

# ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

# Σχολή Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας και Εφαρμοσμένων Οικονομικών

Τμήμα Γεωγραφίας

## Διερεύνηση ανάπτυξης μεθοδολογίας διαχρονικής παρακολούθησης εδαφικής παραμόρφωσης ηφαιστείου με βάση το ανοιχτού κώδικα λογισμικό SNAP

Κωνσταντίνα Μπαντουβάκη

Αθήνα, 2018



# ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

# Σχολή Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας και Εφαρμοσμένων Οικονομικών

Τμήμα Γεωγραφίας

# Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Παρχαρίδης Ισαάκ (Επιβλέπων), Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Χαλκιάς Χρίστος, Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Καρύμπαλης Ευθύμιος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Εγώ, Κωνσταντίνα Μπαντουβάκη δηλώνω υπεύθυνα ότι:

1) Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.

2) Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για αυτή την πτυχιακή εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως το καθηγητή μου Ισαάκ Παρχαρίδη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Γεωγραφίας του Χαροκόπειο Πανεπιστημίου Αθηνών για την αμέριστη βοήθεια του και το ενδιαφέρον του. Μέσα από εκείνον γνώρισα την επιστήμη της παρατήρησης της γης από το διάστημα (Earth Observation) και έμαθα να δουλεύω σωστά προσπαθώντας πάντα για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, του συμφοιτητές και τους φίλους μου για την κατανόηση και την στήριξή τους καθ' όλη την διάρκεια του πτυχίου μου.

## ΠΙΚΑΝΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΗΣΤΙΕΣ	5
Κατάλογος εικόνων	6
Περίληψη στα Ελληνικά	9
Περίληψη στα Αγγλικά	10
Συντομογραφίες	11
1.Εισαγωγή	12
1.1. Σκοπός	12
1.2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	13
1.3. Τηλεπισκόπηση και Ηφαίστεια	15
1.4. Θεωρητικό Υπόβαθρο	17
1.4.2. Θεωρία των SAR	17
1.4.3. Εισαγωγή στην θεωρία των InSAR	18
2. Περιοχή Μελέτης	23
2.1. Γεωδυναμικό Πλαίσιο του ηφαιστείου της Σαντορίνης	23
2.2. Γεωμορφολογία Σαντορίνης	24
2.3. Παρακολούθηση του ηφαιστείου της Σαντορίνης	27
3. Ελεύθερα Δεδομένα, Ελεύθερο λογισμικό SNAP και Μεθοδολογία	28
3.1. Ελεύθερα Δεδομένα	28
3.2. Πλατφόρμα Copernicus Hub	30
3.3. Δορυφόρος Sentinel-1	32
3.4. Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν	35
3.5. Ελεύθερο Λογισμικό SNAP	36
3.6. Μεθοδολογία	38
4. Επεξεργασία SAR και Δημιουργία Συμβολογραφημάτων	
4.1. Προ επεξεργασία	
4.2. Παρουσίαση και ανάλυση Συμβολογραφημάτων Σαντορίνης	42
4.3. Προσθήκη των συμβολομετρικών φάσεων	50

5. Συζήτηση και Συμπεράσματα	53
6. Βιβλιογραφία	55

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Γεωμετρία δορυφορικού συμβολομετρικού συστήματος SAR19
Εικόνα 2 Γεωμετρία διαφορικής συμβολομετρίας21
Εικόνα 3: γεωλογικός χάρτης Σαντορίνης24
Εικόνα 4: εδαφική παραμόρφωση στην Σαντορίνη τον Μάρτιο του 201226
Εικόνα 5: πλατφόρμες λήψης δορυφορικών δεδομένων
Εικόνα 6: Πλατφόρμα Copernicus31
Εικόνα 7: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πλατφόρμας Sentinel-133
Εικόνα 8: Η κάλυψη της γης με την χρήση και των δύο δορυφόρων Sentinel-1 Α,Β σε ταυτόχρονη τροχιά34
Εικόνα 9: Ελεύθερο λογισμικό SNAP37
Εικόνα 10: Διάγραμμα μεθοδολογίας38
Εικόνα 11: διάγραμμα δημιουργίας συμβολογραφήματος
Εικόνα 12: Το βήμα SI TOPS Coregistration μέσα στο λογισμικό SNAP40
Εικόνα 13: Swath της εικόνας ραντάρ SLC για το νησί της Σαντορίνης40
Εικόνα 14: Συμβολογράφημα 12-1-17 με 24-1-17
πριν και μετά το SI TOPS Deburst41
Εικόνα 15 : Εικόνα Συνάφειας περιόδου 12-01-2017 με 24-01-2017 (Ιανουάριος), Σαντορίνη42
Εικόνα 16: Wrapped Συμβολογράφημα 12-01-2017 με 24-01-2017 (Ιανουάριος), Σαντορίνη
Εικόνα 17: Εικόνα Συνάφειας (coherence) περιόδου 24-01-2017 με 17-02-2017 (Φεβρουάριος), Σαντορίνη44
Εικόνα 18: Wrapped Συμβολογράφημα 24-01-2017 με 17-02-2017 (Φεβρουάριος), Σαντορίνη44

Εικόνα 19: Εικόνα Συνάφειας (coherence) περιόδου 17-02-2017 με 25-03-2017 (Μάρτιος), Σαντορίνη45
Εικόνα 20: Wrapped Συμβολογράφημα 17-02-2017 με 25-03-2017 (Μάρτιος), Σαντορίνη45
Εικόνα 21: Εικόνα Συνάφειας περιόδου 25-03-2017 με 30-04-2017 (Απρίλιος), Σαντορίνη46
Εικόνα 22: Wrapped Συμβολογράφημα 25-03-2017 με 30-04-2017 (Απρίλιος), Σαντορίνη46
Εικόνα 23: Εικόνα Συνάφειας (coherence) περιόδου 30-04-2017 με 24-05-2017 (Μάιος), Σαντορίνη47
Εικόνα 24: Wrapped Συμβολογράφημα 30-04-2017 με 24-05-2017 (Μάιος), Σαντορίνη47
Εικόνα 25: Εικόνα Συνάφειας (coherence) περιόδου 24-05-2017 με 29-06-2017 (Ιούνιος), Σαντορίνη
Εικόνα 26: Wrapped Συμβολογράφημα 24-05-2017 με 29-06-2017 (Ιούνιος), Σαντορίνη48
Εικόνα 27: Εικόνα Συνάφειας (coherence) περιόδου 12-01-2017 με 29-06-2017, Σαντορίνη49
Εικόνα 28: Wrapped Συμβολογράφημα 12-01-2017 με 29-06-2017, Σαντορίνη49
Εικόνα 29: Αποτέλεσμα προσθήκης φάσεων στο εργαλείο band_math52
Εικόνα 30: Τελική εικόνα με την προσθήκη των φάσεων στο band_math και η τελική εικόνα συνάφειας53
Εικόνα 31 : Wrapped Συμβολογράφημα και εικόνα συνάφειας περιόδου 12-01-2017 με 29-06-2017, Σαντορίνη53
Εικόνα 32: Μωσαϊκό για το νησί της Σαντορίνης μέσω του λογισμικού SNAP54

#### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας έχει προσφέρει πολλές νέες δυνατότητες, όπως την ύπαρξη των ελεύθερων λογισμικών και δορυφορικών δεδομένων μέσω των οποίων έχει αναπτυχθεί η παρατήρηση της γης από το διάστημα, συμβάλλοντας έτσι στη παρακολούθηση επικίνδυνων φυσικών φαινομένων. Το ελεύθερο λογισμικό SNAP αποτελεί μια καινούρια εφαρμογή στην επιστημονική κοινότητα της γεωπληροφορικής με την οποία ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί δορυφορικές εικόνες και εικόνες ραντάρ. Στην συγκεκριμένη εργασία σκοπός είναι η δημιουργία διαχρονικών δεδομένων μέσω αυτής της εφαρμογής και του εργαλείου της band math με την χρήση εικόνων ραντάρ του δορυφόρου Sentinel-1A από την πλατφόρμα Copernicus Hub. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η τεχνική θα εφαρμοστεί πιλοτικά για το νησί της Σαντορίνης καλύπτοντας το πρώτο εξάμηνο του 2017, το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω του ηφαιστείου. Ο υπολογισμός της εδαφικής παραμόρφωσης μέσω των συμβολογραφημάτων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κομμάτι για την εκτίμηση του ηφαιστειακού κινδύνου. Αυτή η διαδικασία θα προσφέρει την ικανότητα στον χρήστη να χρησιμοποιεί το λογισμικό όχι μόνο για την δημιουργία απλών συμβολογραφημάτων αλλά και για πιο σύνθετες διαδικασίες, όπως η δημιουργία διαχρονικών δεδομένων χωρίς την χρήση άλλων εμπορικών λογισμικών.

**Λέξεις κλειδιά :** Sentinel-1, SNAP, Συσσώρευση φάσεων, διαχρονικά δεδομένα, ηφαίστειο Σαντορίνης

#### ABSTRACT

The rapid development of technology has offered significant new potential, such as the existence of free software and satellite data, through which earth observation from space has developed, thus contributing to the monitoring of dangerous natural phenomena. SNAP free software is a new application in the scientific community of geoinformatics, with which the user can process satellite images and radar images. The purpose of the current project is to create intertemporal data through this application and its tool, band math, with the use of satellite images by Sentinel-1A satellite from the Copernicus Hub platform. More specifically, this technique will be piloted on the island of Santorini covering the first semester of 2017, which is of great interest because of the volcano. The calculation of ground deformation via interferograms is a very important parameter for the assessment of volcanic danger. This procedure will enable the user to use the software not only for the creation of simple interferograms but also for more complex procedures, like the creation of intertemporal data without the use of other commercial software.

**Key words:** Sentinel-1, SNAP, phase accumulation, multi-temporal interferometry, Santorini volcano

## Συντομογραφίες

DEM	Digital Elevation Model
EOS	Earth Observation System
ESA	European Space Agency
InSAR	Interferometry Synthetic Aperture Radar
LOS	Line of Sight
NASA	National Aeronautics and space Administration
SAR	Synthetic Aperture Radar
SLC	Single Look Complex
SNAP	Sentinel Application Platform
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TOPSAR	Terrain Observation with Progressive scans SAR

## 1.Εισαγωγή

### 1.1 Σκοπός

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η δημιουργία διαχρονικών δεδομένων συμβολομετρίας στο ελεύθερο λογισμικό SNAP της Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (ESA), με την χρήση ελεύθερων και ανοιχτών δεδομένων του δορυφόρου Sentinel-1 μέσω της πλατφόρμας Copernicus Hub. Τα multi-temporal δεδομένα ουσιαστικά, δημιουργούνται από συσσώρευση φάσεων ζευγών συμβολομετρίας με σχετική μικρή χρονική απόσταση μεταξύ τους. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μείωση των τεχνικών θεμάτων τα οποία δημιουργούνται στα απλά συμβολογραφήματα που καλύπτουν μεγάλα χρονικά διαστήματα όπως, η συνάφεια (coherence) λόγο χρονικού αποσυσχετισμού (temporal decorellation) ο οποίος ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό για τις πιθανές μεταβολές στην κάλυψη γης. Το βασικότερο πλεονέκτημα μιας τέτοιας τεχνικής με περισσότερα ζεύγη είναι η επίτευξη καλύτερης συνάφειας.

Βασικά εργαλεία αυτής της εργασίας αποτελούν η χρήση του ελεύθερου λογισμικού SNAP και τα ελεύθερα δεδομένα SAR από την πλατφόρμα Copernicus Hub (https://scihub.copernicus.eu), τα οποία παρουσιάζουν ένα πιο φιλικό και προσβάσιμο περιβάλλον για τον χρήστη. Πρέπει να τονιστεί επίσης, ότι η κοινή πρακτική της εφαρμογής SNAP μέχρι τώρα ήταν για την απλή δημιουργία συμβολογραφημάτων, ενώ για πιο σύνθετες διαδικασίες όπως είναι η δημιουργία multi-temporal δεδομένων χρησιμοποιούνται άλλα εμπορικά λογισμικά. Ακριβώς σε αυτό θέλει να συμβάλει αυτή η εργασία, δημιουργώντας διαχρονικά δεδομένα μέσα από το SNAP.

Πιο συγκεκριμένα, σε αυτή την εργασία θα χρησιμοποιηθούν 7 εικόνες ραντάρ SLC καλύπτοντας το χρονικό διάστημα από τον Ιανουάριο μέχρι τον Ιούνιο του 2017 για το νησί της Σαντορίνης. Ο τελικός στόχος είναι δημιουργία 6 μεμονωμένων συμβολογραφημάτων με βάση απλά ζεύγη με σκοπό στην συνέχεια να προστεθούν οι φάσεις τους μέσω του εργαλείου band\_math.

Οι επιστημονικοί στόχοι της εργασίας χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες:

- Την δημιουργία έξι διαδοχικών χρονικά συμβολογραφημάτων της Σαντορίνης για το πρώτο εξάμηνο του 2017 και αξιολόγηση τους.
- Την πρόσθεση όλων των συμβολογραφικών φάσεων σε ένα αρχείο
- Την πρόσθεση όλων των φάσεων με την χρήση εργαλείο band\_math του λογισμικού για τον υπολογισμό της συνολικής φάσης.
- Τέλος, την εμφάνιση της διαχρονικής συμβολογραφικής εικόνας στην οποία θα εμφανίζεται η διαχρονική εδαφική συμπεριφορά της περιοχής.

### 1.2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η μελέτη των ηφαιστείων με την χρήση της τηλεπισκόπησης αποτελεί ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για τους επιστήμονες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ύπαρξη πολλών εργασιών – ερευνών πάνω στην διαχρονική παρατήρηση ηφαιστείων με την χρήση δορυφορικών δεδομένων.

Κάποιες από τις πιο σημαντικές έρευνες μέσα σε αυτά τα χρόνια που σχετίζονται με τα στοιχεία της συγκεκριμένης εργασίας είναι και αυτή των Jo et al.(2015) Στην οποία οι επιστήμονες μελετούν το ηφαίστειο Kīlauea δημιουργώντας διαχρονικά συμβολογραφήματα χρησιμοποιώντας Multi-temporal Cosmo-Sky Med X-band SAR δεδομένα από φθίνουσες και ανοδικές τροχιές (descending, ascending). Με αποτέλεσμα να δημιουργήσουν 3D χάρτες με την βοήθεια των InSAR που υπολόγισαν την εδαφική παραμόρφωση που προκλήθηκε από την έντονη ηφαιστειακή δραστηριότητα. Όπως και αυτή των Borgstrom et.al. (2017) κατά την οποία μελετάτε η συμβολομετρική απόδοση των δορυφόρων Sentinel-1A/B στο ηφαίστειο Βεζούβιος της Νότιας Ιταλίας.

Πιο συγκεκριμένα όσον αναφορά το νησί της Σαντορίνης έχουν γραφτεί αρκετές μελέτες στην διάρκεια των ετών. Αποτελεί ένα νησί με ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγο της θέσης του και φυσικά λόγο του ηφαιστείου. Οι Παπαγεωργίου et al.(2012) έχουν μελετήσει διαχρονικά την εδαφική παραμόρφωση του νησιού από το 1992 μέχρι και το 2011 με την χρήση εικόνων ραντάρ ERS-1 και -2 και ENVISAT και με την χρήση του αλγορίθμου SVD (Singular Value Decomposition). Καταλήγοντας πως κατά την διάρκεια των ετών 1992-2010 υπάρχει μια παραμόρφωση της τάξης των 5 mm / έτος καθίζησης στο νότιο τμήμα της Νέας Καμμένης, ενώ το 2011 που χαρακτηρίζεται ως περίοδο αναταραχής παρατηρήθηκε έντονη αύξηση 4,8 cm σε όλη τη Νέα Καμένη.

Οι Parks et al. (2012) παρατηρούν επίσης το νησί διαχρονικά με την χρήση InSAR και GPS για την εδαφική παραμόρφωση και που αυτή οφείλεται δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην πρόσφατη περίοδο αναταραχής του 2011 καταλήγοντας πως η Σαντορίνη έχει δύο φάσης την εκρηκτική και την θολωτή φάση (explosive or domeforming phase).

Μια ακόμα έρευνα που δίνει έμφαση στην περίοδο επαναδραστηριοποίησης(2011-2012) είναι και αυτή των Foumelis et al. (2013) όπου με την χρήση εικόνων ENVISAT και RADARSAT-2 υπολογίζεται ο ρυθμός μεταβολής του όγκου 6 × 106 m3 yr-1 έως 9 × 106 m3 yr-1 στην ανοικτή θάλασσα σε περίπου 1 χλμ. βόρεια της Νέας Καμένης και μεταξύ 3,5 και 3,8 χλμ. βάθος.

Παρόμοια έρευνα με την παραπάνω έχουν δημοσιεύσει και οι Papoutsis et al. (2013) για το χρονικό διάστημα 2011-2012 με την χρήση των τεχνικών Persistent Scatterer Interferometry (PSI) and Small Baseline Subset (SBAS) δημιουργώντας χάρτες παραμόρφωσης εδάφους (LOS). Τα αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν ένα καθαρό και μεγάλο σήμα φουσκώματος, μέχρι 150mm / έτος στο LOS, με ακτινικό σχήμα προς τα έξω από το κέντρο της καλντέρας.

Οι Nomikou et al.(2014) παρουσιάζουν στοιχεία τα οποία τεκμηριώνουν την ύπαρξη τριών νέων υποβρύχιων ροών λάβας τα οποία θα μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση μελλοντικών θολωτών εκρήξεων. Έρευνα η οποία τους οδήγησε σε δύο ακόμα δημοσιεύσεις, μία το 2016 η οποία αναφερόταν στην δημιουργία της καλντέρας της Σαντορίνης και στο τσουνάμι το οποίο μπορεί να πραγματοποιήθηκε και άλλη μια το 2017 η οποία μελετά την σημαντικότητα του υποθαλάσσιου ηφαιστείου Kolumbo το οποίο βρίσκεται κοντά στην περιοχή της Νέας Καμμένης και την παρατήρηση του για τυχόν μελλοντικές εκρήξεις.

Οι Papadimitriou et al.(2015) δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στα σεισμικά γεγονότα που πλαισίωσαν την περίοδο αναταραχής το 2010-2012 παρατηρώντας πως η μεγαλύτερη σεισμική δραστηριότητα παρουσιάζεται βορειοανατολικά και νοτιοδυτικά της Καλδέρας της Σαντορίνης από την τελευταία έκρηξη του ηφαιστείου το 1950.

Τέλος, οι Parks et al.(2014) παρουσιάζουν μια εικοσαετή έρευνα πάνω στο ηφαίστειο της Σαντορίνης παρατηρώντας τις περιόδους ηρεμίας και τις περιόδους αναταραχής αντίστοιχα. Δίνοντας ιδιαίτερη σημασία στην περιοχή ανύψωσης κατά την περίοδο αναταραχής η οποία βρίσκεται βόρεια της Νέας Καμένης κατά 4 χλμ. Παρουσιάζοντας ένα πρώτο παλμό που αντιστοιχεί σε μια πρώτη μεταβολή του όγκου ΔV σε ένα ρηχό θάλαμο μάγματος (11,56 ± 0.14) × 106m3, ενώ ο δεύτερος παλμός έχει ΔV (9.73 ± 0.10) × 106m3

#### 1.3 Τηλεπισκόπηση και ηφαίστεια

Τα ηφαίστεια αποτελούν ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο σχηματίζεται από λιωμένα ζεστά πετρώματα από τον ανώτερο μανδύα της γης και βρίσκουν διέξοδο προς την επιφάνεια. Υπολογίζεται πως υπάρχουν πάνω από 600 ενεργά ηφαίστεια σε όλο τον πλανήτη. (Παρχαρίδης, 2015) Τα ηφαίστεια πολλές φορές καθίστανται απρόσιτα για τους ερευνητές λόγω των έντονων και βίαιων διεργασιών και των εκρήξεων τους καθιστώντας έτσι τις εφαρμογές της τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιούν θερμική και μέση υπέρυθρη ακτινοβολία την ιδανική λύση για την κατανόηση του φαινομένου. Κατά την διάρκεια των χρόνων έχουν προκαλέσει μεγάλα προβλήματα και ένα από τα σημαντικότερα είναι οι ανθρώπινες απώλειες. Αξιοσημείωτο παράδειγμα στο πρόσφατο παρελθόν είναι η έκρηξη του ηφαιστείου Νιραγκονγκο το οποίο βρίσκεται στην Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό, με την έκρηξη που έκανε το 2002 κάλυψε το 40% της πόλης Γκόμα και 245 κάτοικοι έχασαν την ζωή τους. Έτσι είναι αναγκαία η παρακολούθηση τους με όλα τα διαθέσιμα μέσα.

Κατανοώντας λοιπόν οι επιστήμονες την σημαντικότητα και την επικινδυνότητα των φαινομένων θεώρησαν αναγκαία την παρακολούθηση αυτών με την τακτική συλλογή θερμικών δεδομένων σε υψηλή συχνότητα. Τα κράτη ανά τον κόσμο έχουν την ανάγκη όλων αυτών των δεδομένων όχι μόνο για την παρακολούθηση των εκρήξεων αλλά και για την δυνατότητα χαρτογράφησης των επικίνδυνων περιοχών με αποτέλεσμα την παραγωγή προγνωστικών διαγραμμάτων ώστε να προφυλάσσονται οι κοντινές περιοχές.

Αρκετές δεκαετίες πριν, κάτι τέτοιο ήταν εφικτό μόνο με την χρήση δεδομένων χαμηλής χωρικής ανάλυσης από μετεωρολογικούς δορυφόρους οι οποίοι συλλέγαν δεδομένα είτε σε ωριαία είτε σε καθημερινή βάση. Οι πρώτοι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρακολούθηση ηφαιστείων ήταν οι AVHRR, TM και GOES-class με τον καθένα να μπαίνει σε τροχιά το 1960, το 1972 και το 1974 αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα οι αισθητήρες AVHRR με την τροχιά τους καλύπτουν την γη δεκατέσσερις φορές την ημέρα με υψόμετρο 833χλμ και πλάτος περιστροφής 2399χλμ περνώντας από το ίδιο σημείο της επιφάνειας της γης κάθε δώδεκα ώρες (κάτι απολύτως απαραίτητο στην παρακολούθηση των ταχέων μεταβαλλόμενων ηφαιστείων). (Blackett, 2017) Την δεκαετία του εβδομήντα η NASA ξεκινάει το πρόγραμμα Landsat όπου ο δορυφόρος διέθετε SWIR και TIR bands στον αισθητήρα του θεματικού χαρτογράφου (TM) ειδικά για θερμικές μελέτες χωρητικότητας 30 και 120 μέτρων αντίστοιχα. Ακόμα, στην ίδια δεκαετία τέθηκαν σε λειτουργία αρκετοί γεωστατικοί δορυφόροι για μετεωρολογικούς σκοπούς κυρίως, από αυτούς πιο πολύ χρησιμοποιήθηκε ο GOES της NASA στην παρακολούθηση των ηφαιστείων λόγο των πολύ τακτικών λήψεων εικόνων (τέσσερις φορές ανά ώρα)παρόλο που είχαν χαμηλή χωρική ανάλυση. Αξίζει να σημειωθεί ότι το 1988 λειτουργεί το πρώτο αυτοματοποιημένο σύστημα για την επεξεργασία δεδομένων GOES με σκοπό την παρακολούθηση της παγκόσμιας ηφαιστειακής δραστηριότητας, στον Ινστιτούτο Γεωφυσικής και Παλαιοντολογίας στην Χαβάη από τότε αρκετές μελέτες έχουν επιβεβαιώσει την χρησιμότητα του στην εύρεση διαχρονικών παρατηρήσεων. Το 1986 η NASA ανακοινώνει τα σχέδια της για το EOS (Earth Observation System) το οποίο τίθεται σε λειτουργία το 1999, καθώς τα δεδομένα ανεβαίνουν στο διαδίκτυο αξιοποιούνται άμεσα για την μελέτη των ηφαιστείων. Τέσσερις από τους αισθητήρες του EOS είναι κατάλληλοι για την παρακολούθηση των ηφαιστείων, αυτοί είναι: ο Aster (επί του δορυφόρου Terra), ο MODIS (επί των δορυφόρων Terra και Aqua), καθώς και οι αισθητήρες ALI και Hyperion (επί του δορυφόρου EO-1). Ο MODIS είναι από τους πιο χρήσιμους αισθητήρες λόγω των συχνών λήψεων τους (εώς και τέσσερις φορές όταν εξετάζονται και οι δύο αισθητήρες) αυτό συνέβαλλε στην ευρεία χρήση τους με αποτέλεσμα την δημιουργία διάφορων προγραμμάτων- προϊόντων που επεξεργάζονται θερμικά δεδομένα MODIS όπως είναι το MODIS FIRE PRODUCTS το οποίο παρουσιάζει πίνακες με όλα τα θερμικά ανώμαλα εικονοστοιχεία μίας εικόνας. (Blackett, 2017) Τα εργαλεία MODIS χρησιμοποιούνται πλέον για πάνω από 15 χρόνια επιτρέποντας στους επιστήμονες να παρακολουθούν αυτόματα την ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Εκτός από τις προσπάθειες της Αμερικής όσο αναφορά την τηλεπισκόπηση εμφανίζονται και άλλες χώρες στο προσκήνιο. Το 1991 με 1995 η ευρωπαϊκή διαστημική υπηρεσία (ESA) εγκαινιάζει τον ERS (European Remote Sensing) 1 και 2 όπου καθένας από αυτούς διέθετε Along Track Scanning Radiometer (ATSR), εξοπλισμένο με ζώνες MIR και TIR καθώς και μία ζώνη SWIR. Λόγω της επιτυχίας αυτών των δύο το 2002 δρομολογείται και ένας τρίτος ATSR με χωρική ανάλυση 100m\*100m όπως και οι δύο προηγούμενοι και βελτιωμένη χρονική ανάλυση σε σχέση με αυτή του Landsat TM αφού μιλάμε για την περίοδο πριν το MODIS. Πέραν όμως της Ευρώπης και της Αμερικής στον χώρο δεν αργεί να μπει και η Ιαπωνία το 1991 με την εκτόξευση του Οπτικού αισθητήρα (OPS) επί του ιατρικού δορυφορικού δορυφόρου Earth Resources (JERS-1).

Με την πορεία των χρόνων οι δορυφόροι πλήθυναν όπως και οι εφαρμογές τους αυτό είχε σαν αποτέλεσμα πολλά δεδομένα να διατίθενται με πολύ χαμηλότερο κόστος ή ακόμα και δωρεάν. Όπως για παράδειγμα τα δεδομένα του MODIS και του Landsat διατίθενται δωρεάν από την NASA. Ακόμα δωρεάν είναι και τα δεδομένα του Sentinel-1 και του Sentinel-2 δορυφόροι οι οποίοι ανήκουν στην Ευρωπαϊκή ένωση μέσω του προγράμματος Copernicus με τον πρώτο να τίθεται σε λειτουργία το 2014 και τον δεύτερο το 2015. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι μέχρι και σήμερα δεν υπάρχει συγκεκριμένος δορυφόρος που να είναι αποκλειστικά κατάλληλος για την παρακολούθηση των ηφαιστείων παρ' όλα αυτά σήμερα ο παγκόσμιος οργανισμός παρακολούθησης ηφαιστείων περιλαμβάνει πάνω από 70 παρατηρητήρια και εθνικές υπηρεσίες παρακολούθησης περιλαμβάνοντας και τα 9 Ash Advisory Centers (VAAC'S). (Pyle et.al, 2013)

#### 1.4 Θεωρητικό υπόβαθρο

#### 1.4.1 Θεωρία των SAR

Η τηλεπισκόπηση με ραντάρ προσφέρει μερικά μοναδικά χαρακτηριστικά και οφέλη, όπως ανεξάρτητα από τον καιρό ή το φως του ήλιου μπορεί να υπάρξουν εικόνες ή ότι οι αισθητήρες SAR εκπέμπουν και δέχονται κύματα στο μικροκυματικό τμήμα το οποίο αποτελείται από τις ζώνες P, L, S, C, X, K, Q, V και W . Οι ζώνες αυτές συμβολίζονται με γράμματα τα οποία έχουν αποδοθεί τυχαία και αυθαίρετα, αλλά παρουσιάζει επίσης ορισμένα ζητήματα και ιδιαιτερότητες που πρέπει να περιγραφούν για να αποφευχθεί η σύγχυση. Σε αντίθεση με τους οπτικούς αισθητήρες, τα συστήματα απεικόνισης SAR μεταδίδουν και δέχονται ακτινοβολία από γωνία και δεξιά κατά μήκος της κατεύθυνσης της δορυφορικής πλατφόρμας. Αυτός ο τρόπος λήψης εικόνων επιτρέπει δύο διαφορετικές γεωμετρικές προβολές (LOS)), (α) την αύξουσα, όταν ο δορυφόρος μετακινείται από το νότο στο βορρά (ascending) και (β) την φθίνουσα, όταν ο δορυφόρος μετακινείται από βορρά προς νότο (descending). Η κλίση της κεραίας σε σχέση με το nadir ονομάζεται γωνία πρόσπτωσης και στα περισσότερα συστήματα SAR κυμαίνεται από 20 ° έως 50 °. Η διεύθυνση της απόστασης (range) είναι κάθετη στη διεύθυνση τροχιάς (A) της πλατφόρμας, ενώ η διεύθυνση του αζιμούθιου (azimuth) είναι παράλληλη σε αυτήν. Η γεωμετρία της πλάγιας εικονοληψίας είναι χαρακτηριστική για όλα τα συστήματα SAR. Το τμήμα της εικόνας που βρίσκεται κοντά στο ναδίρ ονομάζεται «εγγύς περιοχή» (near range) ενώ το μακρύτερο τμήμα ονομάζεται «άπω περιοχή» (far range).

Μια απεικόνιση Radar αποτελείται από μία εικόνα στην οποία η ισχύς του σήματος που επανασκεδάζεται (backscatter) από ένα αντικείμενο καθορίζει το ψηφιακό αριθμό (DN) για κάθε κυψελίδα. Η ισχύς εξαρτάται από πολλούς παράγοντες μεταξύ των οποίων είναι οι παράμετροι παρατήρησης (όπως μήκος κύματος, συχνότητα, πόλωση, προσπίπτουσα γωνία του εκπεμπόμενου κύματος) και οι επιφανειακές παράμετροι (όπως ανάγλυφο-τραχύτητα, γεωμετρικό σχήμα και διηλεκτρικές ιδιότητες των αντικειμένων). Επιπλέον, ανάλογα με το μήκος κύματος η ακτινοβολία διεισδύει στο επιφανειακό υλικό σε διάφορα βάθη.(Παρχαρίδης, 2015)

Οι τιμές εύρους εξαρτώνται από τον προσανατολισμό, την τραχύτητα, το μέγεθος και τις διηλεκτρικές ιδιότητες (π.χ. νερό έναντι ξηρής βλάστησης) των διασκορπιστών στην επιφάνεια της γης. Φυσικά, οι αστικές περιοχές και τα βραχώδη περιβάλλοντα παρουσιάζουν έντονα πλάτη, ενώ οι ομαλές επίπεδες επιφάνειες, όπως το ήρεμο νερό, υποδηλώνουν χαμηλές τιμές πλάτους, καθώς η ακτινοβολία αντικατοπτρίζεται κυρίως από το ραντάρ. Τα εργαλεία SAR είναι συνεκτικά συστήματα τα οποία μπορούν να καταγράψουν όχι μόνο το εύρος αλλά και τη φάση ενός καταγεγραμμένου σήματος. Η τιμή φάσης είναι η μέτρηση του χρόνου που η ηχώ που μεταδίδεται από μια κεραία ραντάρ χρειάζεται να φτάσει στα αντικείμενα εδάφους και στη συνέχεια να επιστρέψει στο ραντάρ. Η φάση είναι το κλειδί που μπορεί να παρατηρηθεί σε όλες τις τεχνικές συμβολομετρικής SAR (Ferretti 2007). Επιπλέον, τα όργανα ραντάρ μπορούν να σχεδιαστούν για να μεταδίδουν και να λαμβάνουν κύματα σε διαφορετικούς προσανατολισμούς του ηλεκτρικού πεδίου. Μεταβάλλοντας την πόλωση ενός μεταδιδόμενου σήματος, είναι δυνατόν να ληφθούν πληροφορίες σχετικά με τις πολωσιμετρικές ιδιότητες των παρατηρούμενων επιφανειών. Συχνά, τα συστήματα SAR είναι μονοπολικά, πράγμα που σημαίνει ότι μεταδίδουν είτε οριζόντια είτε κατακόρυφα πολωμένα κύματα και λαμβάνουν τα ίδια (HH ή VV).

Παρ΄ όλα αυτά, υπάρχουν συστήματα SAR που μπορούν να είναι πλήρως πολωσιμετρικά και να λειτουργούν σε όλους τους τρόπους πόλωσης: HH, VV, HV, VH. Αναπόφευκτα, λόγω της διαμόρφωσης της γωνίας θέασης της επιφάνειας της γης, θα υπάρχουν αρκετές γεωμετρικές στρεβλώσεις στις εικόνες SAR οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε παρερμηνείες του εδάφους. Επομένως, είναι σημαντικό να εξηγηθεί πώς συμβαίνουν αυτά τα σφάλματα και πώς επηρεάζουν τα αντικείμενα που απεικονίζονται στις εικόνες. Τέτοια προβλήματα είναι:

- Foreshortening: Αυτή η επίδραση προκαλεί τη συμπίεση της εικόνας που έχει ως αποτέλεσμα την εσφαλμένη αναπαράσταση μήκους επιφάνειας.
- ii) Layover: αυτή η παραμόρφωση συμβαίνει όταν το σήμα ραντάρ φτάσει στην κορυφή ενός βουνού προτού φτάσει στη βάση , πράγμα που σημαίνει ότι το σήμα από την κορυφή θα επιστρέψει στην κεραία ραντάρ νωρίτερα από εκείνη από τη βάση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αναστροφή της επιφάνειας των ορεινών περιοχών.
- iii) Shadow: Η σκιά ραντάρ παρουσιάζεται όταν η δέσμη ραντάρ δεν είναι σε θέση να φωτίσει τμήματα της επιφάνειας του εδάφους λόγω των υψηλών γωνιών του. Αυτό το φαινόμενο προκαλεί την εμφάνιση κατακόρυφων χαρακτηριστικών ή λόφους στο έδαφος στο σκοτάδι σε εικόνες ραντάρ, καθώς δεν υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια για την επανασύνδεση.

## 1.4.2 Εισαγωγή στην Θεωρία των InSAR

## • Συμβολομετρία SAR (InSAR)

Η τεχνική InSAR, είναι μια τεχνική που μετρά τη διαφορά φάσης μεταξύ δύο εικόνων φάσης SAR που αποκτήθηκαν σε διαφορετικούς χρόνους των ίδιων εικονοστοιχείων εδάφους της επιφάνειας της Γης . Γενικά, υπάρχουν δύο μέθοδοι για την απόκτηση ενός συμβολομετρικού ζεύγους:

1) συμβολομετρία μονής διέλευσης (single-pass interferometry)

2) συμβολομετρία επαναλαμβανόμενης διέλευσης (repeat pass interferometry)

Στην πρώτη μέθοδο, το ίδιο σύστημα SAR χρησιμοποιεί δύο κεραίες για να μεταδίδει και να λαμβάνει το σήμα με ένα μόνο πέρασμα πάνω από μια περιοχή. Στη δεύτερη

μέθοδο, ο αισθητήρας SAR περνάει επανειλημμένα από την ίδια περιοχή για να αποκτήσει τα συμβολομετρικά ζεύγη. (Bamler and Hartl 1998, Rosen et al., 2000).

Πρακτικά η «ένωση» των δύο εικόνων πραγματοποιείται με τον πολλαπλασιασμό της μιας εικόνας με τη συζυγή μιγαδική της άλλης. Συγκεκριμένα, γίνεται ένας διαγώνιος πολλαπλασιασμός φατνίο επί φατνίο της πρώτης με τη δεύτερη εικόνα, δηλαδή το εύρος της πρώτης επί της δεύτερης, ενώ η φάση της προκύπτει από τη συμβολομετρική φάση (interferometric phase). Αυτή η «νέα» σύσταση της εικόνας ονομάζεται συμβολογράφημα (interferogram) και η μορφή της αποτελείται από μια συνεχόμενη επιφάνεια καμπυλών ίσης φάσης που ονομάζονται και κροσσοί. (Παρχαρίδης, 2015)



**Εικόνα 1** Γεωμετρία δορυφορικού συμβολομετρικού συστήματος SAR (Παρχαρίδης, 2015)

Επιπλέον, το εύρος των τιμών της συμβολομετρικής συνάφειας είναι μεταξύ 0 και 1. Το εύρος αυτό προσδιορίζει τη σταθερότητα του σήματος που σκεδάζεται στον αισθητήρα του SAR για μία περιοχή μελέτης. Οι τιμές πολύ κοντά στο 0 εμφανίζουν μια μη συσχετιζόμενη εικόνα ενώ οι τιμές κοντά στο 1 ανταποκρίνονται σε ένα σταθερό σήμα που σκεδάζεται από την περιοχή. Όπως γίνεται αντιληπτό η ποιότητα της συμβολομετρικής συνάφειας συνδέεται άμεσα με τον θόρυβο της συμβολομετρικής φάσης. Θορυβώδεις περιοχές συνδέονται με χαμηλή συμβολομετρική συνάφεια και το αντίστροφο. Επομένως και ο υπολογισμός της συμβολομετρικής συνάφειας θα περιέχει μια σειρά από παραμέτρους, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται οι πηγές θορύβου της συμβολομετρικής φάσης. Οι παράγοντες που πλαισιώνουν την τελική τιμή της συμβολομετρικής συνάφειας αποτυπώνουν και έναν λόγο/αιτία μη αποσυσχέτισης (decorellation) της συμβολομετρικής φάσης και είναι οι εξής (Παρχαρίδης, 2015):

 $\gamma$  total =  $\gamma$  temporal +  $\gamma$  geometric+  $\gamma$  volume+  $\gamma$  thermal+  $\gamma$  processor+  $\gamma$  DC

Οι παραπάνω παράγοντες αφορούν τα εξής:

γ\_temporal Χρονική αποσυσχέτιση που προκαλείται από φυσικές αλλαγές στο έδαφος, οι οποίες επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας των σκεδαστών.

γ\_geometric Γεωμετρικά μη συσχετιζόμενη συνάφεια είναι η διαφορά στις γωνίες εικονοληψίας των δύο συστημάτων για την ίδια γεωγραφική περιοχή.

γ\_volume Αποσυσχέτιση όγκου (volume decorrelation), όταν τα αντικείμενα σκεδαστές καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο στην επίπεδη επιφάνεια του συμβολογραφήματος.

γ\_thermal Θερμικός θόρυβος (thermal noise) που προκαλείται από τα χαρακτηριστικά του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των χαρακτηριστικών της κεραίας.

γ\_processor Αποσυσχέτιση επεξεργασίας από τον επεξεργαστή, που απορρέει από την επιλογή των αλγορίθμων για μια σειρά επεξεργασιών πχ. Coregistration, interpolation, κ.λπ.

γ\_DC Doppler Centroid decorrelation που προκαλείται από τα διαφορετικά Doppler κεντροειδή μεταξύ των δύο συστημάτων.

## • Διαφορική Συμβολομετρία SAR (DInSAR)

Η διαφορική συμβολομετρία αποτελεί μια πιο εξελιγμένη τεχνική της απλής συμβολομετρίας. Ο σκοπό αυτής της τεχνικής είναι ο εντοπισμό των μετακινήσεων της επιφάνειας λόγω γεωφυσικών φαινομένων ή ανθρώπινων παρεμβάσεων. Η ιδέα για την εξέλιξη της διαφορικής συμβολομετρίας πηγάζει από την παραδοχή ότι αν η τοπογραφία είναι γνωστή, η αντίστοιχη φάση που διαμορφώνει την τοπογραφία στην INSAR μπορεί να αφαιρείται από τη συμβολομετρική φάση αποτυπώνοντας την παραμόρφωση του εδάφους της επιφάνειας. Αυτή ακριβώς η «διαφορική» τεχνική της InSAR ονομάζεται διαφορική συμβολομετρία (Differential InSAR technique (DInSAR)).

Γίνεται διάκριση μεταξύ διαφορικής συμβολομετρίας (differential InSAR technique – DInSAR) και συμβατικής «απλής» συμβολομετρίας InSAR είναι καθαρά για τεχνικούς λόγους και εφαρμογών. Διότι η «υπόσταση» της συμβολομετρίας αποτελεί εγγενώς διαφορική τεχνική. Επομένως η τεχνική DInSAR κληρονομεί, ως εξέλιξη της InSAR, όλα τα πλεονεκτήματα αλλά και όλα τα μειονεκτήματα, όπως ο θόρυβος, οι παράγοντες αποσυσχέτισης, κ.λπ.



Εικόνα 2 Γεωμετρία διαφορικής συμβολομετρίας (Crosetto et al. 2005)

Ο πρώτος δορυφόρος που αναφέρεται ως master (M) αποκτά την πρώτη εικόνα SAR σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (t0) και μετρά την αντίστοιχη φάση (ΦM). Εάν λόγω ενός γεγονότος D (t) που προκαλεί παραμόρφωση, το σημείο P μετακινείται στο P1. Ένας δεύτερος δορυφόρος ο οποίος συνήθως αναφέρεται ως υποτελής (S) αποκτά τη δεύτερη εικόνα SAR πάνω από τον ίδιο σε συγκεκριμένο χρόνο (t) και μετρά την αντίστοιχη φάση (ΦS). Οι τεχνικές InSAR εκμεταλλεύονται τη διαφορά φάσης των ΦΜ και ΦS σχηματίζοντας έτσι τη συμβολομετρική φάση ΔφΙηt. Αν υποθέσουμε ότι το έδαφος παραμένει σταθερό μετά το συμβάν D (t), τα σημεία P1 και P πρέπει να επικαλύπτονται και η διαφορά φάσης να συνδέεται με τη διαφορά απόστασης SP-MP, η οποία είναι το βασικό συστατικό για τη δημιουργία DEM χρησιμοποιώντας το InSAR. Στην περίπτωση όπου το σημείο P μετακινείται στην P1 μεταξύ δύο σκηνών SAR, εκτός από το τοπογραφικό στοιχείο φάσης Φ΄ση, η ΔφΙηt περιλαμβάνει επίσης την παραμόρφωση του εδάφους συνεισφορά ΔΦ. Όταν είναι διαθέσιμο ένα DEM, το στοιχείο ΦΤορο μπορεί να προσομοιωθεί και να αφαιρεθεί από το ΔφΙηt και έτσι να ληφθεί η φάση DInSAR ΔφD-Int.

 $\Delta \varphi D$ -Int=  $\Delta \varphi$  Int -  $\Delta \varphi$  topo\_sim =  $\Delta \varphi$  deformation +  $\Delta \varphi$  atmosphere +  $\Delta \varphi$  noise +  $\Delta \varphi$  res\_topo

Δφ topo: Το στοιχείο τοπογραφικής φάσης που επιτρέπει τη δημιουργία DEM
ή DTM από δεδομένα InSAR που εξαρτάται από τη βασική γραμμή. Όσο μεγαλύτερη
είναι η γραμμή βάσης, μπορούν να εντοπιστούν οι μικρότερες παραλλαγές στην
τοπογραφία.

Δφ atmosphere: Όταν οι δύο εικόνες αποκτώνται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, η κατάσταση της ατμόσφαιρας δεν είναι ίδια. Ως εκ τούτου, οποιαδήποτε διαφορά στην τροπόσφαιρα ή την ιονόσφαιρα μεταξύ των δύο αποκτήσεων εικόνας μπορεί να αλλάξει το εμφανές μήκος της διαδρομής μεταξύ της κεραίας ραντάρ και της γης.

• Δφnoise: Είναι η διαφορά φάσης που τυπικά κυριαρχείται από τα φαινόμενα διακόσμησης που διευκρινίζονται παρακάτω.

Δφdeformation: Είναι η φάση που πρέπει να απομονωθεί από όλες τις άλλες συνιστώσες φάσης προκειμένου να υπολογιστεί η ποσότητα της παραμόρφωσης σε μια περιοχή

• Δφ res\_topo: Αντιπροσωπεύει το υπολειπόμενο στοιχείο λόγω σφαλμάτων στη προσομοίωση (Hooper et al. 2012)

#### 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

#### 2.1 Γεωδυναμικό πλαίσιο του ηφαιστείου της Σαντορίνης

Η Σαντορίνη βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα του Ελληνικού ηφαιστειακού τόξου στο Νότιο Αιγαίο, 140km βόρεια της Κρήτης. Πρόκειται για ένα σύμπλεγμα 5 νήσων την Θήρα, την Θηρασιά, το Ασπρονήσι, την Παλαιά και την Νέα Καμένη. Το κύριο νησί είναι η Θήρα το οποίο καλύπτει έκταση 77 τ.χλμ. με τον πληθυσμό της να ανέρχεται στους 15.000 κατοίκους. Αποτελεί έναν από τους πιο δημοφιλείς τουριστικούς προορισμούς στην Ευρώπη, ιδιαίτερα γνωστός για τα εντυπωσιακά ηλιοβασιλέματα και τις μοναδικά σχηματισμένες παραλίες της.

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα του νησιού οφείλεται στην καταβύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική. Πιο συγκεκριμένα η καταβύθιση γίνεται με ταχύτητα 5 cm/έτος προς τα βορειανατολικά με γωνία 30-40°, το όριο των δύο πλακών βρίσκεται στην ελληνική τάφρο Βόρεια στην Κρήτη. Η Αφρικανική πλάκα λιώνει σε ιδιαίτερα μεγάλο βαθμό με αποτέλεσμα τα λιωμένα πετρώματα να δημιουργούν τα ηφαίστεια των Μεθάνων, της Μήλου, της Νισύρου και της Σαντορίνης το οποίο είναι και το πιο ισχυρό ηφαίστειο του τόξου.

Το σύμπλεγμα της Σαντορίνης στο εσωτερικό του αποτελείται από την Παλαιά και Νέα Καμένη τα οποία τοποθετούνται στην πλημμυρισμένη Καλδέρα η οποία φτάνει τα 300 μέτρα ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Στο σύμπλεγμα ανήκει και το υποθαλάσσιο ηφαίστειο Κολούμπο έκτος από τα πέντε νησιά που αναφέραμε παραπάνω.

Το ηφαίστειο της Σαντορίνης έχει απασχολήσει ιδιαίτερα την επιστημονική κοινότητα και είναι ένα από τα καλύτερα ερευνημένα ηφαίστεια στον κόσμο. Πρέπει να τονιστεί πως το ηφαίστειο θεωρείται ένα από τα πιο επικίνδυνα δυνητικά ηφαίστεια στην Ευρώπη (Druitt et al. 1999). Λόγω της ύπαρξης του ενεργού ηφαιστείου το νησί παρακολουθείται συνεχώς από ένα καλά εξοπλισμένο δίκτυο θερμικών, χημικών, τοπογραφικών και σεισμικών οργάνων τα οποία βρίσκονται διάσπαρτα σε όλο το νησί. Συγκεκριμένα όλο αυτό το δίκτυο συντονίζεται και ελέγχεται από το Ινστιτούτο Μελέτης και Παρακολούθησης του Ηφαιστείου της Σαντορίνης (ISMOSA. V.) το οποίο ιδρύθηκε το 1995.

#### 2.2 Γεωμορφολογία Σαντορίνης

Το νησί της Σαντορίνης καταλαμβάνει έκταση 76,19 τ.χλμ. και το μήκος της ακτογραμμής της ανέρχεται στα 67 χιλιόμετρα. Η περίμετρος του νησιού υπολογίζεται στα 36 ναυτικά μίλια και παρουσιάζει έξι όρμους το Αμμουδί, την Αρμένη, τον όρμο Μουζάκι, τους όρμους Φηρών και Αθηνιού και τον όρμο του Μπάλου.

Γενικά το νησί χαρακτηρίζεται ως από τις πιο άνυδρες περιοχές του Αιγαίου, λόγω της έλλειψης υπόγειων πηγών και των πολύ λίγων βροχοπτώσεων, παρ΄ όλα το έδαφος του νησιού είναι ιδιαίτερα εύφορο και ευνοεί την καλλιέργεια. Το έδαφος του νησιού είναι ηφαιστειογενές, πεδινό στο μεγαλύτερο μέρος του και βραχώδες από την πλευρά του ηφαιστείου. Το ψηλότερο σημείο του νησιού είναι στα 567 μέτρα όπου και βρίσκεται η κορυφή του προφήτη Ηλία το οποίο αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από μάρμαρο. Τα συγκεκριμένα ασβεστολιθικά πετρώματα αποτελούν τα παλαιότερα του νησιού. Ανατολικά το νησί χαρακτηρίζεται από πιο ήπιο ανάγλυφο όπου και βρίσκονται η καλλιεργήσιμες εκτάσεις οι οποίες φτάνουν μέχρι την παραλία (Μπιρτάχα et. al.).



Εικόνα 3: γεωλογικός χάρτης Σαντορίνης (Tom Pfeiffer, 2004)

Πριν την πρώτη ηφαιστειακή δραστηριότητα το νησί παρουσίαζε τελείως διαφορετική εικόνα από την σημερινή. Επρόκειτο για ένα ιδιαίτερα μικρό νησί που αποτελούνταν από μεταμορφωσιγενή πετρώματα, κυρίως μεταμορφωμένους ασβεστόλιθους και σχιστόλιθους. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα του νησιού ξεκίνησε από την περιοχή του Ακρωτηρίου και τις νησίδες Χριστιανά Θήρας. Στην συνέχεια πριν από 500.000 χρόνια περίπου δημιουργήθηκε στα βόρεια του νησιού το ηφαίστειο της Περιστερίας, το οποίο παρήγαγε ανδεσιτικές λάβες. Σήμερα τα υπολείμματα αυτού του ηφαιστείου βρίσκονται στον Μικρό Προφήτη Ηλία και το Μεγάλο Βουνό. Συγχρόνως, φαίνεται ότι υπήρχαν μικρότερα ηφαίστεια – κώνοι σκωρίας τα οποία ήταν ενεργά προς την νότια πλευρά του νησιού, πιο συγκεκριμένα στον Μπάλο, την Κόκκινη παραλία και την Κοκκινόπετρα. Στα 200.00 χρόνια πριν δημιουργείται ένα νέο ασπιδωτό ηφαίστειο που ενώνει όλα τα επιμέρους νησιά. Η φάση αυτή τελειώνει με μια σειρά έντονων εκρήξεων από τις οποίες δημιουργείται η πρώτη καλδέρα (Κονταράτος, 2007). Η ηφαιστειακή δραστηριότητα συνεχίζεται και 180.000 χρόνια πριν αλλά η δεύτερη καλδέρα σχηματίζεται 40.000-60.000 χρόνια πριν πάλι από μια σειρά ισχυρών εκρήξεων. Στην πορεία σχηματίζονται τα ηφαίστεια του Σκάρου και της Θηρασίας τα οποία καταστρέφονται από την έκρηξη του Ρίβα. Τον 17ο αιώνα (1645 π.Χ.) πραγματοποιείται η μινωική έκρηξη, η οποία αποτελεί μια από της γνωστότερες εκρήξεις ηφαιστείων και από τις πιο μελετημένες, αφού πρόκειται για μια από της πιο μεγάλες εκρήξεις των ιστορικών χρόνων η οποία είχε και ιδιαίτερο αντίκτυπο στην Ανατολική Μεσόγειο. Η μινωική έκρηξη έδωσε την Σαντορίνη το σημερινό πεταλοειδές της σχήμα. Ο όγκος των ηφαιστειακών αναβλημάτων υπολογίζεται ανάμεσα σε 39 και 61, ίσως και 99 κυβικά χιλιόμετρα και κάλυψαν με ένα στρώμα πάχους δεκάδων μέτρων τη Σαντορίνη. Η δραστηριότητα κατά τους ιστορικούς χρόνους δημιούργησε τις νησίδες Νέα Καμένη Θήρας και Παλαιά Καμένη Θήρας μέσα στην καλντέρα (Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2013). Η τελευταία φάση εκρήξεων εντοπίζεται μεταξύ των ετών 1925 με 1950 με τέσσερις εκρηκτικές περιόδους. Η μεγαλύτερη ήταν αυτή στις 10 Ιανουαρίου το 1950 όπου ανατινάχθηκε το οξύ πέτρωμα στους νότιους πρόποδες του τρούλου της Νίκης, ανοίγοντας νέα διέξοδο για το μάγμα. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της έκρηξης αποτελεί η εκτόξευση της ηφαιστειακής τέφρας στα 1000 μέτρα προς τον αέρα και τα θραύσματα λάβας που έπεσαν σε ακτίνα 850 μέτρων γύρω από την περιοχή. Από τότε μέχρι και σήμερα το ηφαίστειο βρίσκεται σε φάση ηρεμίας παρ΄ όλα αυτά τον Ιανουάριο του 2011 το ηφαίστειο παρουσιάζει έντονη σεισμική δραστηριότητα και ιδιαίτερη ανύψωση του εδάφους. Με την βοήθεια τον δεδομένων ENVISAT υπολογίζεται πως είχαμε ανύψωση του εδάφους περίπου στα 14cm μέχρι και τον Μάρτιο του 2012 μετά από αυτό παρατηρείται καθίζηση του εδάφους οπού και το ηφαίστειο επανέρχεται σε φάση ηρεμίας (Foumelis et.al. 2012).



**Εικόνα 4:** εδαφική παραμόρφωση στην Σαντορίνη τον Μάρτιο του 2012 (Foumelis, 2013)

## 2.3 Παρακολούθηση του ηφαιστείου της Σαντορίνης

Όπως αναφέραμε και παραπάνω το ηφαίστειο της Σαντορίνης αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ηφαίστεια της Ευρώπης και έχει αποτελέσει σημείο πολλών ερευνών και συνεχίζει να αποτελεί. Λόγω λοιπόν, της επικινδυνότητας του αλλά και λόγο της ιδιαίτερης φύσης του το ηφαίστειο παρακολουθείται σε καθημερινή βάση από δεκάδες φυσικοχημικά όργανα.

Το ηφαίστειο παρακολουθείται πάρα πολλά χρόνια με σημαντική ημερομηνία το 1995 όπου δημιουργείται το Ινστιτούτο Μελέτης και Παρακολούθησης του Ηφαιστείου Σαντορίνης (ΙΜΠΗΣ) το οποίο αποτελεί έναν μη κερδοσκοπικό οργανισμό όπου στόχος του είναι να συνεχίσει την λειτουργεία του παρατηρητηρίου ηφαιστείων και των δικτύων παρακολούθησης (Volcano Observatory and the monitoring networks) το οποίο είναι ένα ερευνητικό πρόγραμμα που δημιουργήθηκε και χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Τον Μάιο του 2015 το IΓΜΕ σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο της Φλωρεντίας αναλαμβάνουν την φυσικοχημική παρακολούθηση του ηφαιστείου. Σύμφωνα με το Ινστιτούτο Μελέτης και Παρακολούθησης του Ηφαιστείου Σαντορίνης (ΙΜΠΗΣ) πραγματοποιήθηκαν εργασίες οι οποίες βοηθάν στην καλύτερη μελέτη του ηφαιστείου όπως είναι η εγκατάσταση νέων σταθμών θερμικής παρακολούθησης, δειγματοληψίες θερμών ρευστών, αερίων του εδάφους και μετρήσεις του διοξειδίου του άνθρακα στους χώρους ενδιαφέροντος.

Πιο συγκεκριμένα για την πρόβλεψη μελλοντικών εκρήξεων έχουν εγκατασταθεί δίκτυα παρακολουθήσεις δεκάδων φυσικοχημικών παραμέτρων. Μερικά από αυτά είναι η θερμοκρασία και η χημική σύσταση των θερμών νερών και ατμίδων, η σεισμική δραστηριότητα, το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας, το βαρυτικό και μαγνητικό πεδίο της γης και άλλα. Επίσης ένα χρήσιμο εργαλείο στα πλαίσια της παρακολούθησης των ηφαιστείων αποτελούν πλέον και οι δορυφορικές εικόνες RADAR οι οποίες κάτω από συγκεκριμένες διεργασίες μπορούν να δώσουν πολύ ενδιαφέροντα στοιχεία όπως είναι η παραμόρφωση του εδάφους λόγο των διεργασιών που πραγματοποιούνται.

## 3. Ελεύθερα Δεδομένα – Λογισμικό και Μεθοδολογία

#### 3.1 Ελεύθερα δεδομένα

Η τηλεπισκόπηση αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο για ένα μεγάλο εύρος επιστημών και αυτό οφείλεται κυρίως στα πολυάριθμα δορυφορικά δεδομένα τα οποία προσφέρουν πολλές διευκολύνσεις. Πιο συγκεκριμένα, προσφέρουν παγκόσμια κάλυψη και καθημερινή επανεξέταση, υψηλή ανάλυση αλλά το κυριότερο από όλα είναι πως πλέον ένα μεγάλο εύρος δορυφορικών δεδομένων διατίθενται δωρεάν από τις υπηρεσίες και όσα δεν διατίθενται έχουν σχετικά χαμηλό κόστος για αυτό που προσφέρουν. Μπορούν να χαρακτηριστούν και ως βιώσιμα δεδομένα λόγο όλων αυτών που προσφέρουν. Αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν δημιουργήσει ένα θετικό και πιο φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον που του επιτρέπει να πειραματιστεί και να εξοικειωθεί με τα δορυφορικά δεδομένα. Επιπλέον αυτή η εξέλιξη έχει οδηγήσει πολλές εταιρίες στην δημιουργία νέων εξελιγμένων προγραμμάτων τα οποία επεξεργάζονται τις δορυφορικές εικόνες και το σημαντικότερο είναι, πως και αυτά διατίθενται δωρεάν. Σαφώς υπάρχουν και οπτικά δεδομένα αλλά και δεδομένα ραντάρ ανάλογα τις απαιτήσεις κάθε ερευνητή.

Σήμερα υπάρχουν πλέον δεκάδες υπηρεσίες που διαθέτουν τα προϊόντα τους δωρεάν σε διαδικτυακές πλατφόρμες που είναι ιδιαίτερα φιλικές προς τον χρήστη. Μερικές από αυτές αναφέρονται παρακάτω:

των δορυφορικών δεδομένων είναι η USGS Earth Explorer πρόκειται για έναν αμερικάνικο οργανισμό ο οποίος δημιουργήθηκε από το κογκρέσο το 1879. Στην πλατφόρμα τους ο χρήστης έχει την δυνατότητα να κατεβάσει δωρεάν οποιαδήποτε εικόνα Landsat επιθυμεί, εικόνες οι οποίες φτάνουν μέχρι 40 χρόνια πριν. Ακόμα μπορεί να βρει δεδομένα από τον NASA ASTER και Shuttle Radar Topography Missions το οποίο μας δίνει παγκόσμια ψηφιακά μοντέλα εδάφους και πλήρη πρόσβαση στα υπερφασματικά δεδομένα του Hyperion.

Μια ακόμα εντυπωσιακή και πολύ χρήσιμη πλατφόρμα είναι η Sentinel Scientific Data Hub η οποία δημιουργήθηκε από την ESA και διαθέτει τους δορυφόρους Sentinel 2a και 2b και τον Sentinel 1. Με λίγα λόγια οι δορυφόροι sentinel δίνουν στους ενδιαφερόμενος την επιλογή ενεργών ή παθητικών υψηλής ποιότητας δεδομένων παγκόσμιας κλίμακας. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον δορυφόρο Sentinel-1.

Σημαντική υπηρεσία είναι και αυτή της NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) η οποία διαθέτει μια ηλεκτρονική βιβλιοθήκη η οποία ονομάζεται Σύστημα Διαχείρισης Δεδομένων μεγάλου μεγέθους (CLASS). Εκεί ο χρήστης έχει την δυνατότητα να βρει πολλά περιβαλλοντικά δεδομένα τα οποία παρέχονται στην υπηρεσία από τον Επιχειρησιακό Περιβαλλοντικό Δορυφόρο (POES) του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ (POES), τον γεωστατικό λειτουργικό περιβαλλοντικό δορυφόρο (GOES) της NOAA. Η NASA επίσης, διαθέτει την πλατφόρμα NASA's Reverb Data Hub στην οποία ο χρήστης έχει την επιλογή ανάμεσα σε μία μεγάλη πληθώρα δορυφορικών δεδομένων. Μερικοί από αυτούς είναι οι Aqua, Terra, Aura, TRMM, Calipso, NASA DC, JASON, ENVISAT, ALOS, METEOSAT, GOES, ICESAT, GMS, Landsat, NIMBUS, SMAP, RADARSAT.

Τέλος, η απόκτηση δορυφορικών εικόνων δεν είναι μόνο ευρωπαϊκή ή αμερικάνικη υπόθεση υπάρχουν πολλοί οργανισμοί σε όλο τον κόσμο που διαθέτουν δικά τους δορυφορικά συστήματα τα οποία παράγουν δορυφορικές εικόνες. Κάποιες πλατφόρμες από αυτές είναι οι National Institute for Space Research (INPE), Bhuvan Indian Geo-Platform of ISRO και JAXA's Global ALOS 3D World.

Αυτές είναι μόνο μερικές από τις πλατφόρμες που υπάρχουν αυτήν την στιγμή στο διαδίκτυο ελεύθερες προς όλους τους χρήστες προάγοντας την χρήση των ελεύθερων φιλικών προς τον χρήστη δορυφορικών δεδομένων.



Εικόνα 5: πλατφόρμες λήψης δορυφορικών δεδομένων

### 3.2 Πλατφόρμα Copernicus

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (EC) ξεκίνησε μια πρωτοβουλία για την ανάπτυξη υπηρεσιών Copernicus Data and Information Access Services (DIAS) που διευκολύνουν την πρόσβαση στα δεδομένα και τις πληροφορίες του Copernicus από τις υπηρεσίες του Copernicus. Παρέχοντας πρόσβαση σε δεδομένα και πληροφορίες παράλληλα με τους πόρους επεξεργασίας, τα εργαλεία και άλλα σχετικά δεδομένα, η πρωτοβουλία αυτή αναμένεται να ενισχύσει την αφομοίωση των χρηστών, να τονώσει την καινοτομία και να δημιουργήσει νέα επιχειρηματικά μοντέλα βασισμένα στα δεδομένα και τις πληροφορίες της Γης.

To Copernicus είναι ένα διαστημικό πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Μέσω των υπηρεσιών του προσφέρει πλήρη, ελεύθερη και ανοιχτή πρόσβαση σε δεδομένα, μοντέλα και προβλέψεις σχετικά με την παρακολούθηση του περιβάλλοντος μας. Κάνει επίσης τα δορυφορικά δεδομένα από τον αστερισμό Sentinel διαθέσιμα σε ελεύθερη πλήρη και ανοιχτή βάση. Το Copernicus είναι ένα επιχειρησιακό πρόγραμμα το οποίο πέρα από τα οφέλη του για το περιβάλλον παρέχει επίσης σημαντική συμβολή στις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης και ασφάλειας στην Ευρώπη.

Όταν όλοι οι δορυφόροι Sentinel λειτουργούν (Sentinel-1Α και 1B, Sentinel-2Α και Sentinel-3A είναι κατά τη στιγμή της γραφής), θα παραδώσει περισσότερα από 10 petabytes δεδομένων κάθε χρόνο. Οι πληροφορίες από τις υπηρεσίες του Copernicus, που προέρχονται από τα Sentinels, άλλα δορυφορικά δεδομένα καθώς και πληροφορίες από την επι τόπου συνιστώσα του Copernicus, προσθέτουν στη συνολική ποσότητα των γεωχωρικών δεδομένων που δημιουργούνται ή διατίθενται από το πρόγραμμα Copernicus. Αυτό καθιστά τον Copernicus τον τρίτο μεγαλύτερο πάροχο δεδομένων στον κόσμο, δημιουργώντας μεγάλες ευκαιρίες, αλλά και παρουσιάζοντας μεγάλες προκλήσεις.( Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει φιλόδοξα σχέδια για να αντιμετωπίσει αυτές τις προκλήσεις σε ένα μεγάλο περιβάλλον με δεδομένα και για το σκοπό αυτό αποφάσισε να δρομολογήσει την υπηρεσία Copernicus DIAS -Υπηρεσίες πρόσβασης δεδομένων και πληροφοριών. Το DIAS θα ξεκινήσει την ανάπτυξη μιας ευρωπαϊκής υπηρεσίας πρόσβασης δεδομένων και επεξεργασίας cloud, που θα είναι ανοιχτή για τους επιχειρηματίες, τους προγραμματιστές και το ευρύ κοινό για την οικοδόμηση και εκμετάλλευση των υπηρεσιών που βασίζονται στο Copernicus.)

Τα δορυφορικά δεδομένα Sentinel διανέμονται από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA) και τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό για την Εκμετάλλευση Μετεωρολογικών Δορυφόρων (EUMETSAT). Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί πρόσβασης στα δεδομένα Sentinel, προσαρμοσμένοι στο σκοπό για τον οποίο θα χρησιμοποιηθούν. Τόσο η ESA όσο και η EUMETSAT χρησιμοποιούν κόμβους πρόσβασης δεδομένων για κατ 'απαίτηση, ανοικτή πρόσβαση στα δεδομένα Sentinel. Επιπλέον, η EUMETSAT λειτουργεί το EUMETCAST, υπηρεσία που αποστέλλει συστηματικά δορυφορικά δεδομένα και άλλες πληροφορίες στους εγγεγραμμένους χρήστες είτε μέσω επίγειων γραμμών δεδομένων είτε μέσω περιοχών δορυφορικής σύνδεσης για περιοχές του κόσμου με περιορισμένη σύνδεση στο διαδίκτυο. (ESA) Στην συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα Copernicus Open Access Hub μέσα από την οποία βρέθηκαν και κατέβηκαν οι απαραίτητες εικόνες Sentinel 1 για το νησί της Σαντορίνης.

			С	opernicus Open Access Hub
Insert search criteria			8	٩
Advanced Search		Clear	2	
» Sort By:	Ingestion Date	٣	U	Agia line
» Order By:	Descending	Ŧ	U	Thurson timesvejik Vouvouis
» Sensing period	From: 📕	to: 🖬	Ш	This
» Ingestion period	From: 📕	to: 🖬	Ы	Mans Mans
Mission: Sentin	el-1			Watnong Bio Gonita, Epistop Byrops Kalling, Gonia S
Satellite Platform	Product Ty	pe		Reg Schen, Kaman,
				Akatin Empore: Apies Georgies Prints
Polarisation	Sensor Mo	de		Ekonges
	•	*		
Relative Orbit Number 1 to 175)	(from Collection		•	
25.2578, 36.4710	Pan Box Po	lygon Clear		

Εικόνα 6: Πλατφόρμα Copernicus, (Copernicus Hub)

#### 3.3 Δορυφόρος Sentinel-1

Ο δορυφόρος Sentinel-1 (το Ευρωπαϊκό παρατηρητήριο ραντάρ), κυκλοφόρησε το 2011, το οποίο αντιπροσωπεύει το νέο διαστημικό σκέλος της δορυφορικής οικογένειας GMES (Global Monitoring for Environment and Security) σχεδιασμένο και ανεπτυγμένο από την ESA και χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Το GMES αντιπροσωπεύει την ευρωπαϊκή απάντηση στις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις του περιβαλλοντικού ελέγχου και, ως εκ τούτου, συμβάλλει σημαντικά στις περιβαλλοντικές σε παγκόσμιο επίπεδο.

Οι αποστολές του Copernicus (Sentinel-1, -2 και -3) αντιπροσωπεύουν την συνεισφορά της Ευρωπαϊκής Ένωσης GEOSS (Global Earth Observation System of Systems). Ο Sentinel-1 αποτελείται από έναν αστερισμό δύο δορυφόρων τον Sentinel-1A και τον Sentinel-1B οι οποίοι μοιράζονται το ίδιο τροχιακό επίπεδο με διαφορά οριζόντιας τροχιακής φάσης 180 μοιρών. Αυτή η αποστολή παρέχει μια ανεξάρτητη επιχειρησιακή ικανότητα για συνεχή χαρτογράφηση της γης με ραντάρ με βελτιωμένη συχνότητα και κάλυψη ιδανικό για υπηρεσίες και εφαρμογές που απαιτούν μεγάλες χρονικές σειρές.

Η Thales Alenia Space Italy είναι υπεύθυνη για το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την ολοκλήρωση του δορυφόρου που φέρει ένα ραντάρ συνθετικής διάταξης (SAR) της ζώνης C. Το ραντάρ βασίζεται στις βασικές τεχνολογίες του Thales Alenia Space, όπως είναι οι μονάδες μετάδοσης-λήψης μέσα στην ενεργή κεραία.

Βασισμένο σε μια πλατφόρμα Prima που αναπτύχθηκε από τον Thales Alenia Space για την ιταλική διαστημική υπηρεσία, το Sentinel-1 θα ζυγίζει 2.280 χιλιόγραμμα κατά την εκτόξευση και θα κοιτάξει τη Γη σε αποβάθρες μέχρι 700 χιλιόμετρα με ανάλυση εδάφους μεταξύ 5 και 25 μέτρων σύμφωνα με την επιλεγμένη λειτουργική λειτουργία.



Εικόνα 7: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πλατφόρμας Sentinel-1, (ESA)

Ο γενικός στόχος της αποστολής Sentinel-1 είναι να εξασφαλίσει την συνέχεια των επιχειρησιακών εφαρμογών και υπηρεσιών SAR της ζώνης C στην Ευρώπη με ιδιαίτερη σημασία να δίνεται στις υπηρεσίες που εντάσσονται στο πρόγραμμα GSE (GMES Service Element) της ESA μετά τη συνταξιοδότηση του ERS-2 και το τέλος της αποστολής Envisat.. Η αποστολή του Sentinel-1 αναμένεται να επιτρέψει την ανάπτυξη νέων εφαρμογών και να ανταποκριθεί στις εξελισσόμενες ανάγκες της GMES όπως στον τομέα της κλιματικής αλλαγής και της σχετικής παρακολούθησης (associated monitoring).

Για να επιτευχθεί αυτό, οι δορυφόροι φέρουν έναν αισθητήρα C-SAR, ο οποίος προσφέρει απεικόνιση μέσης και υψηλής ανάλυσης σε όλες τις καιρικές συνθήκες. Το C-SAR είναι σε θέση να αποκτήσει νυχτερινές εικόνες και να εντοπίσει μικρή κίνηση στο έδαφος, γεγονός που το καθιστά χρήσιμο για την παρακολούθηση της ξηράς και της θάλασσας.

Ένας δορυφόρος SENTINEL-1 θα μπορεί να αντιστοιχεί σε ολόκληρο τον κόσμο μία φορά κάθε 12 ημέρες. Ο δορυφόρος δύο δορυφόρων προσφέρει έναν ακριβή κύκλο επανάληψης 6 ημερών. Ο αστερισμός θα έχει επαναλαμβανόμενη συχνότητα (αύξουσα / φθίνουσα) 3 ημερών στον ισημερινό, λιγότερο από 1 ημέρα στην Αρκτική και αναμένεται να παρέχει κάλυψη σε όλη την Ευρώπη, τον Καναδά και τις κύριες διαδρομές αποστολής σε 1-3 ημέρες, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες . Τα δεδομένα ραντάρ παραδίδονται στις υπηρεσίες του Copernicus εντός μίας ώρας από την απόκτηση τους.



**Εικόνα 8:** Η κάλυψη της γης με την χρήση και των δύο δορυφόρων Sentinel-1 Α,Β σε ταυτόχρονη τροχιά, (ESA)

Τον Δεκέμβριο του 2009, η ESA υπέγραψε σύμβαση για το διπλό δεύτερο διαστημικό σκάφος Sentinel-1B το οποίο θα κυκλοφόρησε το 2016. Τον Δεκέμβριο του 2015 υπογράφηκε σύμβαση για δύο ακόμη δορυφόρους Sentinel 1C και 1D. Αυτά θα ξεκινήσουν από το 2021 και μετά.

Δεδομένου ότι και οι δύο δορυφόροι, Sentinel-1A και Sentinel-1B, πετάν στο ίδιο τροχιακό επίπεδο με τροχιά 180°, και το καθένα με κύκλωμα τροχιάς επανάληψης διάρκειας 12 ημερών διευκολύνουν τη δημιουργία εικόνας ιντερφερόμετρου SAR (InSAR) ζεύγη (δηλαδή, interferograms) που έχουν χρονικά διαστήματα 6 ημερών. Αυτό, μαζί με το γεγονός ότι η τροχιακή απόκλιση κάθε δορυφόρου Sentinel-1 θα διατηρηθεί μέσα σε έναν σωλήνα ακτίνας ± 50 m θα δώσει τη δυνατότητα

δημιουργίας γεωγραφικά ολοκληρωμένων χαρτών αλλαγής επιφάνειας όπως για τη μέτρηση της ταχύτητας του πάγου στο Polar καθώς και την παρακολούθηση των επιφανειακών παραμορφώσεων σχετιζόμενων με το γεωγραφικό κίνδυνο που προκαλούνται από τις τεκτονικές διεργασίες, τις ηφαιστειακές δραστηριότητες, τις κατολισθήσεις και την καθίζηση.

#### 3.4. Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν επτά εικόνες ραντάρ από τον δορυφόρο Sentinel-1Α για το πρώτο εξάμηνο του 2017 τις οποίες κατεβάσαμε μέσα από την βάση του Copernicus Hub. Ουσιαστικά πρόκειται για έξι ζευγάρια εικόνων με βάση τα οποία θα δημιουργηθούν έξι wrapped συμβολογραφήματα για το νησί της Σαντορίνης. Τα στοιχεία των εικόνων φαίνονται στον πίνακα 1:

Orbit Pass	Dataset	Acquisition	Relative orbit	Slice number
Direction		Period	number	
Ascending	SLC	12/1/2017	29	4
Ascending	SLC	24/1/2017	29	4
Ascending	SLC	17/2/2017	29	4
Ascending	SLC	25/3/2017	29	4
Ascending	SLC	30/4/2017	29	4
Ascending	SLC	24/5/2017	29	4
Ascending	SLC	29/6/2017	29	4

#### Πίνακας 1 Χαρακτηριστικά Εικόνων

Όπως φαίνεται στον πίνακα 1 όλες οι εικόνες χαρακτηρίζονται από τις ίδιες ιδιότητες (Orbit Pass Direction, Relative orbit number, Slice number). Αυτό μας επιτρέπει να έχουμε τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα, όπως και την σωστή λειτουργία του λογισμικού SNAP. Όλες οι εικόνες περιέχουν 3 swath όπου το κάθε swath περιλαμβάνει 6 burst με φορά από τον βορρά προς τον νότο.

#### 3.5 Ελεύθερο Λογισμικό SNAP

Η ESA αναπτύσσει δωρεάν εργαλεία ανοικτού κώδικα για την επιστημονική εκμετάλλευση των αποστολών παρατήρησης της γης στο πλαίσιο του προγράμματος Επιστημονική Εκμετάλλευση Επιχειρησιακών Αποστολών (SEOM). Ένα από αυτά είναι και το SNAP το οποίο βρίσκεται στο STEP, μια πλατφόρμα της ESA η οποία δίνει πρόσβαση στο λογισμικό, την δυνατότητα επικοινωνίας με τους προγραμματιστές, την δημιουργία διαλόγου μέσα στην επιστημονική κοινότητα, την προώθηση αποτελεσμάτων, καθώς και την παροχή εκπαιδευτικών προγραμμάτων και υλικού για την κατάρτιση των επιστημόνων χρησιμοποιώντας τις εργαλειοθήκες.

Οι εργαλειοθήκες που έχουν δημιουργηθεί από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος υποστηρίζουν την επιστημονική εκμετάλλευση των αποστολών ERS-ENVISAT, Sentinels 1/2/3 και διάφορες άλλες αποστολές Εθνικών και Τρίτων. Οι τρεις αυτές ομάδες εργαλείων ονομάζονται αντιστοίχως Sentinel 1, 2 και 3 Toolboxes και μοιράζονται μια κοινή αρχιτεκτονική που ονομάζεται SNAP. Περιέχουν ορισμένες λειτουργίες ιστορικών εργαλείων όπως τα BEAM, NEST και Orfeo Toolbox που αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια.

Η κοινή αρχιτεκτονική για όλα τα Sentinel Toolboxes αναπτύχθηκε από την Brockmann Consult, την Array Systems Computing και την C-S και ονομάζεται Platform Sentinel Application Platform (SNAP). (ESA)

Το ελεύθερο λογισμικό SNAP είναι ιδανικό για την επεξεργασία και την ανάλυση της παρατήρησης της Γης λόγω των εξής τεχνολογικών καινοτομιών:

- Επεκτασιμότητα,
- Φορητότητα,
- Modular Rich Client Platform,
- Generic EO Abstraction Data,
- Διαχείριση πλακιδίων μνήμης και Πλαίσιο επεξεργασίας γραφημάτων.
- Κοινή αρχιτεκτονική για όλες τις εργαλειοθήκες
- Πολύ γρήγορη απεικόνιση εικόνας και πλοήγηση ακόμη και των εικόνων giga-pixel
- Πλαίσιο επεξεργασίας γραφημάτων (GPF): για τη δημιουργία αλυσίδων επεξεργασίας καθορισμένων από το χρήστη

- Η προηγμένη διαχείριση επιπέδων που επιτρέπει την προσθήκη και το χειρισμό νέων επικαλύψεων όπως εικόνες άλλων ζωνών, εικόνων από διακομιστές WMS ή φακέλους shape ESRI
- Εύκολος ορισμός bitmask και επικάλυψη
- Αριθμητική ευελιξία ζώνης χρησιμοποιώντας αυθαίρετες μαθηματικές εκφράσεις
- Ακριβής εκ νέου προβολή και ορθο-διόρθωση σε κοινές προβολές χάρτη,
- Γεω-κωδικοποίηση και διόρθωση χρησιμοποιώντας σημεία ελέγχου εδάφους
- Αυτόματη λήψη SRTM DEM και επιλογή κεραμιδιών
- Βιβλιοθήκη προϊόντων για την αποτελεσματική σάρωση και καταλογογράφηση μεγάλων αρχείων
- Υποστήριξη επεξεργαστή πολλαπλών δίσκων και πολλαπλών πυρήνων
- Ολοκληρωμένη οπτικοποίηση WorldWind

Πιο συγκεκριμένα, το λογισμικό SNAP χρησιμοποιεί τις ακόλουθες τεχνολογίες:

- Πλατφόρμα NetBeans πλαίσιο εφαρμογής επιφάνειας εργασίας
- Install4J οικοδόμος εγκατάστασης πολλαπλών πλατφόρμων
- GeoTools Γεωεπιστημονική βιβλιοθήκη εργαλείων
- GDAL ανάγνωση / γραφή μορφοτύπων γεωμετρικών διανυσμάτων ραστρών και διανυσμάτων
- Jira tracker θέμα
- Git σύστημα ελέγχου έκδοσης, το οποίο φιλοξενείται από το GitHub



Εικόνα 9: Ελεύθερο λογισμικό SNAP, (SNAP)

Πρέπει επίσης, να αναφερθεί πως το συγκεκριμένο λογισμικό απαιτεί μεγάλη μνήμη RAM για την ακρίβεια το πρόγραμμα για να μπορέσει να λειτουργήσει σωστά χρειάζεται από 16 GB RAM και πάνω. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη είναι η μνήμη RAM τόσο πιο γρήγορα εκτελούνται οι εντολές οι οποίες είναι ιδιαίτερα χρονοβόρες. Ιδανικό είναι ο υπολογιστής να διαθέτει λογισμικό LINUX για την διευκόλυνση του χρήστη αφού τα περισσότερα πρόσθετα προγράμματα που συνδέονται με το SNAP λειτουργούν κυρίως μόνο με LINUX.

## 3.6 Μεθοδολογία

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία. Για την δημιουργία των συμβολογραφημάτων χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο λογισμικό SNAP το οποίο έχει δημιουργηθεί από την ESA.



Εικόνα 10: Διάγραμμα μεθοδολογίας

## 4. Επεξεργασία SAR και Δημιουργία Συμβολογραφημάτων

#### 4.1. Προ-επεξεργασία

Σε αυτό το σημείο της εργασίας παρουσιάζεται η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε για την δημιουργία των έξι wrapped συμβολογραφημάτων μέσα από το λογισμικό SNAP. Στην εικόνα 11 φαίνονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν.



Εικόνα 11: διάγραμμα δημιουργίας συμβολογραφήματος

Πιο αναλυτικά το πρώτο βήμα της διαδικασίας αποτελεί η εισαγωγή δεδομένων δηλαδή τις δύο πρώτες εικόνες ραντάρ SLC από τον δορυφόρο Sentinel-1. Το επόμενα ακριβώς βήμα αποτελεί το S1 TOPS Coregistration.

Ra	dar Tools Window Help						
	Apply Orbit File						
	Radiometric	•					
	Speckle Filtering	•					
	Coregistration	-		Coregistration			
	Interferometric	۲		S1 TOPS Coregistration	•		S1 TOPS Coregistration
	Polarimetric	•		DEM-Assisted Coregistration	۲		S1 TOPS Coregistration with ESD
	Geometric	•		Stack Tools Cross InSAR resampling			S-1 Back Geocoding
	Sentinel-1 TOPS	•					S-1 Enhanced Spectral Diversity
	ENVISAT ASAR	•					S-1 Double Difference Interferogram
	CADA IS IS						5-1 Double Difference Interletogram

Εικόνα 12: Το βήμα SI TOPS Coregistration μέσα στο λογισμικό SNAP

Σε αυτό το σημείο καταχωρούνται τα δύο προϊόντα S-1 SLC (master και slave) και εφαρμόζεται το S-1 TOPS Split και στις δύο εικόνες ώστε να οριστούν τα ίδια subwath και η πόλωση και για τα δύο προϊόντα, στην προκειμένη περίπτωση η Σαντορίνη ανήκει στο IW1, όπως φαίνεται και στην εικόνα 13.



Εικόνα 13: Swath της εικόνας ραντάρ SLC για το νησί της Σαντορίνης

Στην συνέχεια, εκτελείται η εντολή Apply Orbit File με τα αρχεία τροχιάς Sentinel Precise με αυτό το βήμα η εφαρμογή λαμβάνει τα ακριβή δεδομένα για την τροχιά την οποία είχε ο δορυφόρος την στιγμή λήψης των εικόνων . Στο πλαίσιο του Back Geocoding επιλέγεται το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) με βάση το οποίο θα διορθωθούν οι εικόνες. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το DEM Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) το οποίο κατεβαίνει αυτόματα μέσω της εφαρμογής. Το τελικό αποτέλεσμα αυτών των εντολών είναι ένα coregister αρχείο.

Στην συνέχεια εκτελείται το Interferogram Formation μέσα από το οποίο πραγματοποιείται ο πολλαπλασιασμό της πρώτης εικόνας με τη συζυγή μιγαδική της άλλης. Συγκεκριμένα, γίνεται ένας διαγώνιος πολλαπλασιασμός εικονοστοιχείο επί εικονοστοιχείο της πρώτης με τη δεύτερη εικόνα, δηλαδή το εύρος της πρώτης επί

της δεύτερης. Στο σημείο αυτό επίσης, αφαιρείται η αρχική φάση (reference phase) χρησιμοποιώντας ένα δυσδιάστατο πολυώνυμο (2d-polynomial). Υπολογίζεται και αφαιρείται η φάση της επίπεδης επιφάνειας (flat-earth phase) η οποία οφείλεται καμπυλότητας της επιφάνειας της γης.

Εμφανίζοντας τα αποτελέσματα της διαδικασίας του συμβολογραφικού σχεδιασμού παρατηρείται ότι ακόμα υπάρχουν κάποια κενά διαστήματα στην εικόνα τα οποία δημιουργούνται από τα burst. Για την απαλοιφή αυτών ακολουθείται το επόμενο βήμα το οποίο είναι το SI TOPS Deburst.

To SI TOPS Deburst χρησιμοποιείται για την εξάλειψη των burst μέσω της χωρικής ομογενοποίησης των swath. Όπως φαίνεται στην εικόνα 14.



Εικόνα 14: Συμβολογράφημα 12-1-17 με 24-1-17 πριν και μετά το SI TOPS Deburst

Στην συνέχεια της διαδικασίας στόχος είναι η απαλοιφή του θορύβου από την εικόνας. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση του φίλτρου Goldstein Phase Filtering 3x3 το οποίο είναι ένας μη γραμμικός προσαρμοστικός αλγόριθμος ο οποίος δημιουργήθηκε από τους Goldstein και Werner (1998).

Μετά την απαλοιφή του θορύβου απαιτείται ο υπολογισμός και η αφαίρεση της τοπογραφικής φάση από το συμβολογράφημα δηλαδή το Topographic Phase Removal. Σε αυτό το στάδιο ξαναχρησιμοποιείται το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (SRTM) που προστίθεται στο συμβολογράφημα και στην συνέχεια αφαιρείται από το σύνθετο συμβολογράφημα.

Σε αυτό το σημείο επαναλαμβάνεται η διαδικασία του Goldstein Phase Filtering αυτή την φορά με μεγαλύτερο δείκτη 5x5 για την απαλοιφή μεγαλύτερου μέρους του θορύβου.

Τέλος, γίνεται η γεωμετρική διόρθωση (Terrain Correction) της εικόνας. Λόγω των τοπογραφικών παραλλαγών μιας σκηνής και της κλίσης του δορυφορικού αισθητήρα, οι αποστάσεις μπορούν να παραμορφωθούν στις εικόνες SAR. Όπως, τα δεδομένα της εικόνας που δεν βρίσκονται απευθείας στη θέση Nadir του αισθητήρα

θα έχουν υποστεί κάποια παραμόρφωση. Οι διορθώσεις του εδάφους αποσκοπούν στην αντιστάθμιση αυτών των παραμορφώσεων έτσι ώστε η γεωμετρική αναπαράσταση της εικόνας να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερη στον πραγματικό κόσμο. (Help SNAP)

## 4.2. Παρουσίαση και ανάλυση Συμβολογραφημάτων Σαντορίνης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα έξι χρονικά διαδοχικά συμβολογραφήματα για το νησί της Σαντορίνης από τον Ιανουάριο μέχρι και τον Ιούνιο του 2017 σε μορφή wrapped όπως και οι εικόνες συνάφειας κάθε συμβολογραφήματος. Όλες οι εικόνες έχουν γίνει export στο Google Earth για καλύτερη απεικόνιση τους.

Αρχικά, παρουσιάζεται η εικόνα συνάφειας για την περίοδο 12-01-2017 με 24-01-2017. Στην οποία την μεγαλύτερη συνάφεια παρουσιάζει το νησί της Νέας Καμμένης. Το συμβολογράφημα της ίδιας περιόδου παρουσιάζει σημάδια εδαφικής παραμόρφωσης κυρίως στο ανατολικό κομμάτι του νησιού κοντά στην περιοχή του αεροδρομίου. Όπου βάση της χρωματικής διαβάθμισης παρουσιάζει αρνητικές τιμές, δηλαδή μείωση της φάσης άρα υπάρχει κίνηση προς τον δορυφόρο κατά μήκος του LOS



**Εικόνα 15 :** Εικόνα Συνάφειας περιόδου 12-01-2017 με 24-01-2017 (Ιανουάριος), Σαντορίνη



**Εικόνα 16:** Wrapped Συμβολογράφημα 12-01-2017 με 24-01-2017 (Ιανουάριος), Σαντορίνη

Παρατηρώντας την επόμενη εικόνα (Εικόνα 17) συνάφειας της περιόδου 24-01-2017 με 17-02-2017 παρατηρούμε πως το νησί της Νέας Καμμένης συνεχίζει να έχει μεγαλύτερη συνάφεια από το υπόλοιπο νησί αλλά επειδή η χρονική περίοδος είναι μεγαλύτερη από αυτήν της προηγούμενης εικόνας έχουμε μικρότερη συνάφεια στο σύνολο της εικόνας. Ακόμα, το συμβολογράφημα της αντίστοιχης περιόδου (Εικόνα 18) δεν παρουσιάζει αρκετά στοιχεία αφού στην εικόνα κυριαρχεί ο θόρυβος με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται μεγάλο μέρος τον δεδομένων.



**Εικόνα 17:** Εικόνα Συνάφειας (coherence) περιόδου 24-01-2017 με 17-02-2017 (Φεβρουάριος), Σαντορίνη



**Εικόνα 18:** Wrapped Συμβολογράφημα 24-01-2017 με 17-02-2017 (Φεβρουάριος), Σαντορίνη

Συνεχίζοντας, η επόμενη περίοδος 17-02-2017 με 25-03-2017 που αντιστοιχεί στο μήνα Μάρτιο παρουσιάζει και αυτή αρκετά χαμηλή συνάφεια η οποία πιθανολογείται πως ευθύνεται στα ηφαιστειογενή πετρώματα που καλύπτουν το νησί. Σε αυτή την περίοδο το συμβολογράφημα παρουσιάζει στο μεγαλύτερο μέρος του κυρίως τιμές θετικής φάσης, το οποίο σημαίνει πως υπάρχει κίνηση μακριά από τον δορυφόρο προς την διεύθυνση του LOS.



**Εικόνα 19:** Εικόνα Συνάφειας (coherence) περιόδου 17-02-2017 με 25-03-2017 (Μάρτιος), Σαντορίνη



**Εικόνα 20:** Wrapped Συμβολογράφημα 17-02-2017 με 25-03-2017 (Μάρτιος), Σαντορίνη

Για τις ημερομηνίες 25-03-2017 με 30-04-2017 οι τιμές συνάφειας είναι παρόμοιες με αυτές της προηγούμενης περιόδου, δηλαδή καλύτερη συνάφεια στο νησί της Νέας Καμμένης και πολύ χαμηλότερη συνάφεια σε όλο το υπόλοιπο νησί. Το συμβολογράφημα αυτού το μήνα παρουσιάζει ένα κροσσό ο οποίος ξεκινά από το βόρειο τμήμα του νησιού και καταλήγει στο νότιο. Πιθανολογείται πως ευθύνεται στον ατμοσφαιρικό θόρυβο αφού δεν υπάρχουν στοιχεία τα οποία να δικαιολογούν την ύπαρξη ενός τέτοιου κροσσού.



**Εικόνα 21:** Εικόνα Συνάφειας περιόδου 25-03-2017 με 30-04-2017 (Απρίλιος), Σαντορίνη



**Εικόνα 22:** Wrapped Συμβολογράφημα 25-03-2017 με 30-04-2017 (Απρίλιος), Σαντορίνη

Η εικόνα 23 παρουσιάζει την συνάφεια του νησιού για την περίοδο 30-04-2017 με 24-05-2017 η οποία παραμένει αρκετά χαμηλή. Και το συμβολογράφημα αυτού του μήνα (Εικόνα 24) παρουσιάζει μεγάλο ποσοστό θορύβου για τον οποίο ευθύνονται τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα.



**Εικόνα 23:** Εικόνα Συνάφειας (coherence) περιόδου 30-04-2017 με 24-05-2017 (Μάιος), Σαντορίνη



Εικόνα 24: Wrapped Συμβολογράφημα 30-04-2017 με 24-05-2017 (Μάιος), Σαντορίνη

Οι τιμές συνάφειας και για τον μήνα Ιούνιο παραμένουν χαμηλές όπως και στους προηγούμενους μήνες όπως φαίνεται στην εικόνα 25 αλλά η συνάφεια στο νησί της Νέας Καμμένης είναι αρκετά αυξημένη. Στην εικόνα 26 όπου φαίνεται το

συμβολογράφημα της περιόδου 24-05-2017 με 29-06-2017 το σύνολο του νησιού καλύπτεται από ατμοσφαιρικά παρ' όλα αυτά παρατηρείται πως το νησί την Νέας Καμμένης έχει αρνητικές τιμές φάσης με αποτέλεσμα να υπάρχει μια πιθανή κίνηση προς τον δορυφόρο κατά μήκος του LOS.



**Εικόνα 25:** Εικόνα Συνάφειας (coherence) περιόδου 24-05-2017 με 29-06-2017 (Ιούνιος), Σαντορίνη



**Εικόνα 26:** Wrapped Συμβολογράφημα 24-05-2017 με 29-06-2017 (Ιούνιος), Σαντορίνη

Σε αυτό το σημείο στην εικόνα 27 παρουσιάζεται η εικόνα συνάφειας για την περίοδο 12-01-2017 με 29-06-2017. Παρατηρείται πως στην συγκεκριμένη εικόνα έχει χαθεί πολύ μεγάλο μέρος της συνάφειας αφού μιλάμε για ένα συμβολογράφημα το οποίο δημιουργήθηκε με δύο εικόνες οι οποίες έχουν διαφορά έξι μήνες. Ακόμα στην εικόνα 28 φαίνεται το συμβολογράφημα αυτής της περιόδου αντίστοιχα, στο οποίο κυριαρχεί ο θόρυβος.



**Εικόνα 27:** Εικόνα Συνάφειας (coherence) περιόδου 12-01-2017 με 29-06-2017, Σαντορίνη



Εικόνα 28: Wrapped Συμβολογράφημα 12-01-2017 με 29-06-2017, Σαντορίνη

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι τα συμβολισμομετρικά αποτελέσματα παρουσιάζουν ορισμένους περιορισμούς κυρίως στους τοίχους της καλντέρας, οι οποίοι περιλαμβάνουν απίστευτα απότομες κλίσεις ύψους περίπου 300 μέτρων και, παρεμποδίζοντας την εκτίμηση της παραμόρφωσης που προκύπτει, οι περιοχές δεν είναι ορατές στο LOS του αισθητήρα SAR. Αυτό μπορεί να συμβάλει σε δύο πιθανές αιτίες: α) ατμοσφαιρικές επιδράσεις ή β) χαμηλές τιμές συνοχής που προκαλούν αναξιόπιστα και μη ρεαλιστικά αποτελέσματα. Ακόμα, έχει διαπιστωθεί πως περιοχές με ηφαιστειακά πετρώματα παρουσιάζουν χαμηλότερη συνάφεια.

#### 4.3. Επεξεργασία για την προσθήκη των φάσεων

Ο στόχος αυτής της εργασίας ήταν να μπορέσουμε μέσα από το ελεύθερο λογισμικό SNAP να προσθέσουμε τις έξι συμβολογραφικές φάσεις με σκοπό να υπολογίσουμε την συνολική φάση. Αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα να μπορεί ο χρήστης μέσα από ένα ελεύθερο λογισμικό να προσθέτει πολλές συμβολομετρικές φάσεις με μικρή χρονική απόσταση μεταξύ τους και να υπολογίζει την συνολική φάση. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να περιοριστούν προβλήματα που δημιουργούνται από συμβολογραφήματα με μεγάλες χρονικές αποστάσεις. Για παράδειγμα θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε την συνολική φάση των συμβολογραφημάτων της Σαντορίνης για όλο το 2017 έχοντας συμβολογραφήματα για κάθε μήνα. Αυτό θα μας έδινε πολύ μεγάλη ακρίβεια για την εδαφική παραμόρφωση του νησιού κατά όλο το 2017. Σαφώς το ίδιο μπορεί να συμβεί και για πολύ μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Ουσιαστικά, αυτό που προσπαθούμε να πετύχουμε μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω μαθηματική σχέση:

 $\Delta \phi(o\lambda ι \kappa \dot{o}) = \Delta \phi 1 + \Delta \phi 2 + .... + \Delta \phi v$ 

Για να δημιουργηθεί αυτή η σχέση έπρεπε πρώτα να δημιουργηθούν τα έξι συμβολογραφήματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω και στην συνέχεια να βρεθει ένας τρόπο με τον οποίο όλες οι φάσεις των συμβολογραφημάτων θα ενώνονταν σε ένα αρχείο ώστε να μπορέσουν να εισαχθούν στο πεδίο band\_math της εφαρμογής όπου και θα γινόταν η πρόσθεση των φάσεων.

To band\_math είναι ένα εργαλείο της εφαρμογής στο οποίο ο χρήστης μπορεί να εισάγει συμβατά αρχεία και μέσα από εκεί να δημιουργήσει μαθηματικές ή λογικές σχέσεις με αποτέλεσμα την δημιουργία νέων εικόνων. Παρακάτω παρουσιάζονται η προσπάθειες που γίναν για την προσέγγιση του στόχου.

#### ΠΡΩΤΗ ΜΕθΟΔΟΣ:

Αρχικά, για την δημιουργία ενός αρχείου το οποίο θα περιέχει όλες τις φάσεις των συμβολογραφημάτων χρησιμοποιήθηκε η εντολή Coregistration όπου η συγκεκριμένη εντολή ενώνει με ακρίβεια τα εικονοστοιχεία – pixel των επιλεγμένων εικόνων με αυτά της κυρίαρχης – master εικόνας. Αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα να ενώσουμε όλα μας τα αρχεία σε ένα και στην συνέχεια θα μπορούσαμε να απομονώσουμε τις φάσεις μέσα από την εντολή subset κάτι το οποίο όμως δεν μπόρεσε να συμβεί εφόσον η εντολή Coregistration της εφαρμογής δεν επιτρέπει την προσθήκη εικόνων που ξεπερνάν τις τέσσερις, πράγμα αντίθετο από τον στόχο αυτής της εργασίας.

#### ΔΕΥΤΕΡΗ ΜΕΘΟΔΟΣ:

Το επόμενο εργαλείο που μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για κάτι τέτοιο ήταν το Stacking το οποίο κάνει ένα είδος Coregistration με ανακατανομή των εικονοστοιχείων των δευτερευόντων εικόνων επάνω στην πρώτη. Αλλά και αυτή η προσπάθεια δεν ήταν λειτουργική αφού το αποτέλεσμα του Stacking δεν πρόσθετε όλες τις φάσεις στο καινούριο αρχείο παρά μόνο την φάση του πρώτου συμβολογραφήματος.

#### ΤΡΙΤΗ ΜΕΘΟΔΟΣ:

Η αμέσως επόμενη προσπάθεια ήταν η χρήση του εργαλείου Stacking Average η οποία ουσιαστικά υπολογίζει και έχει την ίδια χρησιμότητα με το Stacking το οποίο αναφέραμε παραπάνω, αλλά ταυτόχρονα υπολογίζει και τον μέσο όρο των αρχείων των οποίων εισάγει ο χρήστης. Και αυτή η εφαρμογή δεν απέφερε κάποιο ικανοποιητικό αποτέλεσμα αφού πρόκειται για μια πολύ χρονοβόρα διαδικασία (24 ώρες) η οποία στην προκειμένη περίπτωση αφού εκτελέστηκε, το αρχείο που δημιουργήθηκε δεν περιείχε απολύτως καμία πληροφορία.

#### ΤΕΤΑΡΤΗ ΜΕΘΟΔΟΣ:

Τέλος, χρησιμοποιήθηκε η εντολή Collocation η οποία επίσης αναδιαμορφώνει τα εικονοστοιχεία των εικόνων με βάση την κυρίαρχη εικόνα αλλά επίσης προσθέτει όλες τις φάσεις των αρχείων σε ένα αρχείο δίνοντας έτσι την δυνατότητα δημιουργίας νέων ονομάτων μέσα στο αρχεία με σκοπό την αποφυγή σφαλμάτων. Αυτή η εντολή μας προσέφερε το επιθυμητό αποτέλεσμα έτσι ώστε να έχουμε σε ένα αρχείο όλες τις φάσεις των συμβολογραφημάτων, οι οποίες προστέθηκαν στο band\_math.

Το εργαλείο band\_math όπως αναφέρθηκε και παραπάνω αποτελεί ένα χώρο στον οποίο ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει μαθηματικές κυρίως αλλά και λογικές σχέσεις. Έτσι λοιπόν, εδώ δημιουργήσαμε την παρακάτω σχέση:

#### $\Delta \phi(o \lambda \iota \kappa \acute{o}) = \Delta \phi 1 + \Delta \phi 2 + \Delta \phi 3 + \Delta \phi 4 + \Delta \phi 5 + \Delta \phi 6$

Δηλαδή προσθέσαμε τις φάσεις και των έξι συμβολογραφημάτων με το αποτέλεσμα να φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 29: Αποτέλεσμα προσθήκης φάσεων στο εργαλείο band\_math

## 5. Συζήτηση και Συμπεράσματα

Ο στόχος της εργασίας ήταν η δημιουργία διαχρονικών δεδομένων μέσω του λογισμικού SNAP έτσι ώστε οι χρήστες του SNAP να μην χρειάζεται μετά την δημιουργία τον απλών συμβολογραφημάτων να ανατρέχουν σε άλλα λογισμικά για πιο σύνθετες επεξεργασίες όπως είναι αυτή των multi-temporal δεδομένων.

Αρχικά, με την δημιουργία των συμβολογραφημάτων και των εικόνων συνάφειας παρατηρείται πως όσο μεγαλώνει το χρονικό διάστημα των ζευγών τόσο μικρότερη συνάφεια υπάρχει, πράγμα το οποίο οφείλεται στην χρονικό αποσυσχέτιση. Έτσι με την δημιουργία της συνολικής εικόνας όπου προστέθηκαν όλες οι φάσεις των έξι μηνών στο εργαλείο band\_math αναμενόταν να υπάρχει πολύ καλύτερη συνάφεια. Αλλά όπως φαίνεται και στην εικόνα 30 όχι μόνο δεν υπάρχει καλύτερη συνάφεια στην τελική εικόνα αλλά μειώνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό. Ακόμα, με την σύγκριση της τελικής εικόνας και της εικόνας της περιόδου 12-01-2017 με 29-06-2017 παρατηρείται πως δεν υπάρχει κάποια ομοιότητα στα στοιχεία που παρουσιάζουν.

Έτσι μέσα από την συγκεκριμένη εργασία καταφέραμε να δημιουργήσουμε τα έξι διαδοχικά συμβολογραφήματα, να ενώσουμε όλες τις φάσεις σε ένα συνολικό αρχείο αλλά και να τις προσθέσουμε μέσα στο εργαλείο band\_math. Παρ' όλα αυτά το τελικό αποτέλεσμα δεν ήταν το αναμενόμενο. Γι' αυτό το λόγο καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως το ελεύθερο λογισμικό SNAP δεν ενδείκνυται για την δημιουργία διαχρονικών δεδομένων (multi-temporal).



**Εικόνα 30:** Τελική εικόνα με την προσθήκη των φάσεων στο band\_math και η τελική εικόνα συνάφειας



**Εικόνα 31 :** Wrapped Συμβολογράφημα και εικόνα συνάφειας περιόδου 12-01-2017 με 29-06-2017, Σαντορίνη

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως το SNAP παρέχει μια λειτουργία η οποία ονομάζεται SAR Mosaic που είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις συνδυασμού υπερκαλυπτόμενων εικόνων. Συνίσταται τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν να έχουν περάσει πρώτα από την διαδικασία geocoding η οποία πρέπει να είναι πολύ ακριβής όπως επίσης και από γεωμετρική διόρθωση. Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα που δημιουργήθηκε στα πλαίσια αυτής εργασίας για το νησί της Σαντορίνη.



Εικόνα 32: Μωσαϊκό για το νησί της Σαντορίνης μέσω του λογισμικού SNAP

#### 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

#### • Ελληνική Βιβλιογραφία

Εργαστήριο Γεωλογίας, 2013. Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη

Ισαάκ Παρχαρίδης, 2015. Αρχές δορυφορικής τηλεπισκόπησης Θεωρία και Εφαρμογές ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. www.kallipos.gr .Αθήνα.

ΚΟΝΤΑΡΑΤΟΣ Ν. ΑΝΤΩΝΗΣ, 2007. ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ ΠΟΡΕΙΑ ΣΤΟ ΧΡΟΝΟ. Εκδόσεις ΗΛΙΟΤΟΠΟΣ, σελ. 30-50.

#### • Διεθνής Βιβλιογραφία

Bamler, Richard, and Philipp Hartl. "Synthetic aperture radar interferometry." Inverse problems 14, no. 4 (1998): R1.

Birtaha Kiki, 2013. Santorini: And the sea brought forth the earth. Topio Publications

Blackett M., 2017. An Overview of Infrared Remote Sensing of Volcanic Activity. Journal of Imaging. UK

Borgstrom, S., Del Gaudio, C., De Martino, P., Siniscalchi, V., Prats-Iraola, P., Nannini, M., Yague-Martinez, N., Pinheiro, M., Kim, J.-S., Vecchioli, F., Minati, F., Costantini, M., Foumelis, M. & Desnos, Y-L., 2017. Interferometric investigations with the S1 constellation: an application to the Vesuvius/Campi Flegrei volcanic test site. EGU General Assembly 2017

Crosetto, M., Crippa, B., Biescas, E., Monserrat, O. and Agudo, M., 2005, May. State of the art of land deformation monitoring using differential SAR interferometry. In ISPRS Hannover Workshop (pp. 17-20).

David M. Pyle, Tamsin A. Mather and Juliet Biggs, 2013. Remote sensing of volcanoes and volcanic processes: integrating observation and modelling. Geological Society. London.

Druitt, T.H., Edwards, L., Mellors, R.M., Pyle, D.M., Sparks, R.S.J., Lanphere, M., Davies, M. and Barreirio, B., 1999. Santorini volcano. Geological Society Memoir, 19.

Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F. and Massonnet, D., 2007. InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation (Vol. 19).

Foumelis, M., Trasatti, E., Papageorgiou, E., Stramondo, S. & Parcharidis, I., 2013. Monitoring Santorini volcano (Greece) breathing from space. Geophysical Journal International, 193, 1, 161-170, doi: 10.1093/gji/ggs135

Goldstein, R.M. and Werner, C.L., 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications. Geophysical Research Letters, 25(21), pp.4035-4038.

Jo Min-Jeong, Hyung-Sup Jung, Joong-Sun Won, 2015. Detecting the Source Location of Recent Summit Inflation via Three-Dimensional InSAR Observation of Kīlauea Volcano. Remote Sensing DOI: 10.3390/rs71114386

Hooper, A., Prata, F. and Sigmundsson, F., 2012. Remote sensing of volcanic hazards and their precursors. Proceedings of the IEEE, 100(10), pp.2908-2930.

Nomikou, P., Parks, M.M., Papanikolaou, D., Pyle, D.M., Mather, T.A., Carey, S., Watts, A.B., Paulatto, M., Kalnins, M.L., Livanos, I. and Bejelou, K., 2014. The emergence and growth of a submarine volcano: The Kameni islands, Santorini (Greece). GeoResJ, 1, pp.8-18.

Papadimitriou P., V. Kapetanidis, A. Karakonstantis, G. Kaviris, N. Voulgaris, K. Makropoulos, 2015. The Santorini Volcanic Complex: A detailed multi-

parameterseismological approach with emphasis on the 2011–2012unrest period. Journal of Geodynamics, Volume 85

Papageorgiou, E., Foumelis, M. & Parcharidis, I., 2012. Long- and short-term deformation monitoring of Santorini Volcano: Unrest evidence by DInSAR analysis. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, doi: 10.1109/JSTARS.2012.2198871

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

Parks, M.M., Biggs, J., England, P., Mather, T.A., Nomikou, P., Palamartchouk, K., Papanikolaou, X., Paradissis, D., Parsons, B., Pyle, D.M. and Raptakis, C., 2012. Evolution of Santorini Volcano dominated by episodic and rapid fluxes of melt from depth. Nature Geoscience, 5(10), pp.749-754.

Parks, M.M., Moore, J.D., Papanikolaou, X., Biggs, J., Mather, T.A., Pyle, D.M., Raptakis, C., Paradissis, D., Hooper, A., Parsons, B. and Nomikou, P., 2015. From quiescence to unrest: 20 years of satellite geodetic measurements at Santorini 56 volcano, Greece. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(2), pp.1309-1328.

Pyle David M., Tamsin A. Mather and Juliet Biggs, 2013. Remote sensing of volcanoes and volcanic processes: integrating observation and modelling – introduction. Geological Society, Special Publications, 380, 1-13. London.

Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodriguez, E. and Goldstein, R.M., 2000. Synthetic aperture radar interferometry. Proceedings of the IEEE, 88(3), pp.333-382.

Tom Pfeiffer, Ingrid Smet ,2004.Volcano Discoveries: A Photographic Journey Around the World. New Holland Publishers, pp.70-74.

Zehner C., Ed. (2012). Monitoring Volcanic Ash from Space. ESA–EUMETSAT workshop on the 14 April to 23 May 2010 eruption at the Eyjafjöll volcano, South Iceland (ESA/ESRIN, 26–27 May 2010) ESA Publication STM-280. doi:10.5270/atmch-10-01"