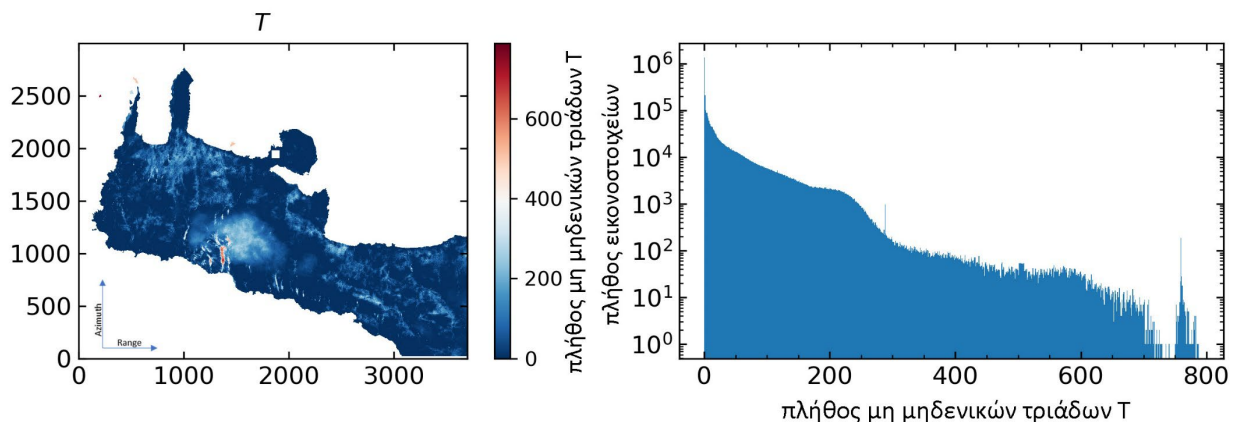
Από το Σχήμα 6.10 φαίνεται πως στο μεγαλύτερο μέρος του νομού δεν υπάρχει πρόβλημα (χρώμα σκούρο μπλε), εκτός από τις περιοχές με έντονη βλάστηση ή μεγάλο υψόμετρο που απεικονίζονται με χρώμα από λευκό μέχρι κόκκινο και έχουν μεγάλο πλήθος μη μηδενικών τριάδων T .



Σχήμα 6.10: Αριστερά: Χάρτης με το πλήθος μη μηδενικών τριάδων T σε γεωμετρία δορυφόρου. Δεξιά: Κατανομή μη μηδενικών τριάδων T .

Για να διορθωθούν τα σφάλματα κλεισίματος φάσης (Phase Closure), χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος bridging of reliable regions του προγράμματος MintPy (Yunjun et al., 2019). Ο αλγόριθμος λειτουργεί σε τρία στάδια για κάθε συμβολογράφημα. Στο πρώτο στάδιο, γίνεται η αναγνώριση αξιόπιστων περιοχών με την βοήθεια των εικόνων ενωμένων στοιχείων (Connected Components) (Ενότητα 6.1). Έπειτα η μέθοδος «bridging» προσπαθεί να συνδέσει όλες τις αξιόπιστες περιοχές του προηγούμενου βήματος. Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Minimum Spanning Tree (MST) ελαχιστοποιείται το συνολικό μήκος των συνδέσεων. Στο τρίτο στάδιο, υπολογίζεται για κάθε σύνδεση το ακέραιο πολλαπλάσιο του 2π που θα πρέπει να προστεθεί για την ένωση των αξιόπιστων περιοχών (Yunjun et al., 2019).

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.11 μετά την εφαρμογή της μεθόδου έχουμε μείωση των σφαλμάτων ιδιαίτερα στα εικονοστοιχεία που είχαν πλήθος μη μηδενικών τριάδων T στο διάστημα μεταξύ 400 και 600.



Σχήμα 6.11: Χάρτης με το πλήθος μη μηδενικών τριάδων T μετά τη διόρθωση σε γεωμετρία δορυφόρου. Δεξιά: Κατανομή μη μηδενικών τριάδων T μετά τη διόρθωση.

Στη συνέχεια γίνεται η αντιστροφή του δικτύου των συμβολογραφημάτων χρησιμοποιώντας σταθμισμένα ελάχιστα τετράγωνα. Στο λογισμικό υπάρχουν τέσσερις στρατηγικές στάθμισης. Η πρώτη στρατηγική είναι η ομοιόμορφη ή καθόλου στάθμιση, δηλαδή ο πίνακας με τα βάρη είναι ίσος με τον μοναδιαίο πίνακα (Identity matrix) (Bernandino et al., 2002). Η δεύτερη απαιτεί τα βάρη να προκύπτουν από την χωρική συνάφεια (δηλαδή υψηλή συνάφεια μεγάλο βάρος, χαμηλή συνάφεια μικρό βάρος) (Perissin & Wang 2012, Pepe et al., 2015). Η τρίτη χρησιμοποιεί το αντίστροφο της διακύμανσης της φάσης $1/\sigma^2$ (Tough et al., 1995) ενώ η τέταρτη χρησιμοποιεί τον μη παραμετρικό πίνακα Fisher (Samiei-Esfahany et al. 2016, Seymour & Cumming 1994). Η

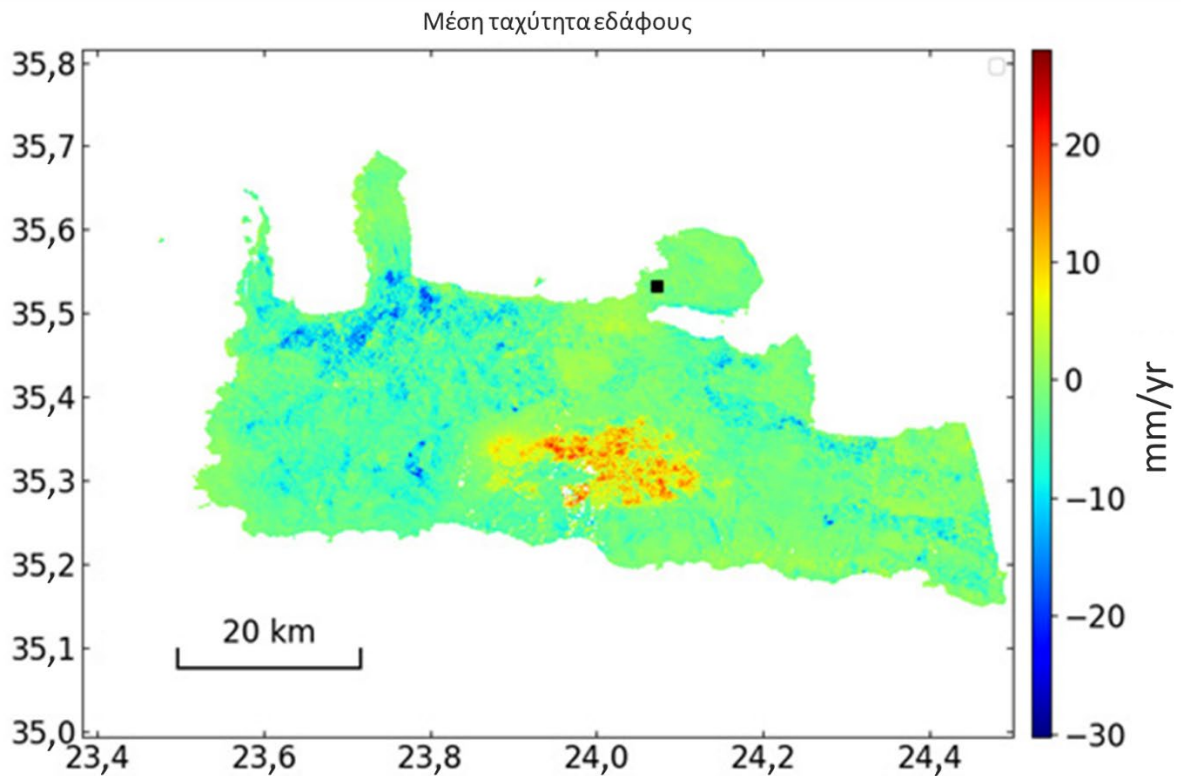
τεχνική που έχει τα μικρότερα σφάλματα είναι αυτή που χρησιμοποιεί το αντίστροφο της διακύμανσης της φάσης, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την αντιστροφή (Yunjun et al., 2019).

Η ποιότητα της αντιστροφής ελέγχεται από τη διαχρονική συνάφεια γ_{temp} , η οποία λαμβάνει τιμές από το 1 ως το 0 και υπολογίζεται από την σχέση (Pepe & Lanari 2006):

$$\gamma_{temp} = \frac{1}{M} |H^T \exp[j(\Delta\phi - A\hat{\phi})]| \quad (6.3)$$

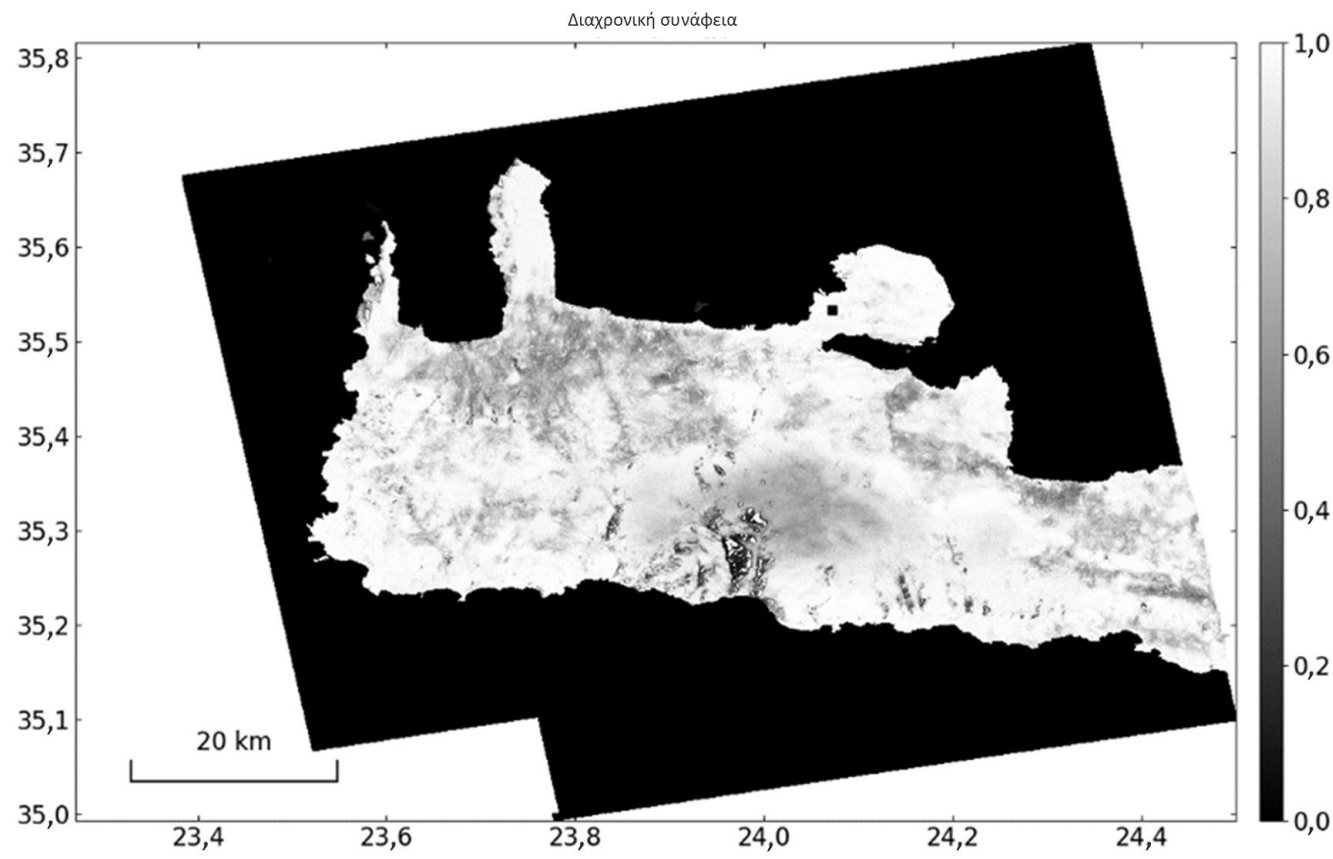
Στην Εξίσωση (6.3), j είναι η φανταστική μονάδα, H είναι ένα $M \times 1$ μοναδιαίο διάνυσμα, $\Delta\phi$ είναι η φάση πριν την αντιστροφή, $\hat{\phi}$ είναι η υπολογισθείσα φάση από την αντιστροφή και A είναι το κρίσιμο όριο που θα χρησιμοποιηθεί ώστε να γίνει η επιλογή των αξιόπιστων εικονοστοιχείων από την αντιστροφή του δικτύου των συμβολογραφημάτων.

Στο Σχήμα 6.12 φαίνεται το μοντέλο της μέσης ταχύτητας του εδάφους που προέκυψε από την αντιστροφή.



Σχήμα 6.12: Μέση ταχύτητα του εδάφους αμέσως μετά την αντιστροφή χωρίς διορθώσεις.

Στο Σχήμα 6.13 φαίνεται η διαχρονική συνάφεια η οποία έχει χαμηλές τιμές κυρίως στις ορεινές περιοχές και στις περιοχές με έντονη βλάστηση όπως για παράδειγμα στα βορειοδυτικά του νομού.



Σχήμα 6.13: Διαχρονική συνάφεια.

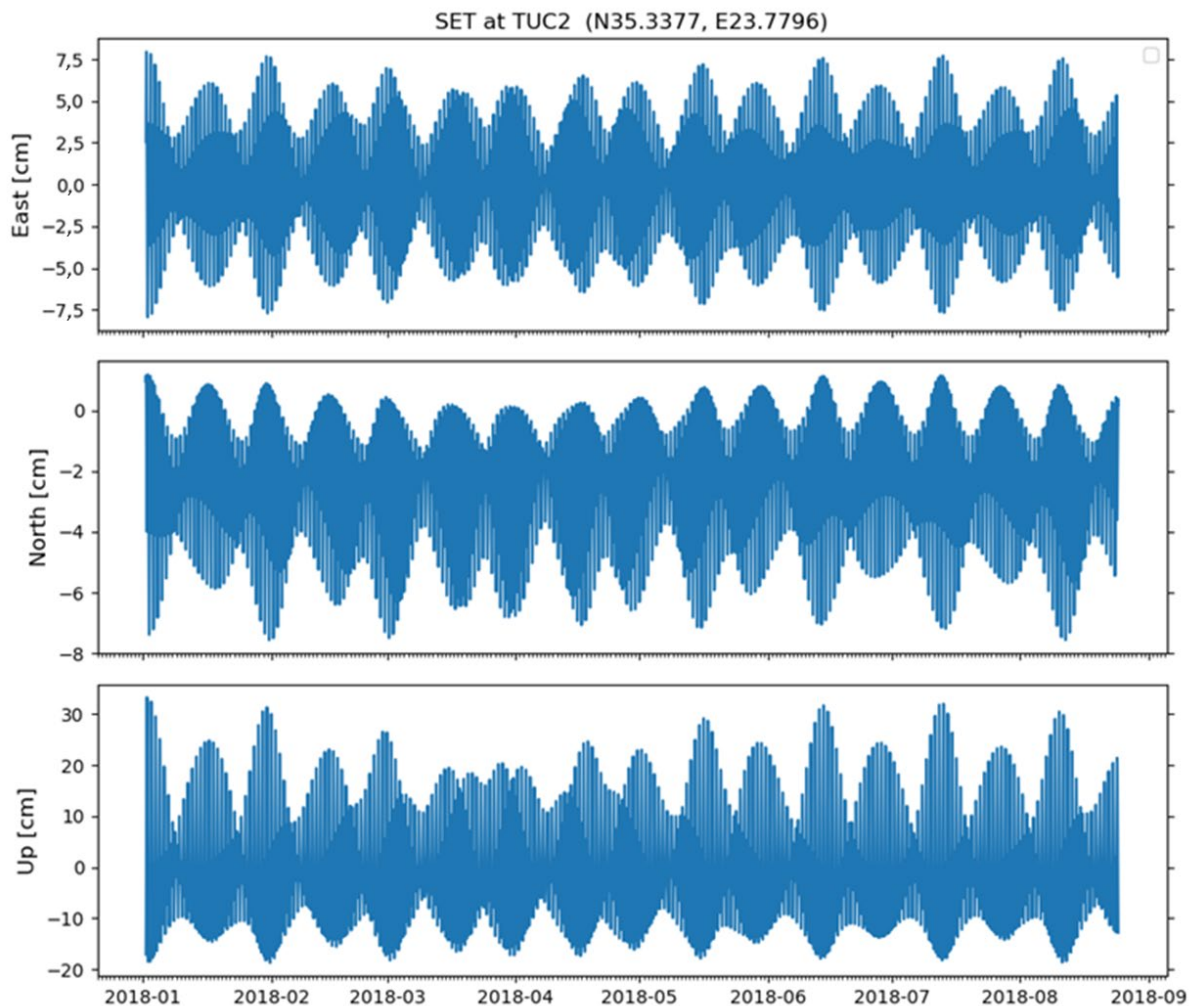
Μετά την αντιστροφή του δικτύου των συμβολογραφημάτων, η επεξεργασία μεταφέρεται στο χώρο των χρονοσειρών όπου πρέπει να πραγματοποιηθούν οι διορθώσεις για την τροπόσφαιρα, τις παλίρροιες της στερεάς Γης και την αβεβαιότητα του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου, με σκοπό την απομόνωση του σήματος ενδιαφέροντος φ_{disp} .

Για την απομάκρυνση της επίδρασης των παλίρροιών της στερεάς Γης (Solid Earth Tides, SET) χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα PySolid (Petit, 2010). Ο υπολογισμός γίνεται σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές του 2010 IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) με ακρίβεια μικρότερη από 1 mm (Petit, 2010).

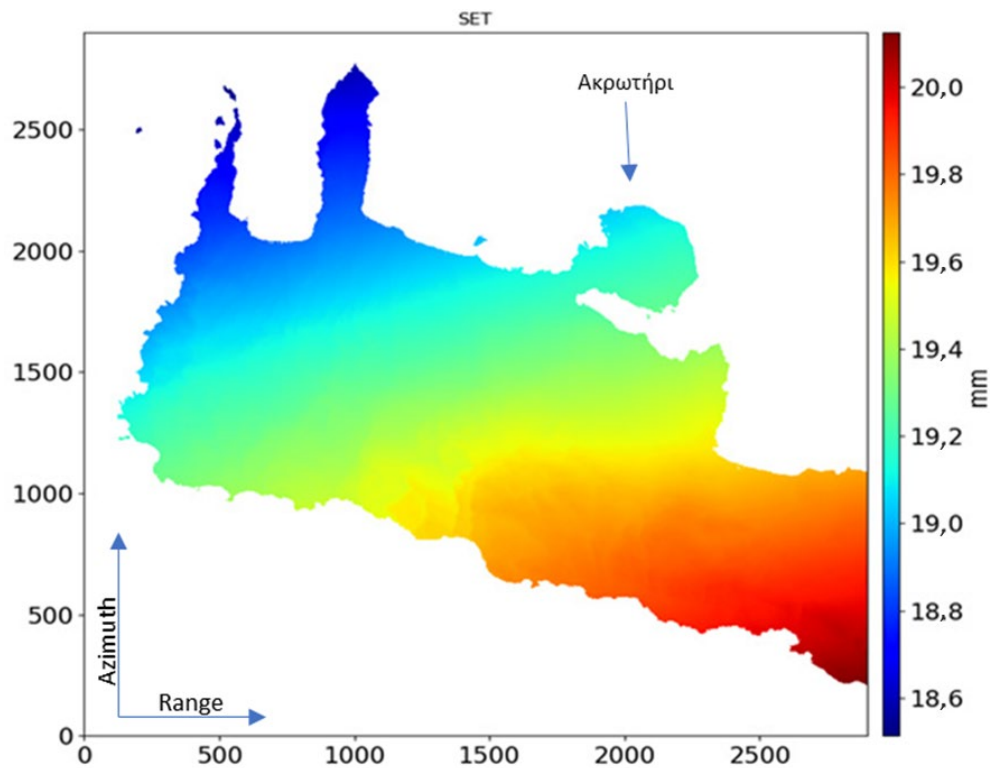
Αρχικά το πρόγραμμα PySolid υπολογίζει τις παλίρροιες SET_{LOS} για κάθε ημέρα και κάθε εικονοστοιχείο σε διεύθυνση East/North/Up (Σχήμα 6.14) και στη συνέχεια τα μετατρέπει σε γεωμετρία LOS (Line Of Sight) (Σχήμα 6.15) με την παρακάτω Εξίσωση (6.4), όπου θ γωνία πρόσπτωσης και β γωνία αζιμουθίου:

$$SET_{LOS} = -SET_{East}\sin(\theta)\sin(\beta) + SET_{North}\sin(\theta)\cos(\beta) + SET_{Up}\cos(\theta) \quad (6.4)$$

Η διόρθωση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές με μεγάλη εδαφική κάλυψη όπως στην παρούσα διότι όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.15 από δυτικά προς ανατολικά έχουμε μια διαφορά περίπου 2 mm, ενώ τοπικά σε κοντινές αποστάσεις, όπως για παράδειγμα στο Ακρωτήρι η διαφορά είναι περίπου 0,2 mm και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

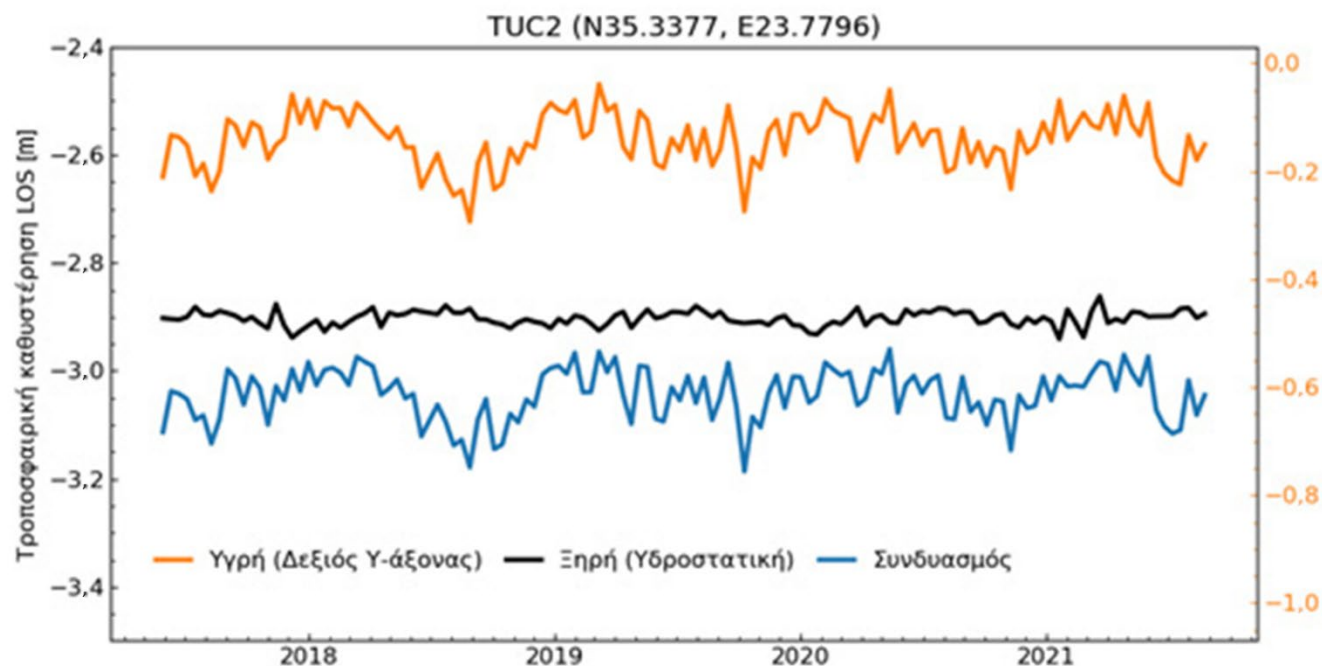


Σχήμα 6.14: Παλίρροιες στερεάς Γης για το μόνιμο σταθμό GPS TUC2.



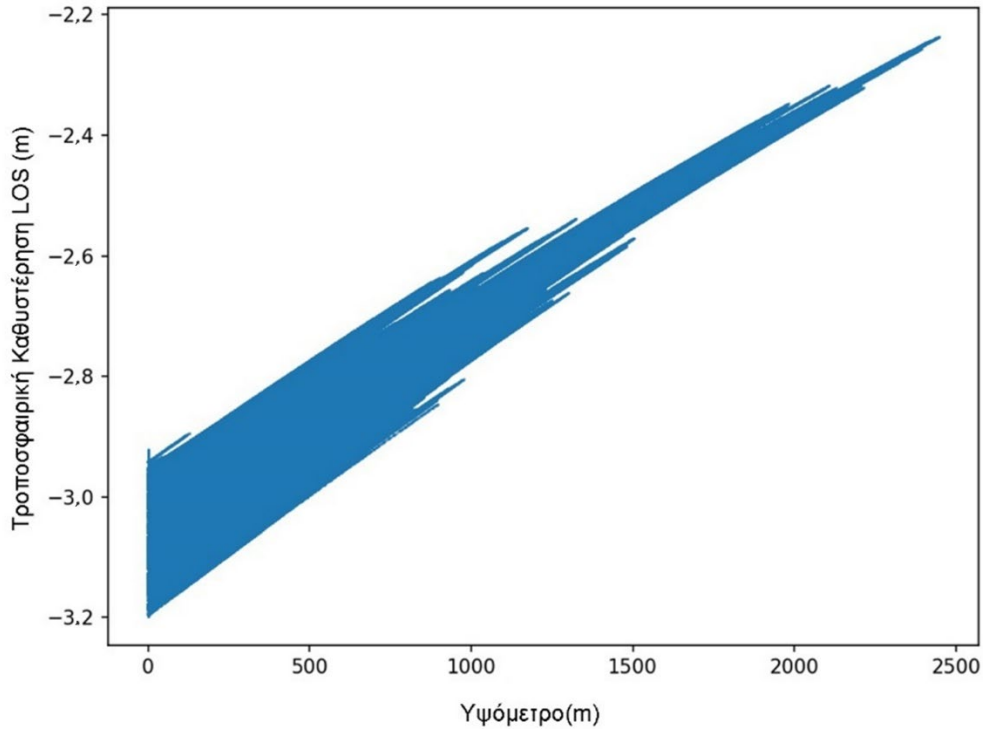
Σχήμα 6.15: Επίδραση από τις παλίρροιες στερεάς Γης σε γεωμετρία δορυφόρου LOS (25/03/2018).

Για τη διόρθωση της καθυστέρησης που προκαλεί η τροπόσφαιρα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα PyAPS (Jolivet et al., 2011, 2014, Yu et al., 2018, Zebker et al., 1997). Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί δεδομένα όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η πίεση από το παγκόσμιο ατμοσφαιρικό μοντέλο reanalysis ERA5 του Ευρωπαϊκού Κέντρου Προγνώσεων Μεσαίου Εύρους (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) για τον υπολογισμό της απόλυτης κατακόρυφης τροποσφαιρικής καθυστέρησης. Στη συνέχεια μετατρέπει την απόλυτη κατακόρυφη τροποσφαιρική καθυστέρηση σε γεωμετρία δορυφόρου LOS (Line Of Sight) με τη Εξίσωση (6.4). Η τροποσφαιρική καθυστέρηση χωρίζεται σε ξηρή και υγρή συνιστώσα. Η ξηρή συνιστώσα αποτελεί την κύρια πηγή καθυστέρησης ενώ η υγρή συνιστώσα δημιουργεί τις έντονες χρονικές διακυμάνσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.16.



Σχήμα 6.16: Χρονοσειρές απόλυτης τροποσφαιρικής καθυστέρησης σε γεωμετρία δορυφόρου LOS (Line Of Sight) για τον μόνιμο σταθμό GPS TUC2 με χρήση ERA5. Οι πορτοκαλί, μαύρη και μπλε γραμμές δείχνουν τη συνεισφορά της υγρής, ξηρής και του συνδυασμού των δύο αντίστοιχα.

Επιπλέον έγινε έλεγχος του τροποσφαιρικού μοντέλου ERA5 και εξετάστηκε αν εμφανίζεται συσχέτιση (Corellation) μεταξύ του υψομέτρου και της τροποσφαιρικής καθυστέρησης που υπολογίζει το μοντέλο. Αναμένεται λόγω του έντονου τοπογραφικού αναγλύφου του νομού και εξαιτίας του γεγονότος ότι τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην τροποσφαιρική καθυστέρηση την επιφέρει η ξηρή (υδροστατική) συνιστώσα (η οποία εξαρτάται από το υψόμετρο και την πίεση), να δούμε μια θετική συσχέτιση (Corellation) μεταξύ του υψομέτρου και της τροποσφαιρικής καθυστέρησης (Σχήμα 6.17).



Σχήμα 6.17: Συσχέτιση τροποσφαιρικής καθυστέρησης – υψομέτρου.

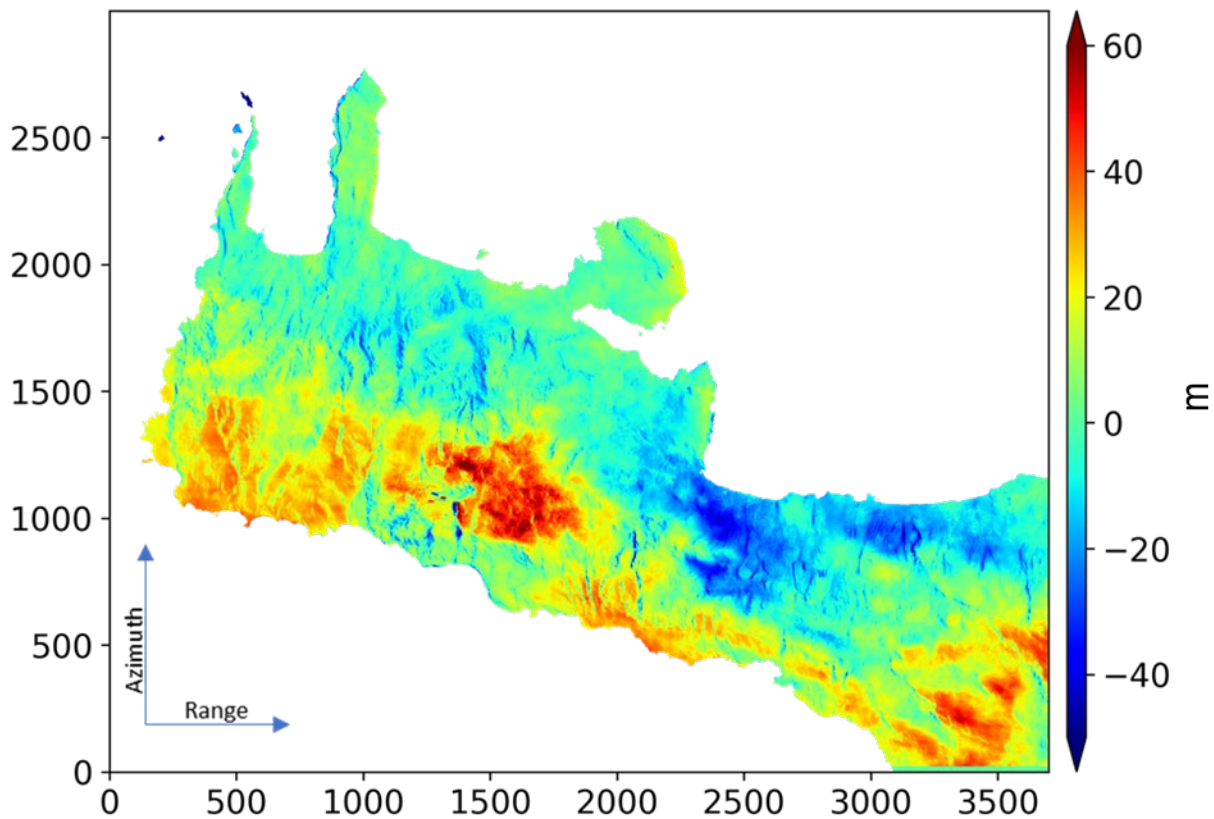
Η τελευταία διόρθωση που έγινε αφορούσε τα σφάλματα του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου DEM (Fattahi & Amelung, 2013). Η λογική της διόρθωσης βασίζεται στο γεγονός ότι ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αποτελεί εκτίμηση του τοπογραφικού αναγλύφου της Γης και εμπεριέχει σφάλματα. Στην τεχνική των υποσυνόλων μικρών βάσεων (SBAS) που χρησιμοποιήθηκε επιλέχθηκαν εικόνες SAR με μικρή κατακόρυφη βάση (B_{\perp}) ώστε να μειώνεται η επίδραση αυτών των σφαλμάτων στα συμβολογραφήματα. Ωστόσο δεν συμβαίνει το ίδιο στη χρονοσειρά μετατοπίσεων και τα σφάλματα του DEM εξαρτώνται από το συνολικό μήκος του δικτύου των συμβολογραφημάτων (και όχι από την κατακόρυφη γεωμετρική βάση των μεμονωμένων συμβολογραφημάτων).

Ο υπολογισμός του σφάλματος γίνεται με την πολυωνυμική συνάρτηση όπως φαίνεται στην Εξίσωση (6.3) (Yunjun et al., 2019).

$$\hat{\varphi}^i = \left(\frac{B_{\perp}^i}{r \sin(\theta)} Z_{\varepsilon} + \sum_{k=0}^{N_{poly}} C_k (t_i - t_l)^k \right) / \left(k! + \sum_{l \in I_s} s_l H(t_i - t_l) \right) \frac{-4\pi}{\lambda} + \varphi_{resid}^i \quad (6.3)$$

Το B_{\perp}^i είναι η κατακόρυφη βάση μεταξύ των χρονικών στιγμών t_i και t_l , r είναι η κεκλιμένη απόσταση μεταξύ του στόχου και της κεραίας του Radar, θ είναι η γωνία πρόσπτωσης, $H(t_i - t_l)$ είναι συνάρτηση Heaviside με κέντρο t_l και $\hat{\phi}^i$ η τιμή της υπολογισμένη συμβολομετρικής φάσης από την αντιστροφή των συμβολογραφημάτων. Τα Z_{ε} , C_k είναι άγνωστοι παράμετροι που μπορούν να υπολογιστούν την ελαχιστοποίηση της L^2 νόρμας της χρονοσειράς της υπόλοιπης φάσης και τέλος Z_{ε} είναι το σφάλμα του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου (Yunjun et al., 2019).

Στο Σχήμα 6.18 απεικονίζονται τα σφάλματα του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου χρησιμοποιώντας πολυώνυμο δευτέρου βαθμού και είναι εμφανές ότι εξαιτίας του έντονου τοπογραφικού αναγλύφου του νομού, στις περιοχές με έντονες αλλαγές υψομέτρου (κεντρικά και βόρεια) το μοντέλο φαίνεται να υποεκτιμά ενώ αντίθετα στις ορεινές περιοχές (νότια) να υπερεκτιμά το υψόμετρο.



Σχήμα 6.18: Εκτίμηση σφάλματος του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου σε γεωμετρία δορυφόρου.

Έχοντας ολοκληρώσει όλες τις διορθώσεις στο χώρο των συμβολογραφημάτων και στο χώρο των χρονοσειρών είναι σημαντικό να ελεγχθεί η ποιότητάς τους. Συγκεκριμένα θεωρείται πως η

υπολειπόμενη συμβολομετρική φάση μετά τις διορθώσεις μπορεί να εμπεριέχει ακόμα τροποσφαιρικά επιδράσεις, θόρυβο λόγω αποσυσχέτισης (Decorrelation) ή ιονοσφαιρικές επιδράσεις. Για το λόγο αυτό το πρόγραμμα, θεωρώντας ότι η υπολοιπόμενη φάση είναι στοχαστική και ακολουθεί την κανονική κατανομή στο χρόνο, με μέση τιμή μηδέν (Fattahi & Amelung, 2015). Έτσι, υπολογίζει τη διάμεση απόλυτη απόκλιση (Median Absolute Deviation, MAD) (Εξίσωση 6.3), ενώ θεωρεί πως μια ημέρα εμπεριέχει θόρυβο αν η μέση τετραγωνική τιμή της φάσης, είναι μεγαλύτερη από το τριπλάσιο της διάμεσης απόλυτης απόκλισης ($3 * MAD$) με διάστημα εμπιστοσύνης 99,7% (Rousseeuw & Hubert 2011).

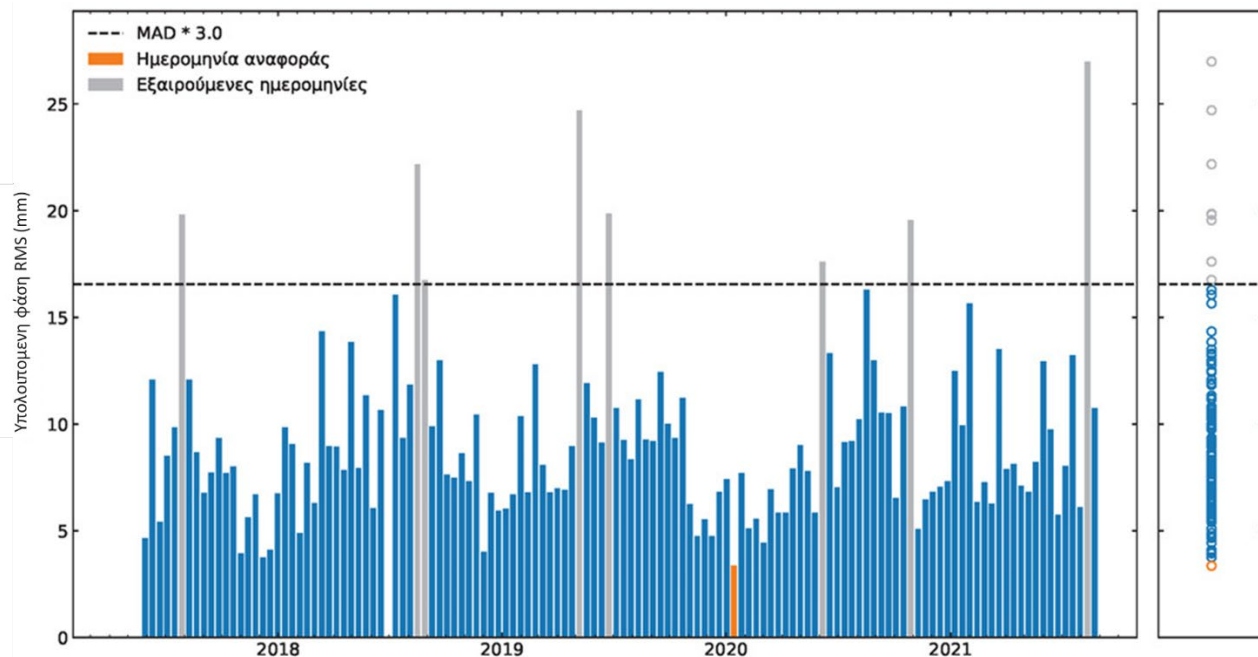
$$MAD = 1,483|x_i - median(x_i)| \quad (6.4)$$

Στην Εξίσωση (6.4) το 1,483 είναι παράγοντας διόρθωσης που κάνει τη MAD αμερόληπτη όταν τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή, x_i είναι η υπολοιπόμενη φάση κάθε ημέρας και $median(x_i)$ η διάμεσος τιμή την υπολοιπόμενη φάση κάθε ημέρας (Rousseeuw & Hubert 2011).

Για τον υπολογισμό του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square, RMS) της υπολοιπόμενης φάσης για κάθε ημέρα χρησιμοποιήθηκε η Εξίσωση (6.5) (Yunjun et al., 2019):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N_{\Omega}} \sum_{\rho \in \Omega} \left(\hat{\phi}_{resid}^i(\rho) \cdot \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2}, \quad (6.5)$$

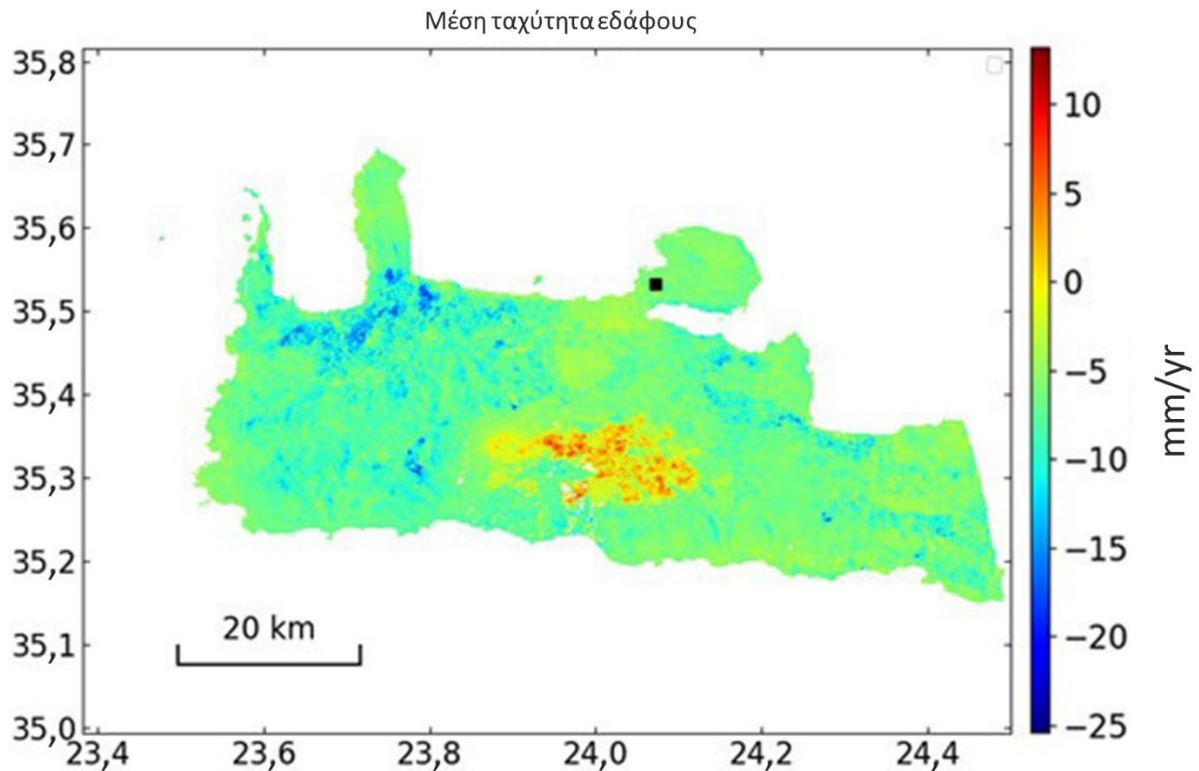
όπου το $i = [1, \dots, N]$, $\hat{\phi}_{resid}^i(\rho)$ αντιπροσωπεύει την υπολοιπόμενη φάση τη χρονική στιγμή i για το εικονοστοιχείο ρ , N_{Ω} είναι το πλήθος των εικονοστοιχείων και Ω το πλήθος των αξιόπιστων εικονοστοιχείων σύμφωνα με το κρίσιμο όριο το οποίο τέθηκε για την διαχρονική συνάφεια κατά την αντιστροφή του δικτύου των συμβολογραφημάτων (Yunjun et al., 2019).



Σχήμα 6.19: Αναγνώριση ημερομηνιών με θόρυβο.

Από το Σχήμα 6.19 προκύπτει πως οι ημερομηνίες 20170728, 20180816, 20190507, 20190624, 20200817, 20201028, 20210201, 20210812 περιέχουν θόρυβο. Λόγω του ότι ο συγκεκριμένος θόρυβος δεν ήταν δυνατό να μοντελοποιηθεί και να αφαιρεθεί, αποφασίστηκε οι συγκεκριμένες ημερομηνίες να μην χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας του εδάφους. Η ημερομηνία 20200114 η οποία έχει τον λιγότερο θόρυβο επιλέχθηκε ως ημερομηνία αναφοράς για τις χρονοσειρές εφόσον δεν επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα (καθώς είναι το ίδιο με το να προσθέταμε μια σταθερά).

Στο τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας μετά την αφαίρεση των κύριων πηγών σφαλμάτων και αποσυσχέτισης (Decorrelation) έγινε ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας του εδάφους της υπό εξέτασης περιοχής. Από το Σχήμα 6.20 βλέπουμε πως γενικά στον νομό δεν φαίνεται να υπάρχουν έντονες μετατοπίσεις εκτός από τις θετικές ταχύτητες στα ορεινά του νομού, στα Λευκά Όρη, και τις αρνητικές ταχύτητες που εμφανίζονται κυρίως στα βορειοδυτικά.



Σχήμα 6.20: Μέση ταχύτητα του εδάφους στο νομό Χανίων.

6.3 Αποτελέσματα – Σύγκριση DInSAR με GPS

Για να ελεγχθούν τα αποτελέσματα της επεξεργασίας και των διορθώσεων έγινε σύγκριση με μετρήσεις από τους πέντε μόνιμους σταθμούς GPS που διατηρεί το Εργαστήριο Γεωδαισίας και Πληροφορικής των Γεωεπιστημών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν οι ταχύτητες των σταθμών σε διευθύνσεις East/North/Up (Πίνακας 7), στη συνέχεια με χρήση της Εξίσωσης (6.4) και των γωνιών αζιμουθίου και παρατήρησης, οι ταχύτητες μετατράπηκαν για κάθε σταθμό σε γεωμετρία δορυφόρου LOS (Line Of Sight) (Πίνακας 8).

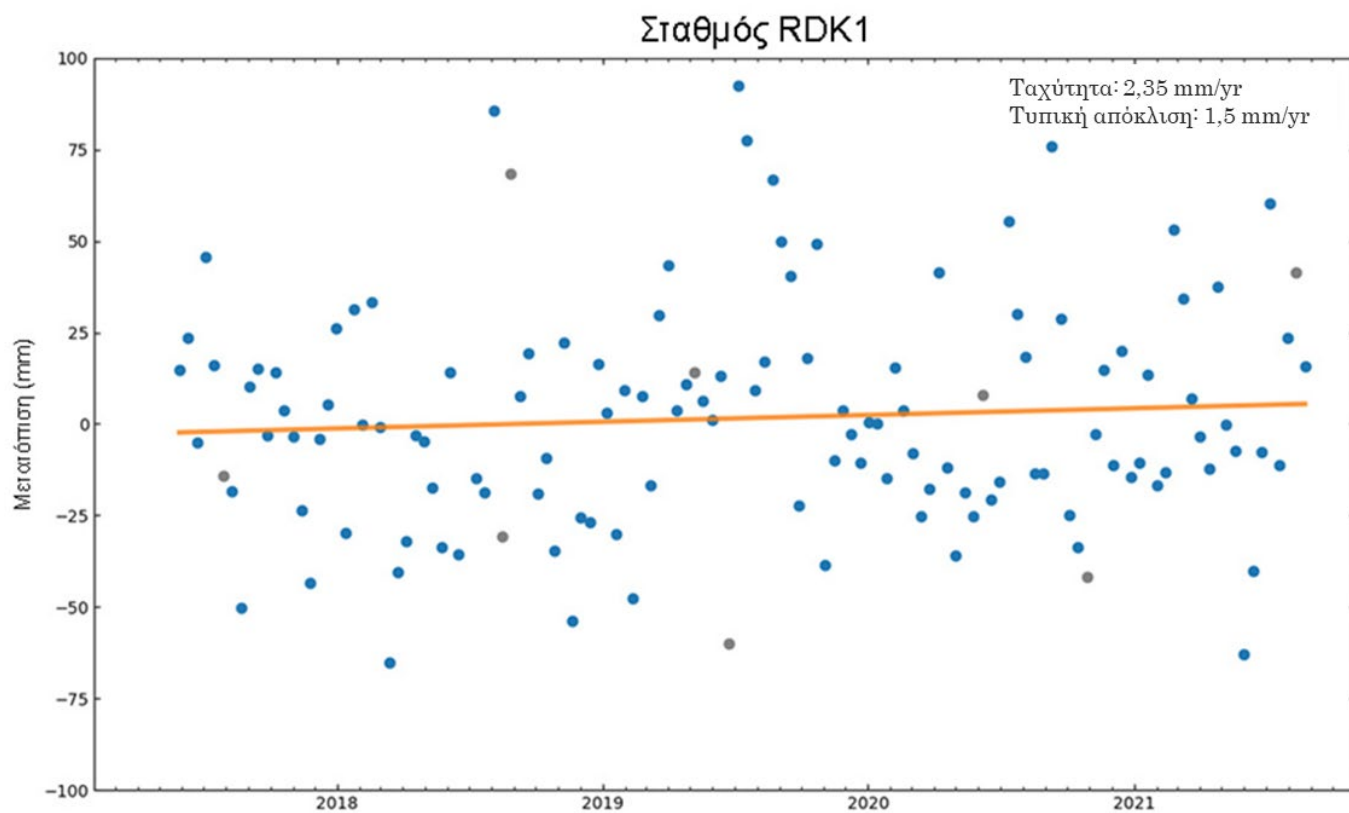
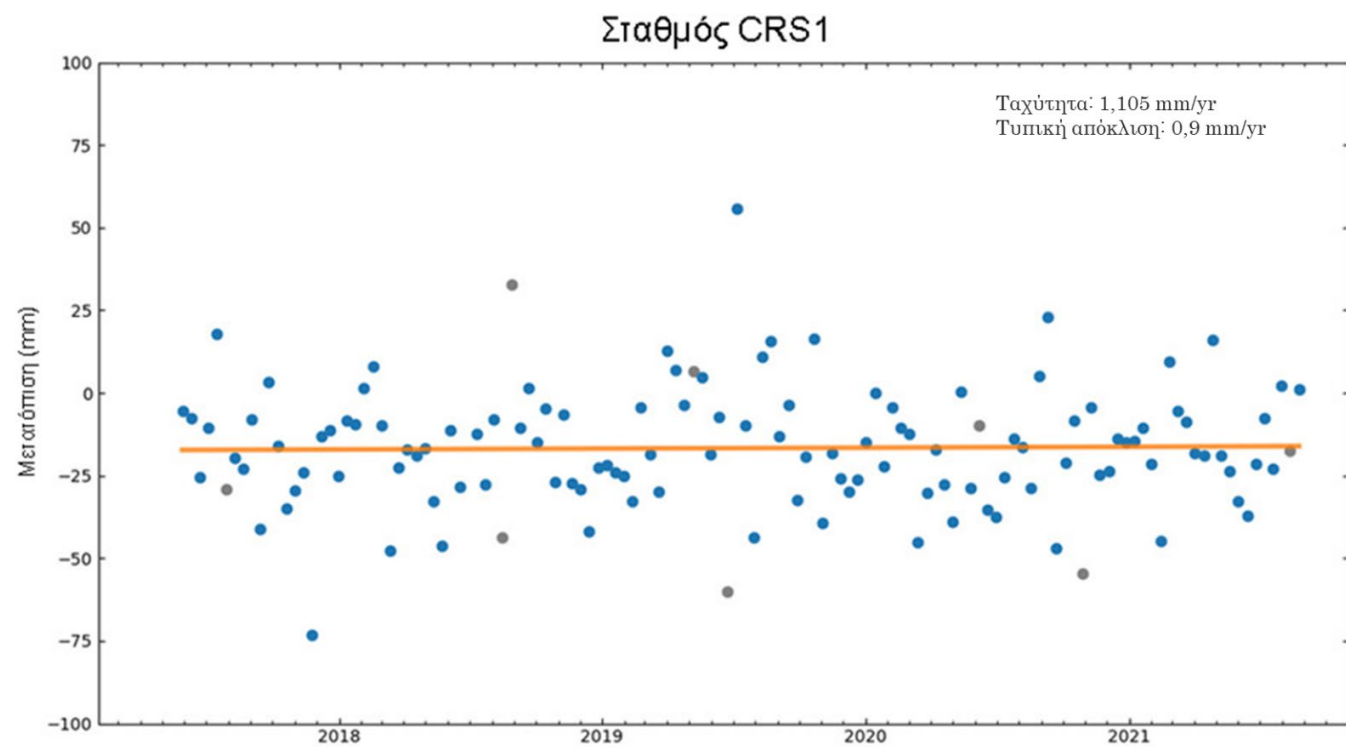
Πίνακας 7: Ταχύτητα εδάφους από μετρήσεις των σταθμών GPS στο νομό Χανίων.

Σταθμός GPS	Vn (m/yr)	Ve (m/yr)	Vu (m/yr)
CDN0	-0,0127	0,0076	-0,0007
MEN2	-0,0131	0,0065	-0,0015
TUC2	-0,0124	0,0071	-0,0009
CRS1	-0,0122	0,0068	-0,0009
RDK1	-0,0127	0,0079	0,0002

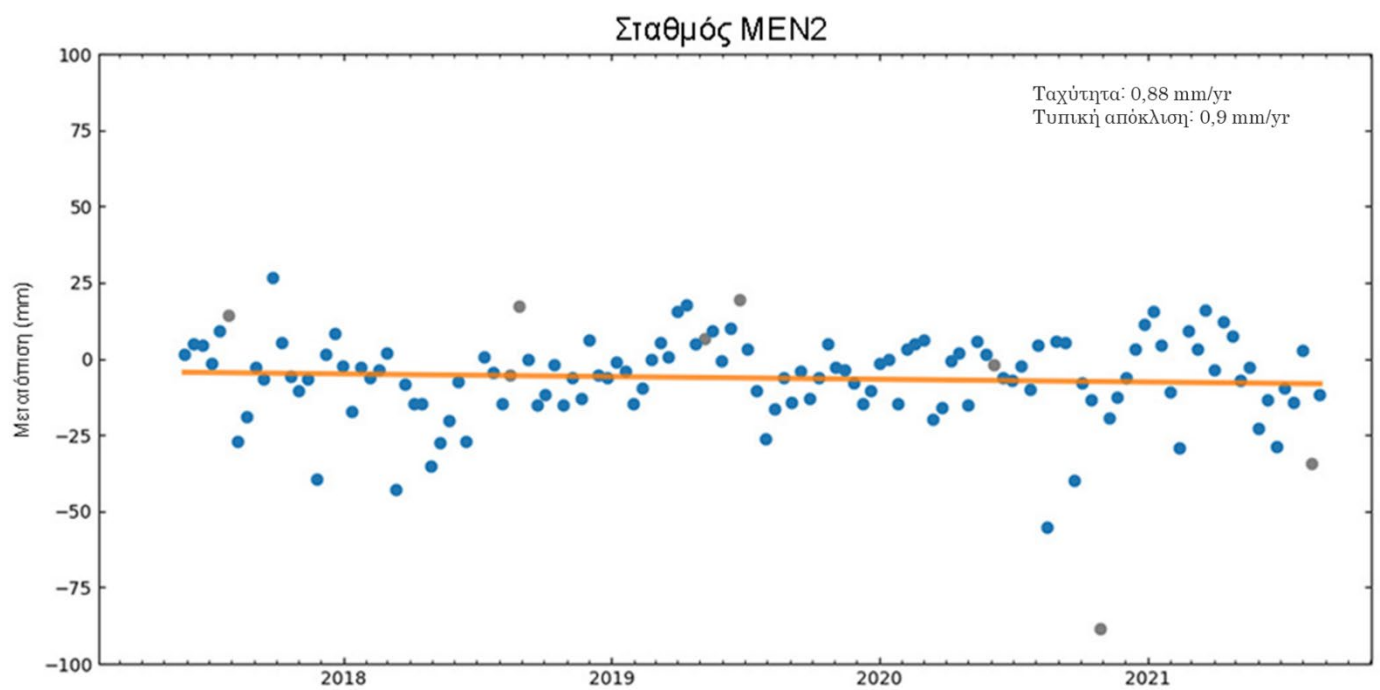
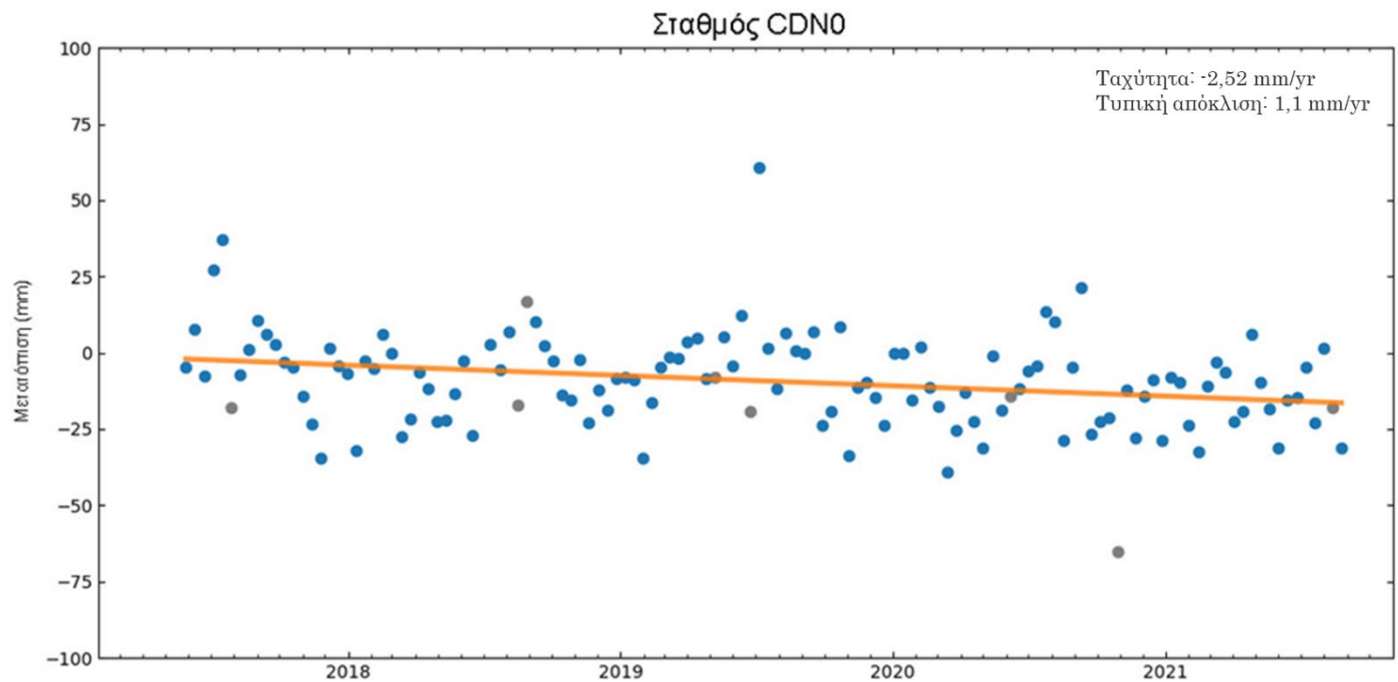
Πίνακας 8: Ταχύτητα εδάφους από μετρήσεις των σταθμών GPS σε γεωμετρία δορυφόρου LOS.

Σταθμός GPS	Ταχύτητα LOS (mm/yr)
CDN0	-3,66
MEN2	-3,62
TUC2	-3,69
CRS1	-3,30
RDK1	-3,37

Έπειτα από την επεξεργασία με την μέθοδο κατανεμημένων σκεδαστών, υποσύνολα μικρών βάσεων (SBAS), έγινε ο υπολογισμός των χρονοσειρών των μετατοπίσεων για τους σταθμούς GPS με σημείο αναφοράς τον μόνιμο σταθμό GPS TUC2. Παράλληλα υπολογίστηκε η μέση ταχύτητα τους σε γεωμετρία δορυφόρου LOS θεωρώντας ότι αυτή ακολουθεί γραμμικό μοντέλο (Σχήμα 6.21 και Σχήμα 6.22).



Σχήμα 6.21: Χρονοσειρές μετατοπίσεων των σταθμών CRS1 και RDK1.



Σχήμα 6.22: Χρονοσειρές μετατοπίσεων των σταθμών CDN0 και MEN2.

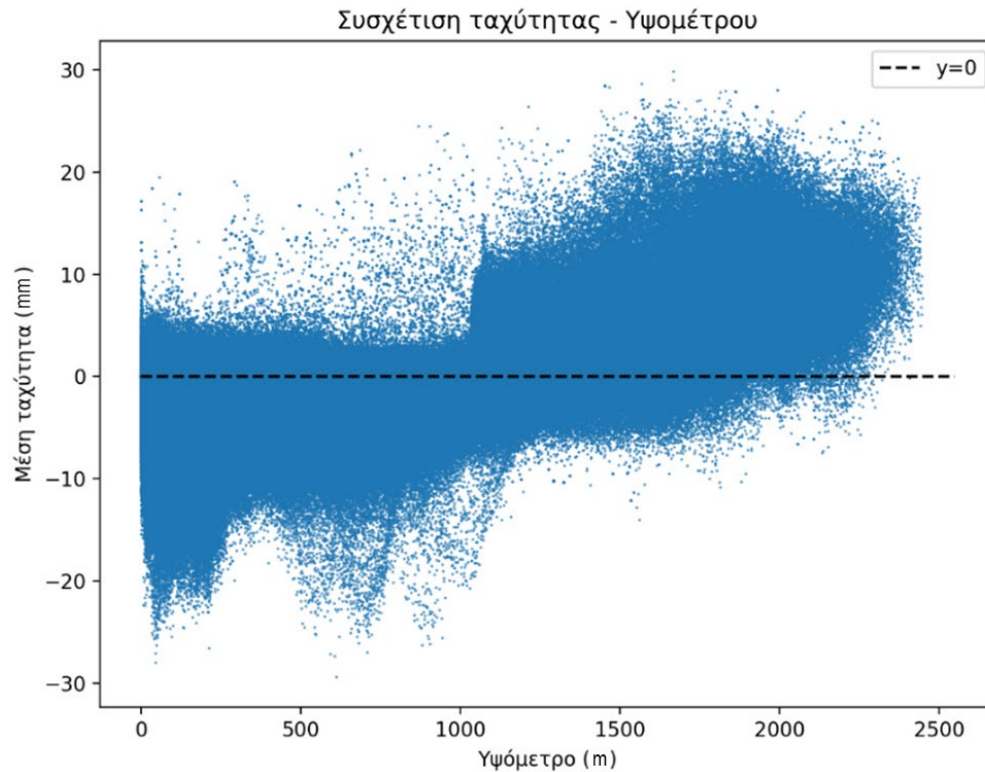
Στο επόμενο στάδιο, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων και υπολογίστηκε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Πίνακας 9).

Πίνακας 3: Σύγκριση ταχυτήτων του εδάφους σε γεωμετρία LOS GPS με DInSAR και υπολογισμός μέσου τετραγωνικού σφάλματος.

Σταθμός GPS	Ταχύτητα GPS LOS (mm/yr)	Ταχύτητα DInSAR LOS (mm/yr)	Διαφορά (mm/yr)	Μέσο τετραγωνικό σφάλμα ταχυτήτων RMSE (mm/yr)
CDN0	0,03	-2,52	-2,55	1,54
MEN2	0,07	0,88	0,81	
TUC2	0,00	0,00	0,00	
CRS1	0,39	1,11	0,72	
RDK1	0,32	2,35	2,03	

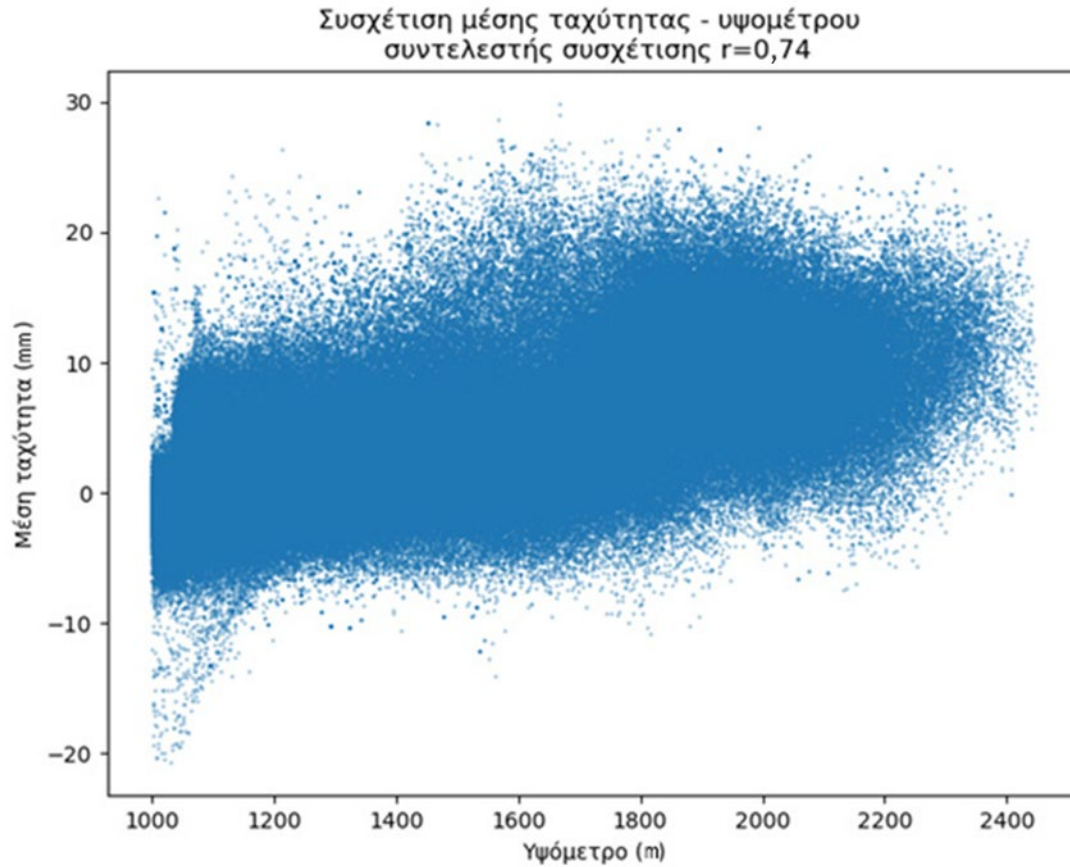
Από τη σύγκριση των δύο μεθόδων, διαπιστώθηκε πως το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ήταν αρκετά μικρό, της τάξης των 1,54 mm/yr, γεγονός το οποίο υποδηλώνει την ποιότητα της επεξεργασίας και των διορθώσεων.

Τέλος έγινε σύγκριση της μέσης ταχύτητας που προέκυψε (Σχήμα 6.20) από την επεξεργασία και τις διορθώσεις σε σχέση με το υψόμετρο όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.23.



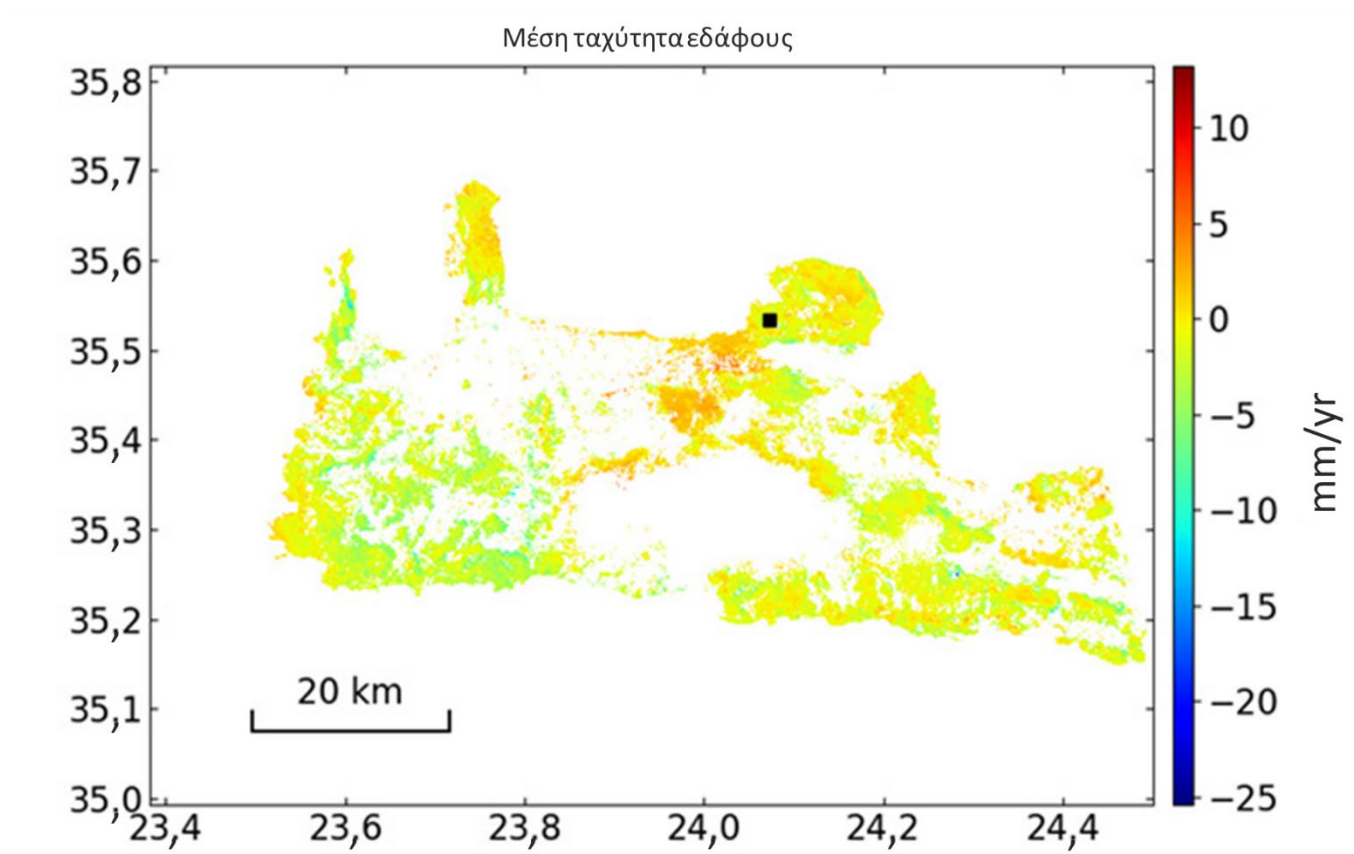
Σχήμα 6.23: Σύγκριση μέσης ταχύτητας εδάφους – υψομέτρου.

Στο Σχήμα 6.23 υπάρχει υψηλή συσχέτιση (Corellation) για σημεία τα οποία βρίσκονται σε υψόμετρο μεγαλύτερο των 1000 m, γεγονός που πιθανότατα οφείλεται σε σφάλματα του τροποσφαιρικού μοντέλου. Στο Σχήμα 6.24 φαίνεται καλύτερα η σχέση αυτή καθώς ο συντελεστής συσχέτισης (Corellation) κατά Pearson (Freedman et al., 2007) παίρνει τιμή +0,74 και επιβεβαιώνει αυτή την ισχυρή θετική συσχέτιση (Corellation).



Σχήμα 6.24: Σύγκριση μέσης ταχύτητας εδάφους με υψόμετρο άνω των 1000 m.

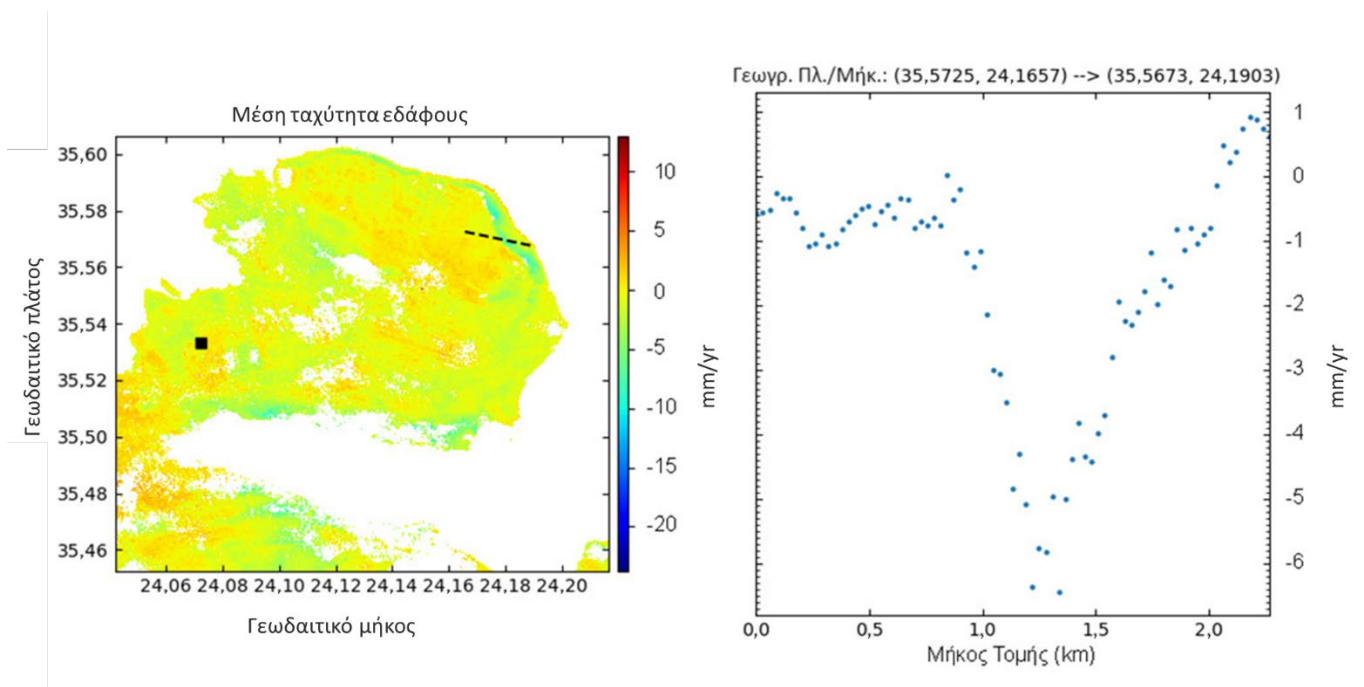
Για την απομάκρυνση των εικονοστοιχείων που παρουσιάζουν αυτή τη συμπεριφορά χρησιμοποιήθηκε μάσκα η οποία βασίζεται στη διαχρονική συνάφεια (Σχήμα 6.13). Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα εικονοστοιχεία που εμφανίζουν διαχρονική συνάφεια μεγαλύτερη από 0,9. Μετά την χρήση της μάσκας έχουμε τον τελικό χάρτη μέσης ταχύτητας, ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.25.



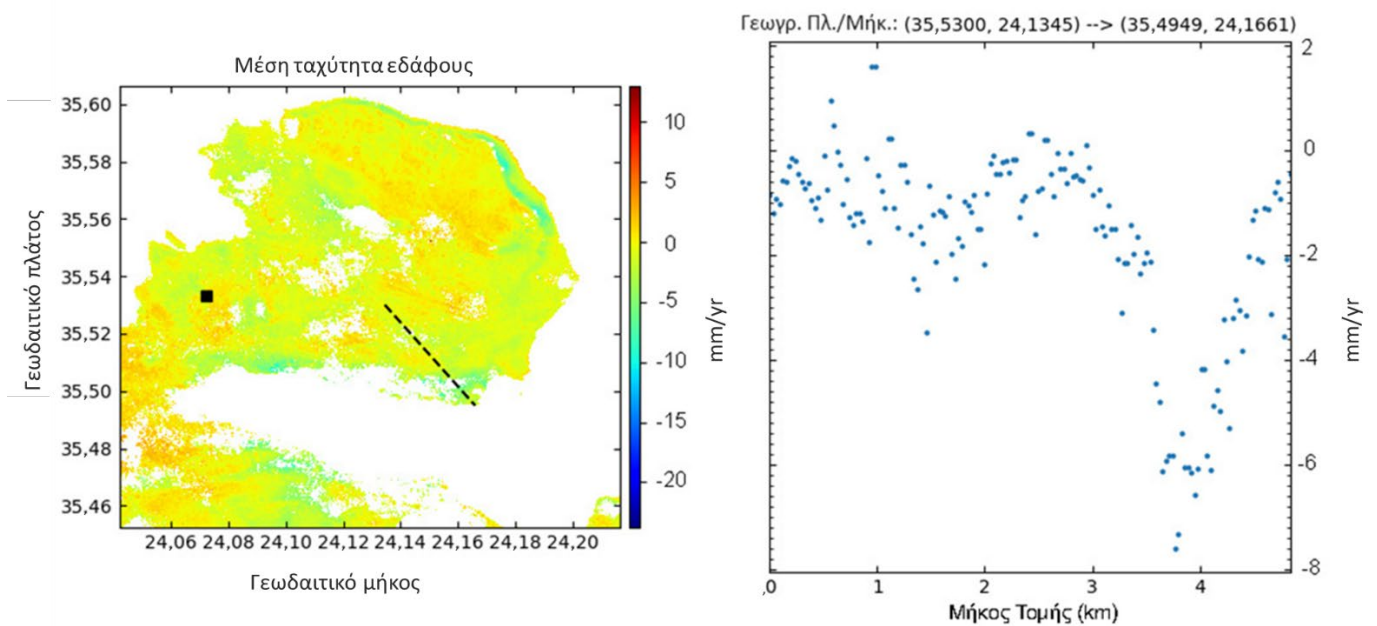
Σχήμα 6.25: Μέση ταχύτητα μετά από διορθώσεις και αφαίρεση συσχέτισης με υψόμετρο.

Η περιοχή μελέτης είναι εκτενής και συνεπώς εντοπίστηκαν μεμονωμένες περιοχές που εμφανίζουν εδαφικές παραμορφώσεις για περαιτέρω ανάλυση. Για κάθε περιοχή δημιουργήθηκε τομή στην οποία παρουσιάζεται η μέση ταχύτητα μετακίνησης.

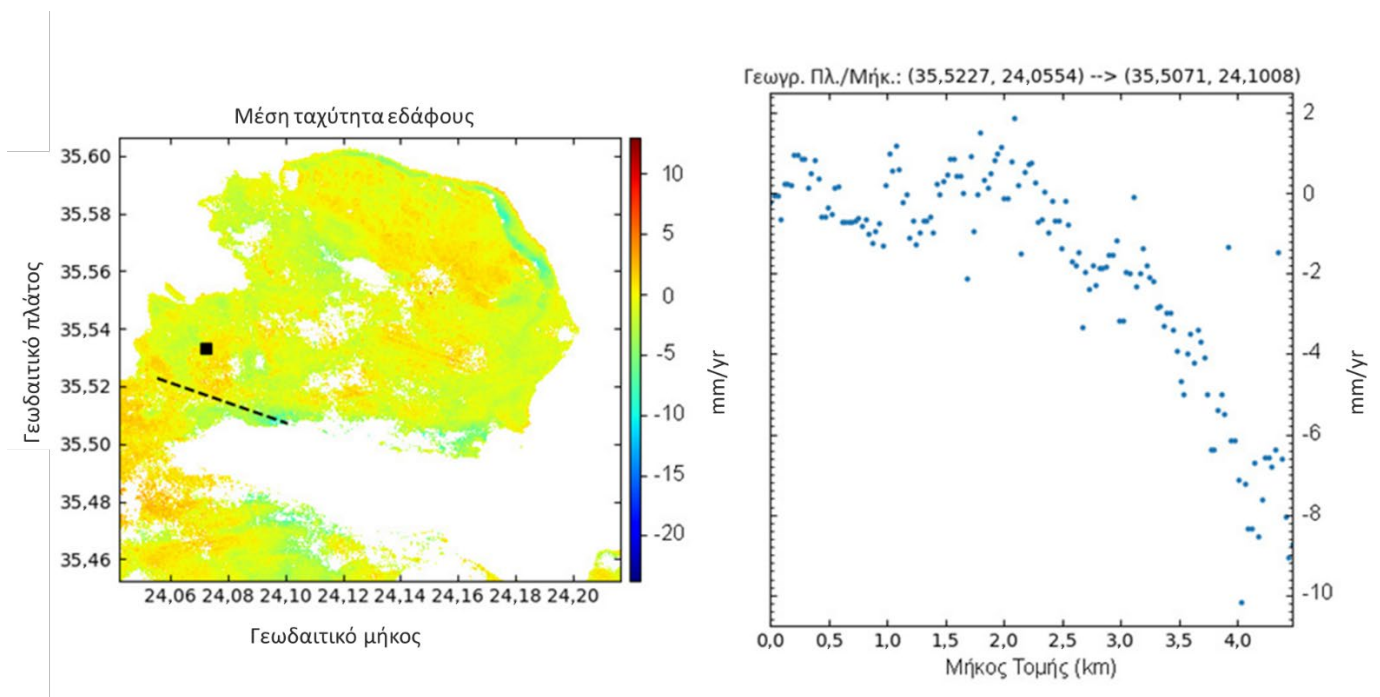
Αρχικά στην περιοχή Ακρωτήρι εντοπίζονται τρεις περιοχές, η μία στα βορειοανατολικά (Σχήμα 6.26) σε μη κατοικημένη περιοχή με την πλαγιά του βουνού να κινείται με ταχύτητα 7 mm/yr, η επόμενη είναι στα νότια κοντά στο Λουτράκι (Σχήμα 6.27) η οποία κινείται με μέση ταχύτητα 8 mm/yr και η τελευταία λίγο πιο δυτικά από την προηγούμενη κοντά στις Κορακιές (Σχήμα 6.28) η οποία κινείται με μέση ταχύτητα 9 mm/yr. Στην περιοχή της Σούδας παρατηρήθηκε επιφανειακή μετακίνηση σε τμήμα του BOAK (Σχήμα 6.29). Η περιοχή κινείται με μέση ταχύτητα περίπου 9 mm/yr και είναι γνωστή για τις κατολισθήσεις που λαμβάνουν χώρα σε αυτή.



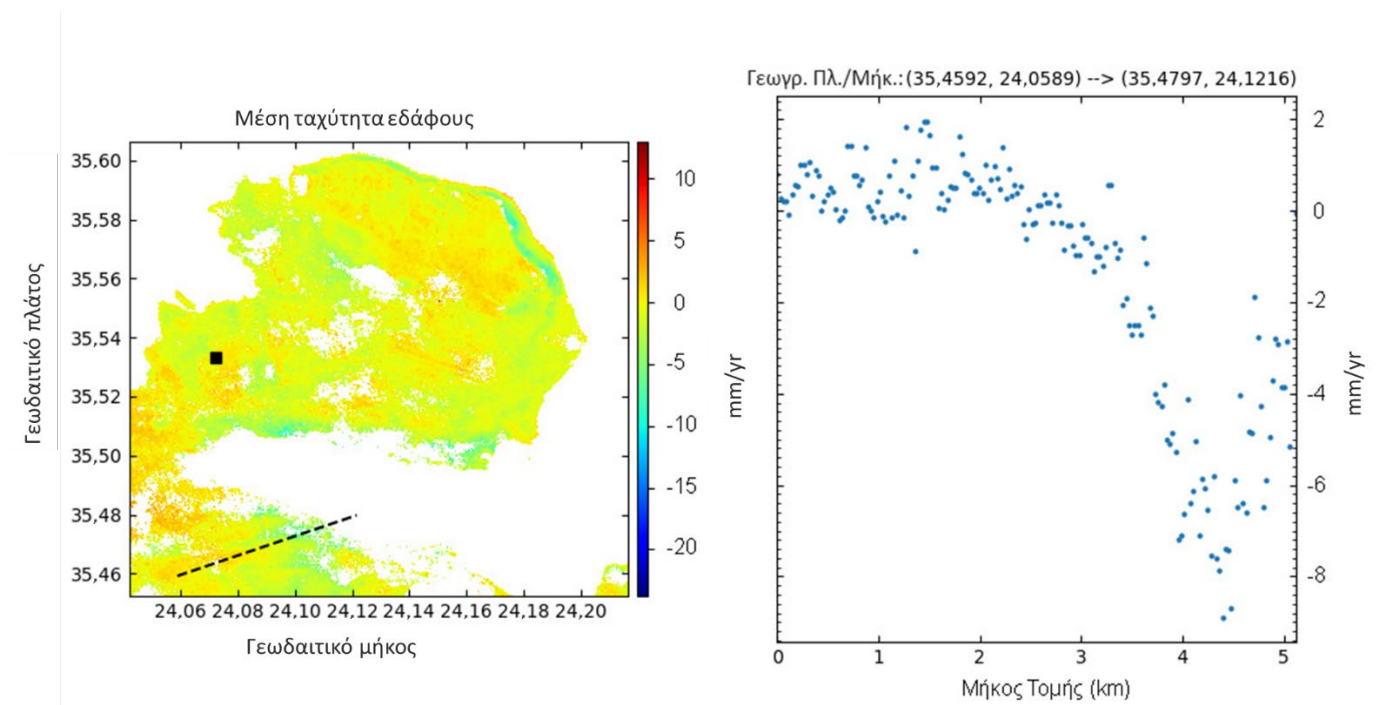
Σχήμα 6.26: Επιφανειακή μετακίνηση στην περιοχή Ακρωτήρι θόρεια από το Χωρδάκι



Σχήμα 6.27: Επιφανειακή μετακίνηση κοντά στο Λουτράκι Χανίων.

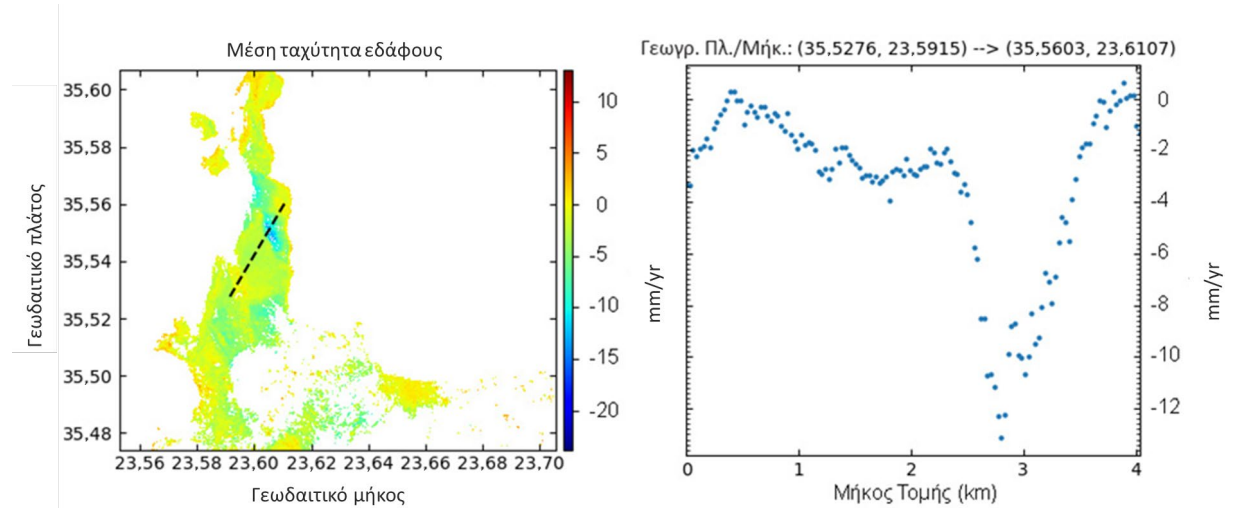


Σχήμα 6.28: Επιφανειακή μετακίνηση νότια από τις Κορακιές Χανίων.



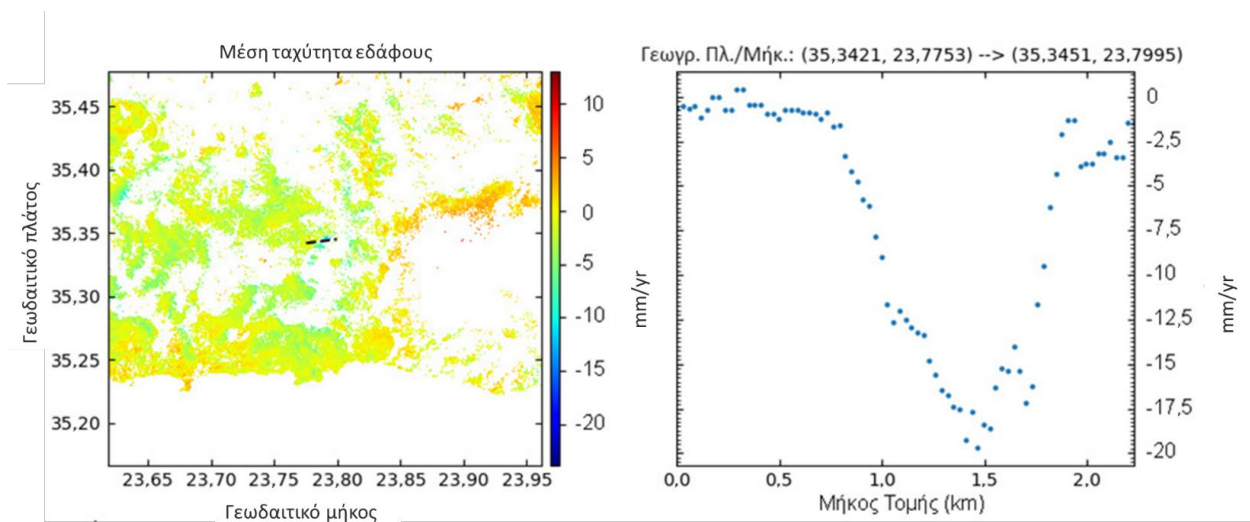
Σχήμα 6.29: Επιφανειακή μετακίνηση σε τμήμα του BOAK κοντά στη Σούδα Χανίων.

Παραμορφώσεις εντοπίστηκαν στη χερσόνησο της Γραμβούσας (Σχήμα 6.30), ήτοι στην ανατολική πλευρά του βουνού, η οποία φαίνεται να κινείται με περίπου 12 mm/yr.

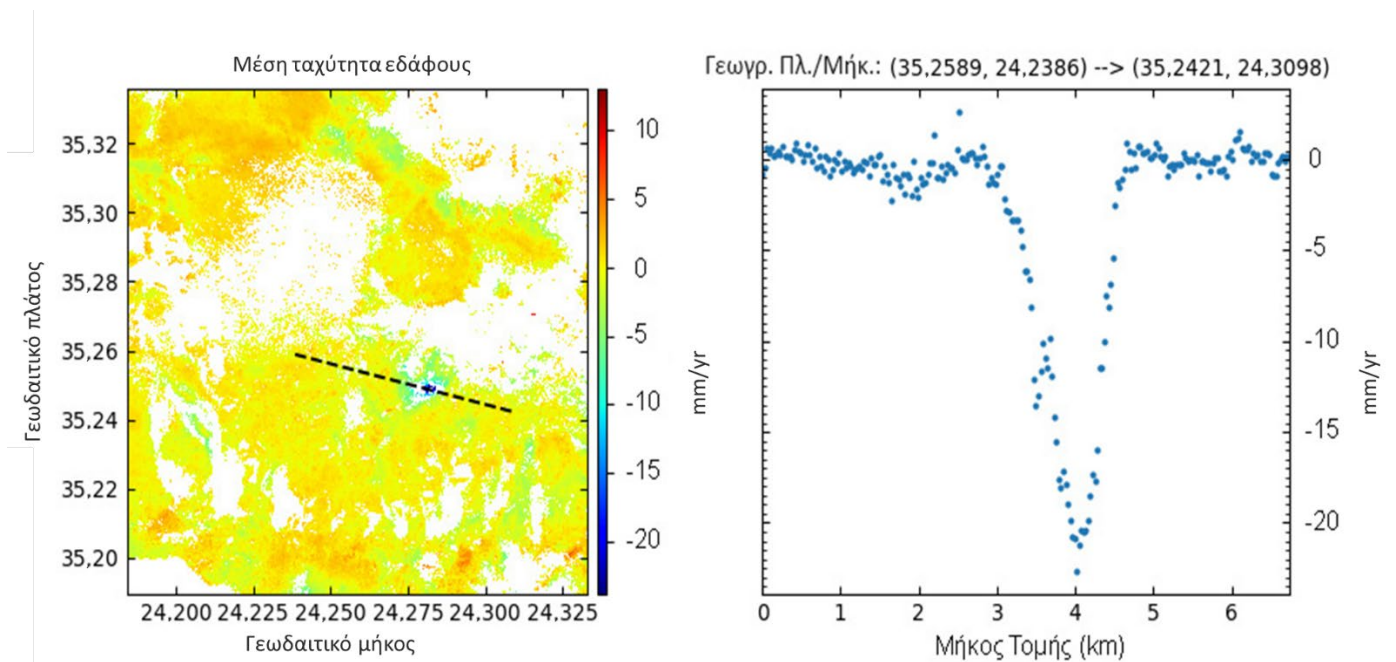


Σχήμα 6.30: Μετακίνηση πλαγίας στη Χερσόνησο Γραμβούσας.

Μια ακόμα ορεινή περιοχή στην οποία εντοπίστηκε ότι υπάρχει εδαφική μετακίνηση είναι στην Κάντανο βορειοανατολικά από το χωριό Λόφος (Σχήμα 6.31) όπου σημειώθηκε μέση ταχύτητα 17 mm/yr. Η τελευταία τοποθεσία είναι κοντά στα σύνορα του Δήμου Σφακίων, στα βορειοδυτικά του χωριού Καλλικράτης (Σχήμα 6.32), αποτελεί πλαγιά βουνού και η μέση ταχύτητα της υπολογίζεται της τάξης των 20 mm/yr.



Σχήμα 6.31: Μέση ταχύτητα εδαφικής μετακίνησης στο Δήμο Καντάνου.



Σχήμα 6.32: Μέση ταχύτητα εδαφικής μετακίνησης στα βορειοδυτικά του χωριού Καλλικράτης.

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, πραγματοποιήθηκε ο εντοπισμός και η παρακολούθηση των παραμορφώσεων μεγάλης κλίμακας του εδάφους στο Νομό Χανίων της Κρήτης, με τη χρήση διαχρονικών τεχνικών διαφορικής συμβολομετρίας (Multitemporal DInSAR),

Αναλύθηκαν δορυφορικές εικόνες των δορυφόρων Sentinel-1, λόγω των πλεονεκτημάτων που διαθέτουν, όπως η υψηλή συχνότητα επαναδιέλευσης, η μεγάλη εδαφική κάλυψη και η υψηλή διακριτική ικανότητα. Τα συγκεκριμένα πλεονεκτήματα των Sentinel-1, προσφέρουν τη δυνατότητα να προσδιοριστούν εδαφικές παραμορφώσεις, με ακρίβεια της τάξης του χιλιοστού, μεγάλων εκτάσεων γης με χαμηλό κόστος.

Από την παρούσα μελέτη αναδείχθηκε επίσης ότι η μέθοδος της συμβολομετρίας μπορεί να συνδυαστεί με τις συμβατικές τεχνικές παρακολούθησης των εδαφικών μετακινήσεων όπως για παράδειγμα το GNSS και να παράξουν αξιόπιστα συμπεράσματα. Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις των μόνιμων σταθμών GPS δεδομένου ότι διαθέτουν υψηλή σημειακή ακρίβεια. Με το συνδυασμό των δύο τεχνικών αξιοποιούνται τα πλεονεκτήματα κάθε τεχνικής. Οι εικόνες SAR παρέχουν μεγάλη εδαφική κάλυψη, υψηλής ακρίβειας μετρήσεις και χαμηλό κόστος λόγω ανοικτών δεδομένων. Τα GPS παρέχουν υψηλή ακρίβεια της τάξης του χιλιοστού και υψηλή συχνότητα μετρήσεων.

Έγινε χρήση των προγραμμάτων ανοικτού κώδικα, stacksentinel, gdal, MintPy, PySolid και PyAPS και αφαιρέθηκαν οι κύριες πηγές θορύβου που επηρεάζουν την συμβολομετρική φάση.

Κατά την επεξεργασία των εικόνων και τη δημιουργία των συμβολογραφημάτων διαπιστώθηκε υψηλή αποσυσχέτιση (Decorrelation) λόγω της έντονης βλάστησης της περιοχής η οποία προκάλεσε αρκετά σφάλματα κατά τον προσδιορισμό της απόλυτης συμβολομετρικής φάσης.

Ακόμα, από το Σχήμα 6.23 φαίνεται πως υπάρχει μια ισχυρή θετική συσχέτιση (Corellation) μεταξύ μέσης ταχύτητας και υψομέτρου η οποία απομακρύνθηκε και δεν διορθώθηκε με χρήση μάσκας επιλέγοντας εικονοστοιχεία με διαχρονική συνάφεια άνω του 0,9. Η κύρια αιτία θεωρείται πως είναι το ατμοσφαιρικό μοντέλο και πιο συγκεκριμένα η υγρή συνιστώσα του, η οποία όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.16 έχει έντονες χρονικές μεταβολές, διότι λόγω της έντονης τοπογραφίας του νομού, πιθανότατα εγκλωβίζεται υγρασία την οποία να μην μπορεί να προβλέψει το ατμοσφαιρικό μοντέλο.

Μεγάλη πρόκληση για την επεξεργασία αποτέλεσε ο μεγάλος όγκος των δεδομένων, για τα οποία χρειάστηκε αποθηκευτικός χώρος άνω των 3 TB (Terabyte). Για το λόγο αυτό, δεν

χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την κατιούσα τροχιά των δορυφόρων Sentinel-1 ώστε να μπορεί να γίνει ανάλυση της μέσης ταχύτητας LOS, σε ταχύτητες north/east/up και έπειτα να συγκριθεί με τις αντίστοιχες του GPS. Ωστόσο έγινε μετατροπή των ταχυτήτων north/east/up του GPS στη γεωμετρία του δορυφόρου LOS.

Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας, ο χάρτης μέσης ταχύτητας εδάφους, που προέκυψε από την επεξεργασία και διόρθωση 630 συμβολογραφημάτων ελέγχθηκε ως προς την ακρίβεια του, με δεδομένα από τους μόνιμους σταθμούς GPS του Εργαστηρίου Γεωδαισίας και Πληροφορικής των Γεωεπιστημών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Από την σύγκριση, αναδείχτηκε η υψηλή ακρίβεια της επιλεγμένης μεθόδου, καθώς το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ήταν της τάξης των 1,54 mm/yr.

Τέλος, εντοπίστηκαν 7 περιοχές που παρουσιάζουν επιφανειακές παραμορφώσεις κυρίως στα ορεινά. Οι εν λόγω περιοχές παρουσιάζουν εντοπισμένες μετακινήσεις σε LOS οι οποίες ανήκουν στο εύρος των 7 - 20 mm/yr και βρίσκονται στο νότιο και βορειοανατολικό Ακρωτήριο, στη Σούδα Χανίων, κοντά στη χώρα Σφακίων και στην Κάντανο. Μάλιστα μία από τις περιοχές αυτές είναι γνωστή για κατολισθήσεις και έχουν τοποθετηθεί συρματοπλέγματα για την συγκράτηση βράχων. Ως κύρια αιτία των προαναφερθέντων παραμορφώσεων λόγω της τοπογραφίας των περιοχών, πρόκειται για περιοχές σε πλαγιές βουνών, θεωρείται η επιφανειακή μετατόπιση εδάφους.

Προκειμένου να ξεπεραστούν οι δυσκολίες που αναφέρθηκαν πιο πάνω και να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο η εκτίμηση της μέσης ταχύτητας προτείνεται η δημιουργία συμβολογραφημάτων με περισσότερες συνδέσεις. Όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί που μπορεί να προκύψουν μεταξύ των εικόνων SAR είναι, $8286 [(N*(N-1))/2]$ ή $129*(129-1)/2$ συμβολογραφήματα.

Στην παρούσα διατριβή όπως παρουσιάστηκε, χρησιμοποιήθηκαν 129 εικόνες ενώ πραγματοποιήθηκαν πέντε συνδέσεις (συνδυασμοί μεταξύ των εικόνων) και αυτό για να είναι εύκολα διαχειρίσιμος ο μεγάλος όγκος δεδομένων.

Ωστόσο οι περισσότερες συνδέσεις θα επιτρέψουν να μειωθούν σε μεγαλύτερο βαθμό τα σφάλματα κατά τον προσδιορισμό της απόλυτης συμβολομετρικής φάσης, μιας και ο αλγόριθμος «bridging» θα έχει περισσότερα δεδομένα για να υπολογίσει το κατάλληλο πολλαπλάσιο 2π που θα πρέπει να προστεθεί. Επίσης τα περισσότερα συμβολογραφήματα κατά την αντιστροφή της φάσης θα επιτρέψουν καλύτερη εκτίμηση της διακύμανσης της φάσης του κάθε εικονοστοιχείου με αποτέλεσμα τον καλύτερο υπολογισμό της μέσης ταχύτητας.

Πέρα από τη δημιουργία περισσότερων συνδέσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες εικόνες SAR δηλαδή να προστεθούν και εικόνες από τον δορυφόρο Sentinel-1B. Εκτιμάται ότι η χρήση τους θα μειώσει την ελάχιστη διαχρονική βάση των συμβολογραφημάτων από τις 12 σε 6

ημέρες. Το γεγονός αυτό, θα αυξήσει τη συνάφεια σε περιοχές με έντονη βλάστηση ενώ θα δώσει την δυνατότητα να μετατραπεί η μέση ταχύτητα σε γεωμετρία east/north/up από LOS.

Τέλος, σε μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να διερευνηθεί αν κάποιο άλλο γενικευμένο ατμοσφαιρικό μοντέλο (όπως GACOS, MERRIS) έχει καλύτερα αποτελέσματα στο έντονο ανάγλυφο του νομού Χανίων. Προτείνεται η χρήση των ατμοσφαιρικών μοντέλων GAGOS, ή MERRIS για να ελεγχθεί αν δίνει καλύτερη ακρίβεια η σύγκριση με το GPS (αν δηλαδή μειώνεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα) και να διαπιστωθεί η συμπεριφορά τους σε υψόμετρο άνω των 1000 μέτρων.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Ελληνικές

Μερτίκας Π. Σ. (1999). Τηλεπισκόπηση και ψηφιακή ανάλυση εικόνας, Εκδόσεις ΙΩΝ. ISBN: 960-405-949-1

Μπικουβαράκη Μ. (2011). Συμβολομετρία RADAR στην παρακολούθηση υψομετρικών παραμορφώσεων του εδάφους, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάς, doi:10.26233/heallink.tuc.23371

Διεθνείς

Ansari, H., De Zan, F., & Bamler, R. (2018). Efficient phase estimation for interferogram stacks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(7), 4109-4125.

Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 40(11), 2375-2383, doi:10.1109/TGRS.2002.803792.

Cai J., Liu G., Jia H., Zhang B., Wu R., Fu Y., ... & Zhang, R. (2022). A new algorithm for landslide dynamic monitoring with high temporal resolution by Kalman filter integration of multiplatform time-series InSAR processing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 110, 102812.

Chaussard, E., F. Amelung, and Y. Aoki (2013). Characterization of open and closed volcanic systems in Indonesia and Mexico using InSAR time series, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(8), 3957-3969, doi:10.1002/jgrb.50288.

Chaussard, E., R. Bürgmann, H. Fattahi, R. M. Nadeau, T. Taira, C. W. Johnson, and I. Johanson (2015). Potential for larger earthquakes in the East San Francisco Bay Area due to the direct connection between the Hayward and Calaveras Faults, *Geophysical Research Letters*, 42(8), 2734-2741, doi:10.1002/2015GL063575.

Chen, C. W., and H. A. Zebker (2001). Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization, *JOSA A*, 18(2), 338-351, doi:10.1364/JOSAA.18.000338.

Doin, M. P., C. Lasserre, G. Peltzer, O. Cavalié, and C. Doubre (2009). Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models, *Journal of Applied Geophysics*, 69(1), 35-50, doi:10.1016/j.jappgeo.2009.03.010.

ESA, (2020). Current and future missions. [online] Available at: https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Current_and_future_missions

ESA, 2020. Sentinel1. [online] Available at: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel5>.

Fattahi, H., Agram P., and M. Simons (2016). A Network-Based Enhanced Spectral Diversity Approach for TOPS Time-Series Analysis, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(2), 777-786, doi:10.1109/TGRS.2016.2614925.

Fattahi, H., and Amelung F. (2013). DEM Error Correction in InSAR Time Series, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 51(7), 4249-4259, doi:10.1109/TGRS.2012.2227761.

Fattahi, H., and Amelung F. (2015). InSAR bias and uncertainty due to the systematic and stochastic tropospheric delay, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(12), 8758-8773, doi:10.1002/2015JB012419.

Ferretti, A. Prati C., and Rocca F.(2001). Permanent scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and remote Sensing*, 39(1), 8-20.

Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., & Rucci, A. (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 49(9), 3460-3470.

Freedman, D., Pisani, R., & Purves, R. (2007). *Statistics (international student edition)*. Pisani, R. Purves, 4th Edn. WW Norton & Company, New York.

Goldstein R. M., Zebker H. A. and Werner C. L., (1988). Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping, in *Radio Science*, vol. 23, no. 4, pp. 713-720.

Guarnieri, A. M., & Tebaldini, S. (2007). Hybrid Cramér–Rao bounds for crustal displacement field estimators in SAR interferometry. *IEEE signal processing letters*, 14(12), 1012-1015.

Guarnieri, A. M., & Tebaldini, S. (2008). On the exploitation of target statistics for SAR interferometry applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(11), 3436-3443.

Hui Li, Jiayang Zhao, Bingqi Yan, Linwei Yue & Lunche Wang (2022). Global DEMs vary from one to another: an evaluation of newly released Copernicus, NASA and AW3D30 DEM on selected terrains of China using ICESat-2 altimetry data, *International Journal of Digital Earth*, 15:1, 1149-1168, DOI: 10.1080/17538947.2022.2094002

Jawak, S. (2015). A Review on Applications of Imaging Synthetic Aperture Radar with a Special Focus on Cryospheric Studies. *Advances in Remote Sensing*. 4. 163-17

Jolivet, R., P. S. Agram, N. Y. Lin, M. Simons, M. P. Doin, G. Peltzer, and Z. Li (2014). Improving InSAR geodesy using global atmospheric models, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3), 2324-2341, doi:10.1002/2013JB010588.

Jolivet, R., R. Grandin, C. Lasserre, M. P. Doin, and G. Peltzer (2011). Systematic InSAR tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data, *Geophysical Research Letters*, 38(17), L17311, doi:10.1029/2011GL048757.

Lauknes, T. R., Zebker, H. A., & Larsen, Y. (2010). InSAR deformation time series using an L_1 -norm small-baseline approach. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 49(1), 536-546.

Liao, M., Zhang, R., Lv, J., Yu, B., Pang, J., Li, R., ... & Tao, W. (2021). Subsidence monitoring of fill area in Yan'an new district based on Sentinel-1A time series imagery. *Remote Sensing*, 13(15), 3044.

López-Quiroz, P., Doin, M. P., Tupin, F., Briole, P., & Nicolas, J. M. (2009). Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1), 1-15.

Marinkovic, P., and Y. Larsen (2013). Consequences of long-term ASAR local oscillator frequency decay - An empirical study of 10 years of data, paper presented at Proceedings of the Living Planet Symposium (abstract), European Space Agency, Edinburgh, U. K.

Morales R., Amelung F., and Mothes P., (2016). Volcano Deformation Survey over the Northern and Central Andes with ALOS InSAR Time Series, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17, 2869-2883, doi:10.1002/2016GC006393.

Nikolakopoulos, K. (2020). Accuracy assessment of ALOS AW3D30 DSM and comparison to ALOS PRISM DSM created with classical photogrammetric techniques. *European Journal of Remote Sensing*. 53. 1-14. 10.1080/22797254.2020.1774424.

Pepe, A., and R. Lanari (2006). On the extension of the minimum cost flow algorithm for phase unwrapping of multitemporal differential SAR interferograms, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 44(9), 2374-2383, doi:10.1109/TGRS.2006.873207.

Pepe, A., Yang, Y., Manzo, M., & Lanari, R. (2015). Improved EMCF-SBAS processing chain based on advanced techniques for the noise-filtering and selection of small baseline multi-look DInSAR interferograms. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 53(8), 4394-4417.

Perissin, D., and T. Wang (2012). Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 50(1), 271-280, doi:10.1109/tgrs.2011.2160644.

Petit, G & Luzum, B. (2010). IERS conventions (2010). Tech. Rep. DTIC Document. 36. 180.

Potin, P., Bargellini, P., Laur, H., Rosich, B. and Schmuck, S. (2012). Sentinel -1 mission operations concept. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, IEEE. pp. 1745 - 1748. DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6351183

Rosen, P. A., E. Gurrola, G. F. Sacco, and H. Zebker (2012). The InSAR scientific computing environment, paper presented at EUSAR 2012, 23-26 April 2012.

Rosen, P. A., S. Hensley, G. Peltzer, and M. Simons (2004). Updated repeat orbit interferometry package released, *Eos Trans. AGU*, 85(5), 47-47, doi:10.1029/2004EO050004.

Rousseeuw, P. J., & Hubert, M. (2011). Robust statistics for outlier detection. *Wiley interdisciplinary reviews: Data mining and knowledge discovery*, 1(1), 73-79.

Samiei-Esfahany S., Martins, J.E., Leijen, F.v., Hanssen, R.F., (2016). Phase estimation for distributed scatterers in InSAR stacks using integer least squares estimation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 54 (10), 5671–5687

Schmidt, D. A. & Bürgmann, R. (2003). Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B9).

Seymour, M. S., & Cumming, I. G. (1994, August). Maximum likelihood estimation for SAR interferometry. In *Proceedings of IGARSS'94-1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (Vol. 4, pp. 2272-2275). IEEE.

Tadono T., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., and Iwamoto H., (2014). Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.II-4, pp.71-76.

Tadono T., Nagai H., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., & Iwamoto, H. (2016). Initial Validation of the 30 m-mesh Global Digital Surface Model Generated by ALOS PRISM, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS, Vol.XLI-B4, pp.157-162.

Takaku J. and Tadono T., (2017). Quality updates of 'AW3D' global DSM generated from ALOS PRISM, Proc. IGARSS2017, IEEE, Fort Worth, TX, USA., pp.5666-5669, 2017.

Takaku J., Tadono T., Doutsu, M. Ohgushi F., and Kai H., (2020). Updates of 'AW3D30' ALOS Global Digital Surface Model with Other Open Access Datasets, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS, Vol.XLIII-B4-2020, pp.183–189.

Takaku, J. Tadono T., and Tsutsui K. (2014). Generation of High Resolution Global DSM from ALOS PRISM, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS, Vol.XL-4, pp.243-248.

Takaku, J. Tadono T., Tsutsui K., and Ichikawa M. (2016). Validation of 'AW3D' Global DSM Generated from ALOS PRISM, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.III-4, pp.25-31.

Takaku, J. Tadono T., Tsutsui K., and Ichikawa M. (2018). "Quality Improvements of 'AW3D' Global DSM Derived from ALOS PRISM", Proc. IGARSS2018, IEEE, Valencia, Spain, pp.1612-1615.

Tough, R. J. A., D. Blacknell, and S. Quegan (1995). A Statistical Description of Polarimetric and Interferometric Synthetic Aperture Radar Data, Proceedings: Mathematical and Physical Sciences, 449(1937), 567-589, doi:10.1098/rspa.1995.0059.

Werner, C., U. Wegmüller, T. Strozzi, and A. Wiesmann (2000). Gamma SAR and interferometric processing software, paper presented at Proceedings of the ERS-Envisat symposium, Gothenburg, Sweden.

Woodhouse, I.H. (2006). Introduction to Microwave Remote Sensing (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315272573>

Yu, C., Z. Li, and N. T. Penna (2018). Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model, *Remote Sensing of Environment*, 204, 109-121, doi:10.1016/j.rse.2017.10.038.

Yu, C., Z. Li, N. T. Penna, and P. Crippa (2018). Generic Atmospheric Correction Model for Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(10), 9202-9222, doi:10.1029/2017JB015305.

Yunjun, Z., Fattahi H., and Amelung F., (2019). Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction, *Computers & Geosciences*, 133, 104331, doi:10.1016/j.cageo.2019.104331.

Zebker, H. A., P. A. Rosen, and S. Hensley (1997). Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B4), 7547-7563, doi:10.1029/96JB03804.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στοιχεία εικόνων SAR

Στο παράρτημα αυτό δίδονται τα βασικά χαρακτηριστικά των εικόνων SAR που χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία.

Platform	Sensor	Beam Mode	Orbit	Path Number	Frame Number	Acquisition Date	Processing Level	Ascending or Descending
Sentinel-1A	C-SAR	IW	39374	102	113	2021-08-24T16:23:36.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	39199	102	113	2021-08-12T16:23:35.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	39024	102	113	2021-07-31T16:23:35.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	38849	102	113	2021-07-19T16:23:34.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	38674	102	113	2021-07-07T16:23:33.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	38499	102	113	2021-06-25T16:23:32.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	38324	102	113	2021-06-13T16:23:32.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	38149	102	113	2021-06-01T16:23:31.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	37974	102	113	2021-05-20T16:23:30.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	37799	102	113	2021-05-08T16:23:30.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	37624	102	113	2021-04-26T16:23:29.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	37449	102	113	2021-04-14T16:23:29.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	37274	102	113	2021-04-02T16:23:28.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	37099	102	113	2021-03-21T16:23:28.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	36924	102	113	2021-03-09T16:23:28.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	36749	102	113	2021-02-25T16:23:28.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	36574	102	113	2021-02-13T16:23:28.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	36399	102	113	2021-02-01T16:23:28.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	36224	102	113	2021-01-20T16:23:29.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	36049	102	113	2021-01-08T16:23:29.000000	SLC	ASCENDING

Sentinel-1A	C-SAR	IW	35874	102	113	2020-12-27T16:23:30.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	35699	102	113	2020-12-15T16:23:30.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	35524	102	113	2020-12-03T16:23:31.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	35349	102	113	2020-11-21T16:23:31.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	35174	102	113	2020-11-09T16:23:32.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	34999	102	113	2020-10-28T16:23:32.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	34824	102	113	2020-10-16T16:23:32.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	34649	102	113	2020-10-04T16:23:32.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	34474	102	113	2020-09-22T16:23:31.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	34299	102	113	2020-09-10T16:23:31.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	34124	102	113	2020-08-29T16:23:31.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	33949	102	113	2020-08-17T16:23:30.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	33774	102	113	2020-08-05T16:23:29.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	33599	102	113	2020-07-24T16:23:28.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	33424	102	113	2020-07-12T16:23:28.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	33249	102	113	2020-06-30T16:23:27.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	33074	102	113	2020-06-18T16:23:26.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	32899	102	113	2020-06-06T16:23:25.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	32724	102	113	2020-05-25T16:23:25.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	32549	102	113	2020-05-13T16:23:24.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	32374	102	113	2020-05-01T16:23:23.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	32199	102	113	2020-04-19T16:23:23.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	32024	102	113	2020-04-07T16:23:22.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	31849	102	113	2020-03-26T16:23:22.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	31674	102	113	2020-03-14T16:23:22.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	31499	102	113	2020-03-02T16:23:22.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	31324	102	113	2020-02-19T16:23:22.000000	SLC	ASCENDING

Sentinel-1A	C-SAR	IW	31149	102	113	2020-02-07T16:23:22.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	30974	102	113	2020-01-26T16:23:22.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	30799	102	113	2020-01-14T16:23:23.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	30624	102	113	2020-01-02T16:23:23.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	30449	102	113	2019-12-21T16:23:24.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	30274	102	113	2019-12-09T16:23:24.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	30099	102	113	2019-11-27T16:23:25.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	29924	102	113	2019-11-15T16:23:25.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	29749	102	113	2019-11-03T16:23:25.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	29574	102	113	2019-10-22T16:23:25.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	29399	102	113	2019-10-10T16:23:25.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	29224	102	113	2019-09-28T16:23:25.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	29049	102	113	2019-09-16T16:23:25.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	28874	102	113	2019-09-04T16:23:24.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	28699	102	113	2019-08-23T16:23:24.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	28524	102	113	2019-08-11T16:23:23.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	28349	102	113	2019-07-30T16:23:22.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	28174	102	113	2019-07-18T16:23:21.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	27999	102	113	2019-07-06T16:23:21.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	27824	102	113	2019-06-24T16:23:20.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	27649	102	113	2019-06-12T16:23:19.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	27474	102	113	2019-05-31T16:23:18.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	27299	102	113	2019-05-19T16:23:18.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	27124	102	113	2019-05-07T16:23:17.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	26949	102	113	2019-04-25T16:23:17.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	26774	102	113	2019-04-13T16:23:16.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	26599	102	113	2019-04-01T16:23:16.000000	SLC	ASCENDING

Sentinel-1A	C-SAR	IW	26424	102	113	2019-03-20T16:23:16.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	26249	102	113	2019-03-08T16:23:16.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	26074	102	113	2019-02-24T16:23:16.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	25899	102	113	2019-02-12T16:23:16.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	25724	102	113	2019-01-31T16:23:16.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	25549	102	113	2019-01-19T16:23:16.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	25374	102	113	2019-01-07T16:23:17.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	25199	102	113	2018-12-26T16:23:17.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	25024	102	113	2018-12-14T16:23:18.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	24849	102	113	2018-12-02T16:23:18.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	24674	102	113	2018-11-20T16:23:19.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	24499	102	113	2018-11-08T16:23:19.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	24324	102	113	2018-10-27T16:23:19.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	24149	102	113	2018-10-15T16:23:19.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	23974	102	113	2018-10-03T16:23:19.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	23799	102	113	2018-09-21T16:23:19.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	23624	102	113	2018-09-09T16:23:18.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	23449	102	113	2018-08-28T16:23:18.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	23274	102	113	2018-08-16T16:23:17.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	23099	102	113	2018-08-04T16:23:16.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	22924	102	113	2018-07-23T16:23:16.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	22749	102	113	2018-07-11T16:23:15.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	22399	102	113	2018-06-17T16:23:14.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	22224	102	113	2018-06-05T16:23:13.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	22049	102	113	2018-05-24T16:23:12.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	21874	102	113	2018-05-12T16:23:11.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	21699	102	113	2018-04-30T16:23:11.000000	SLC	ASCENDING

Sentinel-1A	C-SAR	IW	21524	102	113	2018-04-18T16:23:10.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	21349	102	113	2018-04-06T16:23:10.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	21174	102	113	2018-03-25T16:23:09.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	20999	102	113	2018-03-13T16:23:09.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	20824	102	113	2018-03-01T16:23:09.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	20649	102	113	2018-02-17T16:23:09.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	20474	102	113	2018-02-05T16:23:09.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	20299	102	113	2018-01-24T16:23:10.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	20124	102	113	2018-01-12T16:23:10.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	19949	102	113	2017-12-31T16:23:10.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	19774	102	113	2017-12-19T16:23:11.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	19599	102	113	2017-12-07T16:23:11.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	19424	102	113	2017-11-25T16:23:12.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	19249	102	113	2017-11-13T16:23:12.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	19074	102	113	2017-11-01T16:23:12.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	18899	102	113	2017-10-20T16:23:12.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	18724	102	113	2017-10-08T16:23:12.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	18549	102	113	2017-09-26T16:23:12.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	18374	102	113	2017-09-14T16:23:12.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	18199	102	113	2017-09-02T16:23:11.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	18024	102	113	2017-08-21T16:23:11.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	17849	102	113	2017-08-09T16:23:10.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	17674	102	113	2017-07-28T16:23:10.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	17324	102	113	2017-07-04T16:23:08.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	17149	102	113	2017-06-22T16:23:07.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	16974	102	113	2017-06-10T16:23:07.000000	SLC	ASCENDING
Sentinel-1A	C-SAR	IW	16799	102	113	2017-05-29T16:23:06.000000	SLC	ASCENDING

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Τροχιακά δεδομένα

Στο παράρτημα αυτό δίδονται οι τροχιές του δορυφόρου Sentinel-1A που χρησιμοποιήθηκαν.

S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210315T082526_V20170104T225942_20170106T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210315T121312_V20170116T225942_20170118T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210315T160221_V20170128T225942_20170130T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210315T195343_V20170209T225942_20170211T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210301T141627_V20170221T225942_20170223T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210301T180503_V20170305T225942_20170307T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210301T215727_V20170317T225942_20170319T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210302T014947_V20170329T225942_20170331T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210302T054212_V20170410T225942_20170412T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210302T093237_V20170422T225942_20170424T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210302T132456_V20170504T225942_20170506T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210302T171125_V20170516T225942_20170518T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210302T210211_V20170528T225942_20170530T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210303T005413_V20170609T225942_20170611T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210303T044635_V20170621T225942_20170623T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210303T083751_V20170703T225942_20170705T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210303T122633_V20170715T225942_20170717T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210303T162048_V20170727T225942_20170729T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210303T200819_V20170808T225942_20170810T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210304T035123_V20170901T225942_20170903T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210304T074256_V20170913T225942_20170915T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210304T112932_V20170925T225942_20170927T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210304T151947_V20171007T225942_20171009T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210304T191311_V20171019T225942_20171021T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210304T230554_V20171031T225942_20171102T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210305T025947_V20171112T225942_20171114T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210305T065215_V20171124T225942_20171126T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210305T104446_V20171206T225942_20171208T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210305T143224_V20171218T225942_20171220T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210305T182537_V20171230T225942_20180101T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210305T221634_V20180111T225942_20180113T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210306T020544_V20180123T225942_20180125T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210306T055501_V20180204T225942_20180206T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210306T094726_V20180216T225942_20180218T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210306T133809_V20180228T225942_20180302T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210306T172229_V20180312T225942_20180314T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210306T211513_V20180324T225942_20180326T005942.EOF

S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210307T010416_V20180405T225942_20180407T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210307T084333_V20180429T225942_20180501T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210307T123618_V20180511T225942_20180513T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210307T162519_V20180523T225942_20180525T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210307T201340_V20180604T225942_20180606T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210307T235908_V20180616T225942_20180618T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210308T074509_V20180710T225942_20180712T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210308T113735_V20180722T225942_20180724T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210308T152922_V20180803T225942_20180805T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210308T191955_V20180815T225942_20180817T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210308T231002_V20180827T225942_20180829T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210309T030104_V20180908T225942_20180910T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210309T065020_V20180920T225942_20180922T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210309T104046_V20181002T225942_20181004T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210309T142830_V20181014T225942_20181016T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210309T181803_V20181026T225942_20181028T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210309T220819_V20181107T225942_20181109T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210310T020256_V20181119T225942_20181121T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210310T055425_V20181201T225942_20181203T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210310T095253_V20181213T225942_20181215T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210310T173415_V20190106T225942_20190108T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210310T212321_V20190118T225942_20190120T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210311T011420_V20190130T225942_20190201T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210311T051016_V20190211T225942_20190213T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210311T090313_V20190223T225942_20190225T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210311T125124_V20190307T225942_20190309T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210311T162022_V20190319T225942_20190321T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210311T200631_V20190331T225942_20190402T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210311T235241_V20190412T225942_20190414T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210312T032929_V20190424T225942_20190426T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210312T071612_V20190506T225942_20190508T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210312T110705_V20190518T225942_20190520T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210312T155101_V20190530T225942_20190601T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210330T151430_V20190611T225942_20190613T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210330T191728_V20190623T225942_20190625T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210330T231303_V20190705T225942_20190707T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210331T031532_V20190717T225942_20190719T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210331T071513_V20190729T225942_20190731T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210331T112646_V20190810T225942_20190812T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210331T193214_V20190903T225942_20190905T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210314T061344_V20190915T225942_20190917T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210314T100452_V20190927T225942_20190929T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210314T135403_V20191009T225942_20191011T005942.EOF

S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210314T173624_V20191021T225942_20191023T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210314T212527_V20191102T225942_20191104T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210315T011035_V20191114T225942_20191116T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210315T050115_V20191126T225942_20191128T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210315T085512_V20191208T225942_20191210T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210315T124630_V20191220T225942_20191222T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210316T184157_V20200101T225942_20200103T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210316T223042_V20200113T225942_20200115T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210317T022152_V20200125T225942_20200127T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210317T061343_V20200206T225942_20200208T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210317T100523_V20200218T225942_20200220T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210317T135251_V20200301T225942_20200303T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210317T173827_V20200313T225942_20200315T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210317T212403_V20200325T225942_20200327T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210318T011506_V20200406T225942_20200408T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210303T235840_V20170820T225942_20170822T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210307T045419_V20180417T225942_20180419T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210310T134152_V20181225T225942_20181227T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210331T153511_V20190822T225942_20190824T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210318T050542_V20200418T225942_20200420T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210318T211027_V20201214T225942_20201216T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210318T085615_V20200430T225942_20200502T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210318T124631_V20200512T225942_20200514T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210318T163659_V20200524T225942_20200526T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210318T202703_V20200605T225942_20200607T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210319T001341_V20200617T225942_20200619T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210319T040259_V20200629T225942_20200701T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210316T193917_V20200711T225942_20200713T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210316T233123_V20200723T225942_20200725T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210317T032043_V20200804T225942_20200806T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210317T070755_V20200816T225942_20200818T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210317T105949_V20200828T225942_20200830T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210317T144552_V20200909T225942_20200911T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210317T183214_V20200921T225942_20200923T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210317T221833_V20201003T225942_20201005T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210318T020726_V20201015T225942_20201017T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210318T055556_V20201027T225942_20201029T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210318T094544_V20201108T225942_20201110T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210318T133554_V20201120T225942_20201122T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210318T172333_V20201202T225942_20201204T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210319T005851_V20201226T225942_20201228T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210319T044826_V20210107T225942_20210109T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210209T121849_V20210119T225942_20210121T005942.EOF

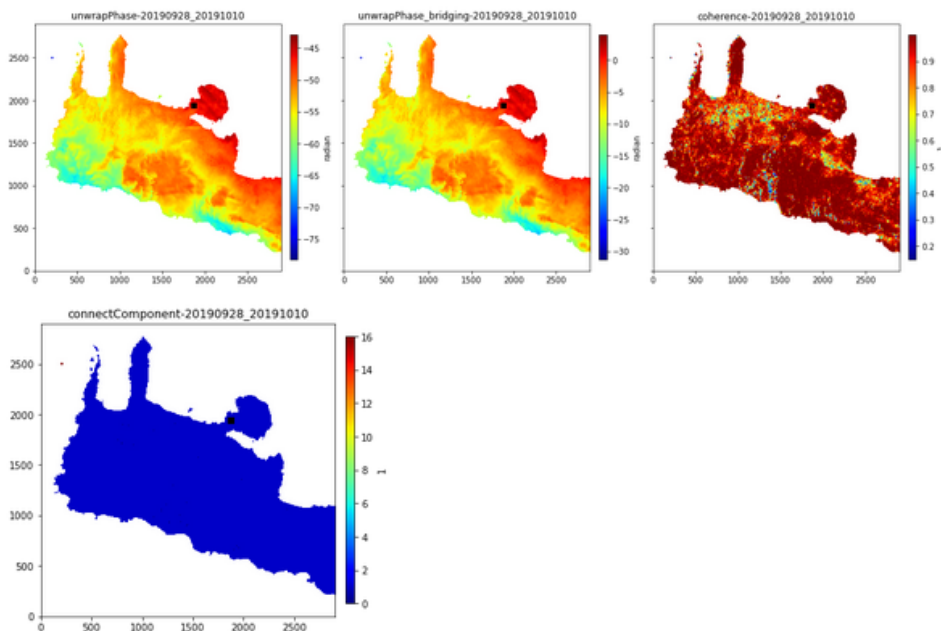
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210221T121758_V20210131T225942_20210202T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210305T121825_V20210212T225942_20210214T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210317T121451_V20210224T225942_20210226T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210329T121954_V20210308T225942_20210310T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210410T121923_V20210320T225942_20210322T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210422T121745_V20210401T225942_20210403T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210504T121735_V20210413T225942_20210415T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210516T121722_V20210425T225942_20210427T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210528T121723_V20210507T225942_20210509T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210609T121911_V20210519T225942_20210521T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210621T121719_V20210531T225942_20210602T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210703T121921_V20210612T225942_20210614T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210715T121906_V20210624T225942_20210626T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210727T121840_V20210706T225942_20210708T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210808T121844_V20210718T225942_20210720T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210820T121922_V20210730T225942_20210801T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210901T122143_V20210811T225942_20210813T005942.EOF
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210913T121944_V20210823T225942_20210825T005942.EOF

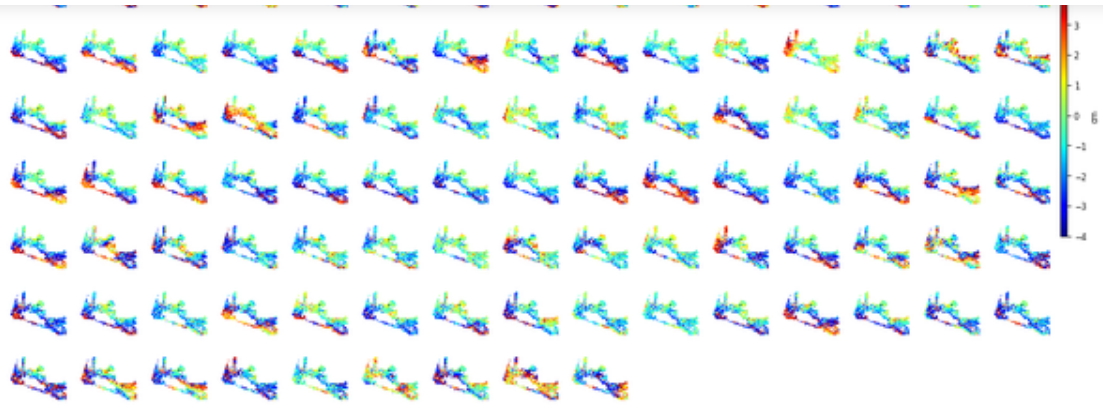
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Στο παράρτημα υπάρχουν στιγμιότυπα από την επεξεργασία με το λογισμικό MintPy.

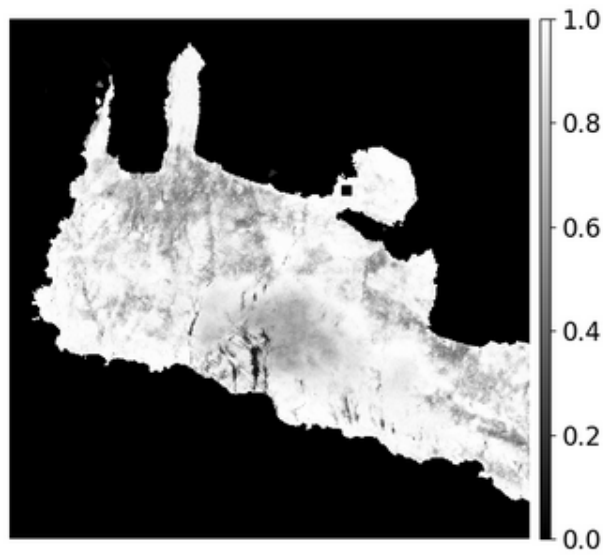
```
In [13]: view.main('./inputs/ifgramStack.h5 20190928_20191010 --ncols 3 -m waterMask.h5'.split())

run view.py in MintPy version v1.3.2-24, date 2022-01-31
input file is ifgramStack file: /media/dennis/hope/stack/mintpy/inputs/ifgramStack.h5 in float32 format
file size in y/x: (2900, 2900)
input dataset: "['20190928_20191010']"
num of datasets in file ifgramStack.h5: 2520
num of datasets to exclude: 0
num of datasets to display: 4
data coverage in y/x: (0, 0, 2900, 2900)
subset coverage in y/x: (0, 0, 2900, 2900)
data coverage in lat/lon: None
subset coverage in lat/lon: None
-----
colormap: jet
ASCENDING orbit -> flip up-down
figure title: unwrapPhase
figure size : [15.00, 8.00]
dataset number: 4
row number: 1
column number: 3
figure number: 2
read mask from file: waterMask.h5
consider reference pixel in y/x: [1944, 1875]
mark interferograms with 'dropIfgram=False' in red colored title
-----
Figure 1 - unwrapPhase_1.png
reading data as a list of 20 matrices ...
[=====] coherence-20190928_20191010_20191010 0s / 0s
masking data
plotting ...
[=====] coherence-20190928_20191010_20191010 0s / 0s
data range: [-78.24383, 3.988697] None
Note: different color scale for EACH subplot!
Adjust figsize for the colorbar of each subplot.
-----
Figure 2 - unwrapPhase_2.png
reading data as a list of 20 matrices ...
[=====] connectComponent-20190928_20191010
masking data
plotting ...
[=====] connectComponent-20190928_20191010
data range: [0.0, 16.0] None
Note: different color scale for EACH subplot!
Adjust figsize for the colorbar of each subplot.
-----
all data range: [-78.24382781982422, 16.0] None
showing ...
```

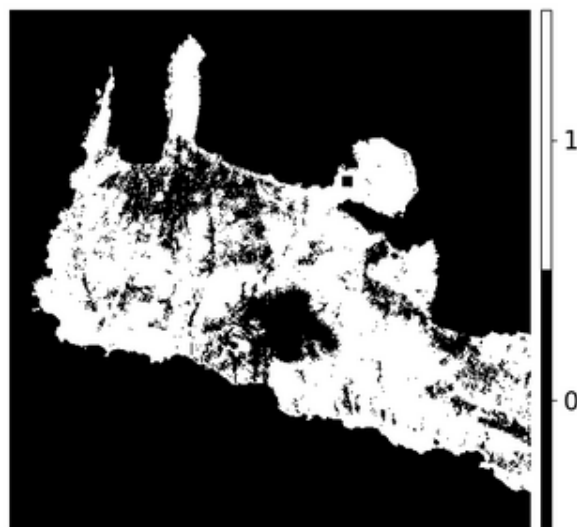




```
In [37]: view.main('temporalCoherence.h5 -c gray --notick --noaxis --noverbose --save --notitle'.split())
view.main('maskTempCoh.h5 -c gray --notick --noaxis --noverbose --save --notitle'.split())
view.py temporalCoherence.h5 -c gray --notick --noaxis --noverbose --save --notitle
```



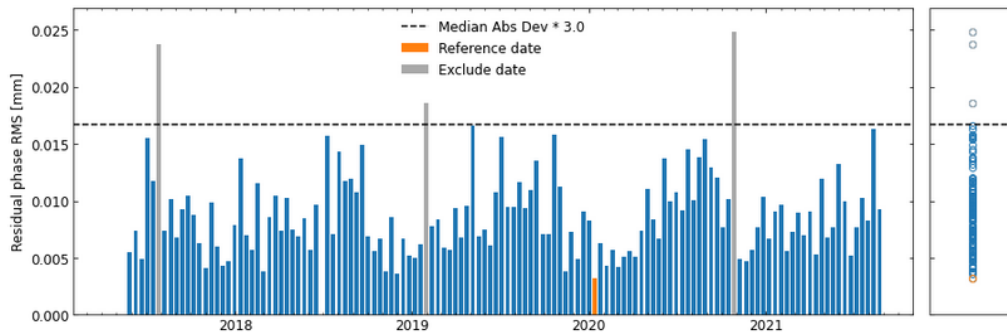
```
view.py maskTempCoh.h5 -c gray --notick --noaxis --noverbose --save --notitle
```




```
In [44]: #auto selected optimal reference date.
!cat reference_date.txt
```

20200114

```
In [9]: ## plot the RMS value
from mintpy.timeseries_rms import plot_rms_bar
txtContent = np.loadtxt('./rms_timeseriesResidual_ramp.txt', dtype=bytes).astype(str)
rms_list = [float(i) for i in txtContent[:, 1]]
date_list = [i for i in txtContent[:, 0]]
fig, ax = plt.subplots(figsize=[15, 5])
ax = plot_rms_bar(ax, date_list, rms_list)
plt.savefig("rms_error")
plt.show()
```



2.12 Change reference date

This step changes the reference date of all phase time-series files, based on the input template option:

```
## reference all time-series to one date in time
## no - do not change the default reference date (1st date)
mintpy.reference.date = auto #[reference_date.txt / 20090214 / no], auto for reference_date.txt
```

This step operates on the existing time-series files and does not output new files.

Note: The optimal reference date (default option) gives the time-series plot a "clean" looks only. Changing the reference is equivalent to adding a constant to the displacement time series, which does not change the velocity or any other information derived from the displacement time series.

