

Γεωδαισία με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων

by Katerina Rapti

Submission date: 14-May-2024 01:22PM (UTC+0300)

Submission ID: 2379072300

File name: rapti_thesis_v16_NoRef.pdf (3.72M)

Word count: 12687

Character count: 74721

1. Εισαγωγή

Παρατηρείται ότι κάθε χρόνο, σε παγκόσμιο επίπεδο, πολλές περιοχές πλήττονται από μία τουλάχιστον φυσική καταστροφή. Αναφορικά, τέτοιες καταστροφές μπορεί να αποτελέσουν οι πλημμύρες, οι πυρκαγιές, οι αμμοθύελλες, οι σεισμοί, οι ηφαιστειακές εκρήξεις, οι κατολισθήσεις, οι ταχείες κατακόρυφες εδαφικές μετατοπίσεις κ.ά. Γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια συστήματα παρακολούθησης και μοντέλα προβλέψεων των περιοχών που παρουσιάζουν υψηλή επικινδυνότητα, λόγω της πληθώρας δορυφορικών συστημάτων παρατήρησης της γης (EO Satellites), που παρέχουν πολλά δεδομένα, τα οποία μπορούν να συνδυαστούν με περιοδικές επίγειες μετρήσεις GPS, για την παρακολούθηση της εκδήλωσης μιας φυσικής καταστροφής.

Οι προβλέψεις δίνουν την δυνατότητα έγκαιρων προειδοποιήσεων εκδήλωσης κινδύνων, που οδηγούν σε έγκαιρες λήψεις αποφάσεων και μέτρων μετριασμού αυτών των κινδύνων από τις αρμόδιες αρχές (Newhall & Punongbayan, 1996, Lockwood & Hazlett, 2013), καθώς εκτιμάται των φαινομένων. Αξίζει να αναφερθεί ότι όσο οι πληθυσμιακές πιέσεις εντείνονται, τόσο οι επικίνδυνες περιοχές είναι πιθανό να γίνουν όλο και περισσότερο αναπτυγμένες, αυξάνοντας έτσι το επίπεδο κινδύνου (Dunkley & Young, 2000).

Η ηφαιστειακή παρακολούθηση περιλαμβάνει μία ποικιλία μετρήσεων και παρατηρήσεων για την ανίχνευση αλλαγών στην επιφάνεια του ηφαιστείου που οφείλονται στην αυξανόμενη πίεση και τις πιέσεις που προκαλούνται από την κίνηση του μάγματος στο υπέδαφος. Οι σημαντικότερες από τις τεχνικές παρακολούθησης παραμόρφωσης του ανάγλυφου είναι το Παγκόσμιο Σύστημα Θέσης (GPS) και οι συμβολομετρικές τεχνικές SAR (Derdelakos et al, 2013).

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις σχεδόν πάντα προβλέπονται από την περίοδο «αδράνειας» (Potter et al., 2012, Barberi et al., 1984), παρόμοια προβλέπονται και οι ηφαιστειακοί σεισμοί και οι εδαφικές μετακινήσεις, οι οποίες είναι εξίσου επικίνδυνες. Η περίοδος αδράνειας μπορεί να επιτρέψει στους επιστήμονες των παρατηρητηρίων των ηφαιστείων να παρέχουν έγκαιρα ειδοποιήσεις, σε περίπτωση που υπάρχει ένα καλό σύστημα παρακολούθησης (Phillipson et al., 2013). Η παρακολούθηση των ηφαιστείων τόσο από το έδαφος, όσο και από το διάστημα, δίνει την δυνατότητα καλών βραχυπρόθεσμων προβλέψεων για την έναρξη εκρήξεων και τυχόν άλλων ηφαιστειακών κινδύνων (Sparks, 2003, Segall, 2013).

Ο σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η διαστημική εφαρμογή απεικονιστικής γεωδαισίας στο ηφαιστειακό περιβάλλον της νήσου Νίσυρου με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων του

25
δορυφόρου Sentinel-1 και τη μέθοδο MT-InSAR (Multi-temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar). Η τεχνική MT-InSAR είναι μια ισχυρή τηλεπισκοπική μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων της γήινης επιφάνειας και στην παρακολούθηση αυτών των παραμορφώσεων σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (Amardeep et al., 2018).

9
Ως δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν οι δορυφορικές εικόνες από τον δορυφόρο Sentinel-1A, από τον Ιανουάριο του 2018 μέχρι και τον Σεπτέμβριο του 2021. Πιο αναλυτικά, ελήφθησαν από την βάση δεδομένων της πλατφόρμας Copernicus Access Open Hub της European Space Agency (ESA) ενενήντα (90) εικόνες Single Look Complex (SLC) του δορυφόρου Sentinel-1A σε ανηφορική τροχιά (ascending), όπου ο δορυφόρος ακολουθεί πορεία από το Νότο προς τον Βορρά. Η επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων γίνεται στο λογισμικό Gamma, όπου χρησιμοποιείται η μέθοδος IPTA (Interferometric Point Target Analysis) για την εκτίμηση των οριζόντιων και των κατακόρυφων μετατοπίσεων του ανάγλυφου του νησιού της Νίσυρου στο χρονικό διάστημα που μελετάται. Τέλος, η ανάλυση και η απεικόνιση των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας, που αναφέρθηκε πιο πάνω, έγινε στο QGIS.

Η μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια, στα οποία αναλύεται η Multi-temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar. Πιο αναλυτικά:

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή: Στο κεφάλαιο της εισαγωγής παρουσιάζεται το κίνητρο της παρούσας μελέτης, στον στόχο και πως μπορεί να συμβάλει θετικά για την πρόβλεψη επικείμενων ηφαιστειογενών φυσικών καταστροφών.

Κεφάλαιο 2 - Περιοχή μελέτης: Στο κεφάλαιο της περιοχής μελέτης αναλύονται εκτενέστερα τα χαρακτηριστικά της περιοχής που εξετάζεται, όσον αφορά την ανθρωπογεωγραφία και τη φυσική γεωγραφία. Επίσης, γίνεται αναφορά στο Ελληνικό Ηφαιστειακό Τόξο, στη Σεισμική Επικινδυνότητα στον Ελλαδικό χώρο, στην ιστορία δημιουργίας του ηφαιστείου της Νίσυρου και τα φυσιογνωμικά του χαρακτηριστικά του και τέλος στο ηφαιστειακό κίνδυνο.

Κεφάλαιο 3 - Βιβλιογραφική επισκόπηση: Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά παλαιότερων μελετών που πραγματοποιήθηκαν στο νησί της Νίσυρου, οι οποίες ακολούθησαν παρόμοια μεθοδολογία και σκοπό.

Κεφάλαιο 4 - Διαστημικές εφαρμογές στην παρακολούθηση Ηφαιστειών: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά το θεωρητικό υπόβαθρο των παρατηρήσεων της γης, των συστημάτων ραντάρ και της συμβολομετρίας. Πιο αναλυτικά, αναφέρονται α) το πρόγραμμα Copernicus, β) η δορυφορική αποστολή Sentinel-1A, γ) ο δορυφόρος SAR, δ) οι μέθοδοι InSAR, DInSAR και MTInSAR και ε) την τεχνική SBS.

Κεφάλαιο 5 - Δεδομένα – Μεθοδολογία: Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται λεπτομερώς τα δεδομένα SAR SLC, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν. Κατόπιν περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία επεξεργασίας των δεδομένων αυτών με τη μέθοδο MTInSAR.

Κεφάλαιο 6 - ⁹ Αποτελέσματα: Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας, τα οποία απεικονίζονται σε χάρτες, και τα εξαγόμενα γραφήματα.

Κεφάλαιο 7 - Συζήτηση – Συμπεράσματα: Στο κεφάλαιο αυτό α) παρουσιάζονται εκ νέου τα συμπεράσματα αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, β) συγκρίνονται τα αποτελέσματα με τις παλαιότερες παρόμοιες μελέτες που έγιναν στην Νίσυρο, γ) γίνεται αναφορά στα προβλήματα προέκυψαν κατά την επεξεργασία, δ) προτείνεται ο συνδυασμός δεδομένων με δεδομένα επίγειων μετρήσεων και τέλος ε) προτείνονται ιδέες για μελλοντική έρευνα στην περιοχή.

2. Περιοχή μελέτης

2.1 Ανθρωπογεωγραφία

³ Η Νίσυρος είναι νησί του Αιγαίου και ανήκει στα Δωδεκάνησα της Περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου, που ²⁷ αποτελούν ένα σύνολο νησιών και νησίδων ανάμεσα στη Σάμο, την Κρήτη και τα ³⁰ μικρασιατικά παράλια, όπου έκτος από τη Νίσυρο, ανήκουν σε αυτά η Ρόδος, η Πάτμος, η Αστυπάλαια, η Κάλυμνος, η Κάρπαθος, η Κάσος, η Σύμη, η Τήλος, το Καστελόριζο και πλήθος μικρότερων νησιών.



Εικόνα 1: Περιοχή μελέτης

³ Η Νίσυρος ανήκει στα νησιά των αρχαίων Νοτίων Σποράδων¹ και βρίσκεται βορειοδυτικά της Ρόδου και συνορεύει με την Αστυπάλαια, την Τήλο και την Κω, στην οποία υπάγεται και διοικητικά. Έχει έκταση περίπου 41km² και σύμφωνα με την απογραφή του 2021, ²⁹ ο μόνιμος πληθυσμός της ανέρχεται στους 1048 κατοίκους. Η Νίσυρος έχει πρωτεύουσα το Μανδράκι.

³ Το νησί της Νισύρου μαζί με τις νησίδες Στρογγύλη, Άγιος Αντώνιος, Γυαλί, Περγούσα, Παχειά και Κανδελούσσα αποτελούν τον Δήμο Νισύρου. Ο Δήμος Νισύρου αποτελείται από τις

⁷ Κατά την αρχαιότητα ως Σποράδες ονομάζονταν όλα τα διάσπαρτα νησιά του Αιγαίου, εκτός της ιερής νήσου Δήλου Κυκλάδων (πηγή: <https://el.wikipedia.org>).

Κοινότητες Μανδρακίου, Εμπορείου και Νικιών. Η Κοινότητα Μανδρακίου περιλαμβάνει τους οικισμούς Μανδράκι, Λουτρά και τις νησίδες Γιαλί και Κανδελιούσσα, η Κοινότητα Εμπορείου περιλαμβάνει τους οικισμούς Εμπορείος και Πάλοι και τις νησίδες Αγίου Αντωνίου και Στρογγύλη και η Κοινότητα Νικιών περιλαμβάνει τους οικισμούς Νικιά και Αυλάκι και τις νησίδες Παχειά και Περγούσσα.



Εικόνα 2: Ο Δήμος Νισύρου

Σύμφωνα με τη μυθολογία, η μητέρα Γη έστρεψε τους θνητούς Γίγαντες ενάντια στους Ολύμπιους θεούς. Οι θεοί καταδίωξαν τους Γίγαντες. Ο θεός της θάλασσας, Ποσειδώνας, είχε εντολή από τον Δία να σκοτώσει τον Γίγαντα Πολυβώτη, ο οποίος διέσχισε το Αιγαίο στην προσπάθεια του να σωθεί. Ο Ποσειδώνας καταδιώκοντάς τον, τον πρόφτασε στην Κω και απέσπασε ένα τμήμα του νησιού με την τριαινά του και το έριξε στον Πολυβώτη και τον καταπλάκωσε. Το τμήμα αυτό της Κω έγινε η Νίσυρος.

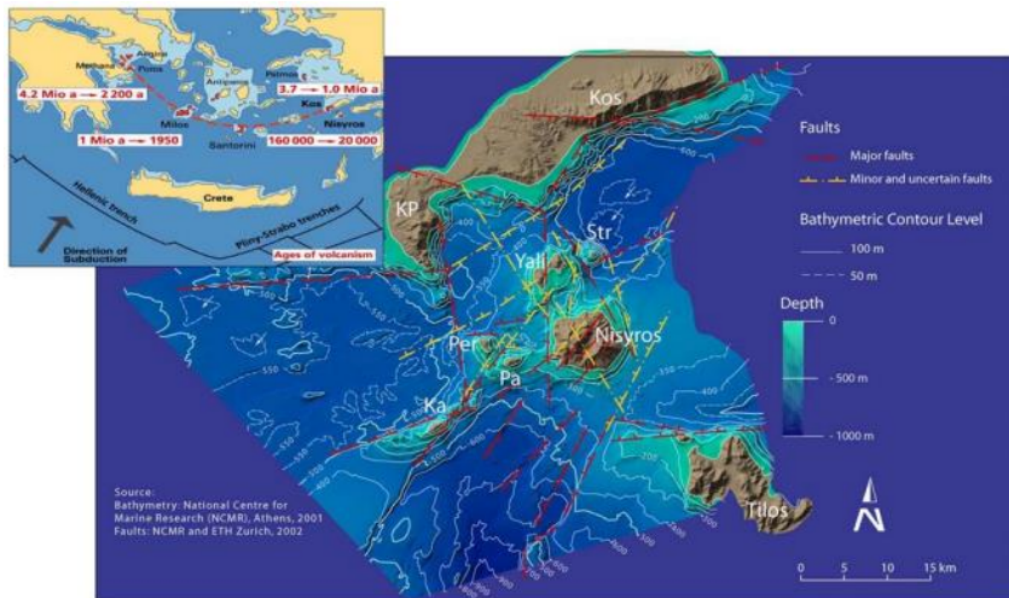
Οι περισσότεροι κάτοικοι του νησιού απασχολούνται στα δύο ορυχεία εξόρυξης ελαφρόπετρας και περλίτη, που βρίσκονται στη νησίδα Γυαλί, από όπου προέρχονται και τα μεγαλύτερα έσοδα του νησιού. Επίσης, απασχολούνται και στον τομέα του τουρισμού. Ελάχιστοι κάτοικοι δραστηριοποιούνται στην αλιεία, στην κτηνοτροφία και στην γεωργία.

2.2 Φυσική γεωγραφία

2.2.1 Το Ελληνικό Ηφαιστειακό Τόξο (ΕΗΤ)

Η δημιουργία του Ελληνικού Ηφαιστειακού Τόξου (ΕΗΤ) οφείλεται στην υποβύθιση της Αφρικανικής λιθόσφαιρας κάτω από την Ευρασιατική πλάκα (Derdelakos et al, 2013) και θεωρείται ως ζώνη ενεργούς ηφαιστειότητας. Το Ελληνικό Ηφαιστειακό Τόξο αποτελείται από τα μικρότερα ηφαιστειακά κέντρα της Αίγινας, του Πόρου, του Σουσακίου και των Μεθάνων, αλλά και τα μεγαλύτερα της Μήλου, της Σαντορίνης, της Νισύρου και της Κω. Στην Ευρύτερη περιοχή έχουν καταγραφεί ισχυρές εκρήξεις στα ηφαίστεια της Σαντορίνης, της Νισύρου και των Μεθάνων κατά τη διάρκεια των ιστορικών περιόδων (Fytikas et al. 1985).

Το Ελληνικό Ηφαιστειακό Τόξο αποτελείται από δύο τμήματα. Το δυτικό τμήμα εκτείνεται στην περιοχή μεταξύ Σουσακίου-Μεθάνων-Μήλου και το ανατολικό τμήμα εκτείνεται στην περιοχή μεταξύ της Σαντορίνης και της Νισύρου, όπου και παρατηρείται εντονότερη σεισμική δραστηριότητα σε σχέση με το δυτικό τμήμα (Παπαγεωργίου, 2011).



Εικόνα 3: Το ΕΗΤ με τα κύρια ηφαιστειακά κέντρα (πάνω αριστερά). Τοπογραφικός-Βαθυμετρικός χάρτης του ηφαιστειακού πεδίου Κω-Γυαλί-Νίσυρος. Συντομογραφίες: ΚΡ: Κέφαλος Πενινσούλα, Στρ: Στρογγύλι, Πε: Περγούσσα, Ρα: Παχιά, Κα: Κανδελιούσσα (Lagios et al., 2003)

Το Ελληνικό Ηφαιστειακό Τόξο θεωρείται ως ζώνη ενεργούς ηφαιστειότητας από το Πλειόκαινο μέχρι σήμερα. Ως ιστορικά ενεργά ηφαίστεια θεωρούνται τα Μέθανα, η Σαντορίνη και η Νίσυρος, στα οποία έχουν καταγραφεί ισχυρές εκρήξεις κατά την διάρκεια ιστορικών

περιόδων (Fytikas et al. 1985). Από τις λαβές των ηφαιστείων οι ηλικίες τους προσδιορίζονται από το Ανώτερο Μειόκαινο έως το Τεταρτογενές. Πιο πρόσφατοι υπολογισμοί ηλικίας των λαβών έχουν δείξει δύο τύπους ηφαιστείων. Ο πρώτος είναι τα παλαιότερα ηφαίστεια βόρεια του ηφαιστειακού μετώπου, τα ηφαίστεια της Αίγινας και της Κω, και ως δεύτερος τύπος τα νεότερα ηφαίστεια κατά μήκος του ηφαιστειακού μετώπου, δηλαδή των Μεθάνων, της Σαντορίνης και της Νισύρου (Matsuda et al. 1999).

Έχει παρατηρηθεί μία μετατόπιση της δραστηριότητας του μάγματος από τη Βόρεια Ελλάδα και τη Βουλγαρία (Ηώκαινο-Ολιγόκαινο) προς τα νότια κατά το Καινοζωικό (Papanikolaou 1993, Thanassoulas 1998, Thanassoulas et al. 1999), δηλαδή προς τα νησιά του Βορείου Αιγαίου (Κατ. Μειόκαινο), τις Κυκλάδες (Μειόκαινο) και στο Ελληνικό Ηφαιστειακό Τόξο (Πλειόκαινο-Τεταρτογενές), όπως αυτό ορίζεται σήμερα. Η μετατόπιση αυτή του ηφαιστειακού τόξου αποδίδεται από πολλούς ως το αποτέλεσμα της γρήγορης εφελκυστικής τάσης που υφίστατο το Αιγαίο μετά το Μέσο Μειόκαινο σε συνδυασμό με το φαινόμενο της οπισθοχώρησης της ζώνης υποβύθισης (Royden 1993).

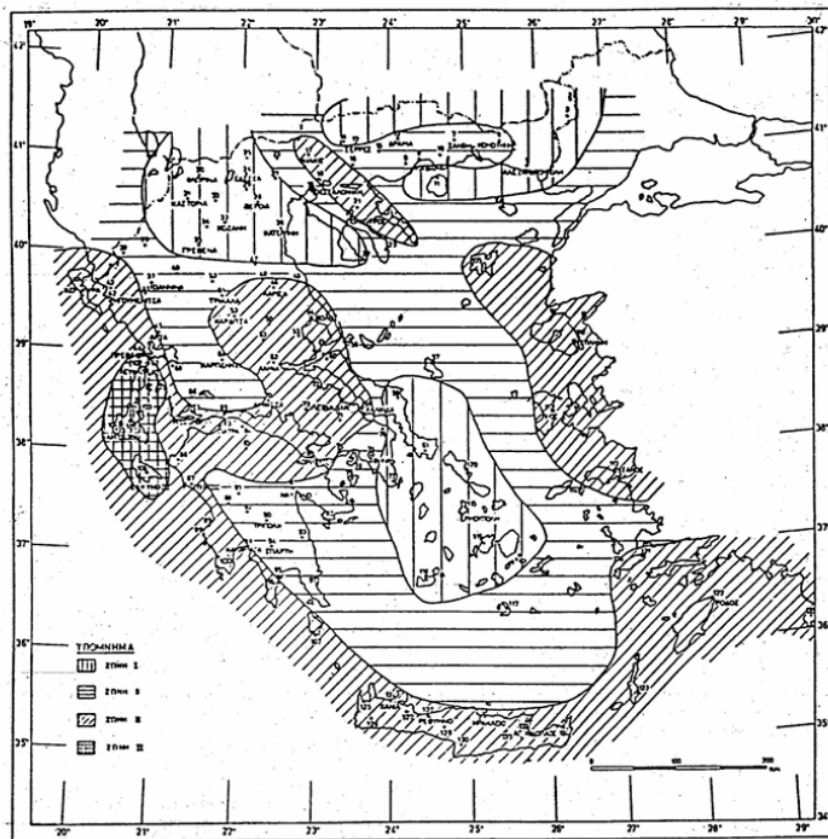
Κάποια ηφαιστειακά κέντρα του Τόξου, με εξαίρεση τη Μύκονο, ξεκίνησαν τη δραστηριότητά τους στο Κατώτερο Πλειόκαινο, έπειτα ακολούθησε μια παύση της δραστηριότητας στο Ανώτερο Πλειόκαινο και το φαινόμενο επαναλήφθηκε μέσα στο Τεταρτογενές (Αν. Πλειστόκαινο στην Αίγινα και στη Σαντορίνη, στο Μέσο Πλειστόκαινο στα Μέθανα, στην Νίσυρο και στη Σαντορίνη). Η μορφή της ηφαιστειότητας συνδέεται με την ένδειξη δύο φάσεων καθίζησης της λεκάνης στην περιοχή του τόξου (Doutsos & Piper 1990, Perissoratis et al. 1993) και στον εφελκυσμό να έχει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της θέσης και του χρόνου ηφαιστειότητας.

Ο εφελκυσμός ξεκίνησε κατά την διάρκεια του Ανώτερου Μειόκαινου στην περιοχή του Αιγαίου, μεταβάλλοντας την διεύθυνση του από ΔΒΔ-ΑΝΑ (Αν. Μειόκαινο) σε ΒΑ-ΝΔ (Πλειόκαινο-Κατ. Πλειστόκαινο), ενώ κατά την παρούσα περίοδο έχει διεύθυνση που κυμαίνεται από Β-Ν σε ΒΔ-ΝΑ (Mercier et al. 1989). Ο Angelier et al. (1982) ταξινομήσε τους μηχανισμούς εφελκυσμού σε δύο κατηγορίες: η πρώτη με ηλικία Πλειόκαινο ή Κατώτερο Τεταρτογενές και η δεύτερη με ηλικία Μέσο-Άνω Πλειστόκαινο ή Ολόκαινο. Οι εφελκυστικές τάσεις επομένως, που αναπτύχθηκαν ως επακόλουθο της σύγκρουσης των πλακών Αφρικής και Ευρασίας, προκάλεσαν έντονες διαρρήξεις στην περιοχή του Αιγαίου, οι οποίες διευκόλυναν την άνοδο του μάγματος και την δημιουργία της ηφαιστειότητας.

Οι σεισμολογικές μελέτες που έχουν γίνει σε όλη την έκταση ² του ηφαιστειακού τόξου συμπεραίνουν ότι η ρηγή σεισμική δραστηριότητα (συχνότητα σεισμών, μέγιστο μέγεθος) είναι μεγαλύτερη στο ανατολικό τμήμα (Σαντορίνη, Νίσυρος) του ηφαιστειακού τόξου από ότι στο δυτικό (Σουσάκι, Μέθανα, Μήλος), γεγονός που επαληθεύεται από την ηφαιστειακή ² δραστηριότητα, η οποία είναι εμφανώς εντονότερη στα ανατολικά ηφαιστειακά κέντρα. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο βαθμό της εφελκυστικής παραμόρφωσης του φλοιού στο ανατολικό ηφαιστειακό τόξο (26mm/yr), σε σύγκριση με το δυτικό τόξο (2mm/yr) (Papazachos & Panagiotopoulos 1992).

2.2.2 Η Σεισμική Επικινδυνότητα της Ελλάδας

2 Η έντονη σεισμική δραστηριότητα στον Ελλαδικό χώρο οδήγησε στην έγκριση 2 του Νέου Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (NEAK) σύμφωνα με την 12 με αριθ. Δ17α/08/32/Φ.Ν.275 απόφαση του Υπουργού ΥΠΕΧΩΔΕ, οποίος εφαρμόζεται παράλληλα με της διατάξεις του Β.Δ. της 19/26 Φεβρουαρίου 1959 «περί αντισεισμικού κανονισμού οικοδομικών έργων», όπως αυτές τροποποιήθηκαν και συμπληρώθηκαν με τις διατάξεις της αριθ. ΕΔ2α/01/44/Φ.Ν.275/4.4.84 απόφασης του Υπουργού Δημοσίων Έργων.

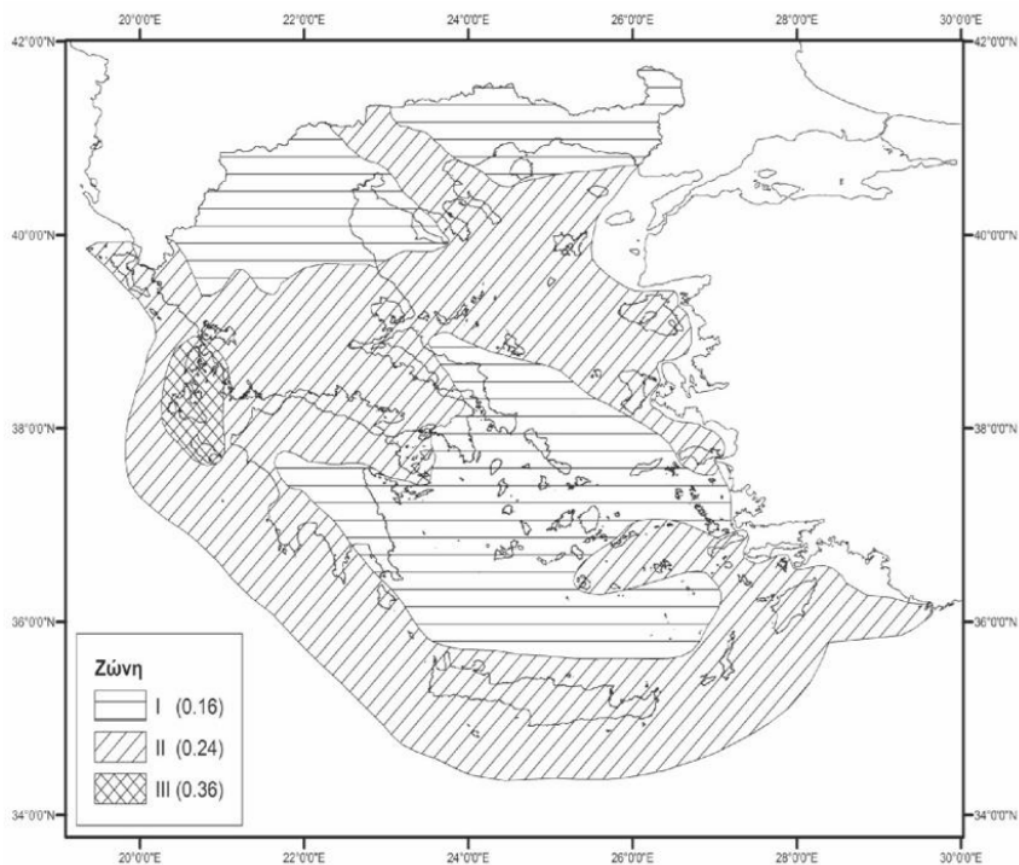


Εικόνα 4: Χάρτης Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδος (ΦΕΚ 613/Β/12-10-1992 - Έγκρισης του Νέου Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού)

24 Ο Κανονισμός αφορά τον σχεδιασμό των δομημάτων σε περιπτώσεις 11 σεισμού, χωρίς να καλύπτει τα έργα για τα οποία προβλέπονται μικρή ή πλήρης αντισεισμική μόνωση. Καθορίζει i) 11 τις ελάχιστες σεισμικές δράσεις σχεδιασμού και τους αντίστοιχους συνδυασμούς δράσεων, ii) τις απαιτήσεις συμπεριφοράς για τους παραπάνω συνδυασμούς δράσεων και τα κριτήρια της ασφάλειας, iii) τις μεθόδους υπολογισμού της εντάσεως και της παραμορφώσεως των κατασκευών και iv) τις ειδικές κατασκευαστικές διατάξεις των φορέων και των υλικών.

16
 Με την εφαρμογή του Κανονισμού η Χώρα υποδιαιρείται σε τέσσερις Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας I, II, III και IV, τα όρια των οποίων καθορίζονται στον Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας (Εικόνα 4). Σε κάθε Ζώνη Σεισμικής επικινδυνότητας αντιστοιχεί και μία τιμή σεισμικής επιτάχυνσης του εδάφους Α. Πιο αναλυτικά, η Ζώνη I έχει τιμή επιτάχυνσης 0.12g, η Ζώνη II έχει τιμή επιτάχυνσης 0.16g, η Ζώνη III έχει τιμή επιτάχυνσης 0.24g και η Ζώνη IV έχει τιμή επιτάχυνσης 0.36g. Οι τιμές επιτάχυνσης έχουν πιθανότητα υπέρβασης 50% στα 50 χρόνια, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις των σεισμολογικών δεδομένων.

Με την με αριθ. Δ17α/141/3/ΦΝ275 απόφαση του Υπουργού ΥΠΕΧΩΔΕ εγκρίθηκε ο «Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (Έκδοση – 2000)», ο οποίος αποτελεί αναθεώρηση του Νέου Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΝΕΑΚ), καθώς προέκυψαν ανάγκες αναθεώρησης των αρχικών αποφάσεων και η απαίτηση για 11 προσαρμογή στους αντίστοιχους Ευρωπαϊκούς EC8 (Αντισεισμικός) και EC7 (Θεμελιώσεις).



Εικόνα 5: Χάρτης Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδος (ΦΕΚ 1154/Δ/12-08-2003 - Αναθεώρηση του Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας)

Το 2003 ο χάρτης της Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας αναθεωρήθηκε (Εικόνα 5), όπως ορίστηκε με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (Έκδοση – 2000), ΕΑΚ 2000 και εγκρίθηκε με την Δ17α/141/3/ΦΝ275/15.12.1999 (ΦΕΚ Β' 2184) απόφαση Υπουργού ΥΠΕΧΩΔΕ και τροποποιήθηκε με την Δ17α/67/ΦΝ275/6.6.2003 (ΦΕΚ Β' 781) απόφαση Υπουργού ΥΠΕΧΩΔΕ και αναθεωρήθηκε με την Δ17α/115/6/ΦΝ275/7.8.2003 (ΦΕΚ Β' 1154) απόφαση Υφυπουργού ΥΠΕΧΩΔΕ, απεικονίζει την υποδιαίρεση του Ελλαδικού χώρου στις Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας Ι, ΙΙ και ΙΙΙ.

Πιο αναλυτικά, η Ζώνη Ι ορίζεται ως ζώνη χαμηλής επικινδυνότητας, η Ζώνη ΙΙ ορίζεται ως ζώνη μέσης επικινδυνότητας και η Ζώνη ΙΙΙ ορίζεται ως ζώνη υψηλής επικινδυνότητας. Οι κατανομή των νέων ζωνών στηρίχτηκαν στις μέγιστες ενεργές τιμές εδαφικής επιτάχυνσης ΜΕΕΕΣ, οι οποίες εισάγονται στον Κανονισμό και δεν εμπίπτουν με τις τιμές των μέγιστων εδαφικών επιταχύνσεων ΜΕΕ, οι οποίες προκύπτουν από τα δεδομένα σεισμολογικών φορέων της Χώρας και αυτό οφείλεται στην επίδραση των επιταχύνσεων στα σύγχρονα δομικά υλικά και στην αντοχή που παρουσιάζουν αυτά ενάντια στις επιταχύνσεις. Αυτός είναι ο λόγος που εΐθισται σε διεθνές επίπεδο η εφαρμογή ενός σημαντικά μειωτικού συντελεστή επί των τιμών ΜΕΕ ώστε να γίνει η εκτίμηση των τιμών των ΜΕΕΕΣ.

Από τον Χάρτη Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας προκύπτει ότι η περιοχή που εκτείνεται το Ελληνικό Ηφαιστειακό Τόξο χαρακτηρίζεται από σχετικά μικρή και μεσαία επικινδυνότητα, καθώς εμπίπτει στις Ζώνες Ι και ΙΙ, σύμφωνα με την πρόσφατη αναθεώρηση του Κανονισμού. Όσον αφορά τη Νίσυρο, στην αναθεώρηση του Κανονισμού ανήκει πλέον στην Ζώνη Επικινδυνότητας ΙΙ, δηλαδή στη Ζώνη Μέσης Επικινδυνότητας, σε αντίθεση με τις προηγούμενες διατάξεις του εντασσόταν στην Ζώνη Επικινδυνότητας ΙΙΙ. Παρόλου που αναθεωρήθηκε η Ζώνη Επικινδυνότητας, παρατηρείται ότι η εκτίμηση της τιμής της σεισμικής επιτάχυνσης του εδάφους δεν μεταβάλλεται για την περιοχή μελέτης μας, διατηρείται η αρχική εκτίμηση στα $0.24g^2$.

² Όπου g η επιτάχυνση βαρύτητας της γης.

2.2.3 Ιστορική αναδρομή στη δημιουργία του ηφαιστείου της Νισύρου

Πριν από 160000 χρόνια πριν σημειώθηκε η μεγαλύτερη έκρηξη στην Ανατολική Μεσόγειο, με την οποία αναδύθηκαν περισσότερα από 100km³ από πυροκλαστικά υλικά, από τα οποία σχηματίστηκε ο ηφαιστειακός τόφος³ της Κω. Οι στάχτες, η ελαφρόπετρα και η πυροκλαστική ροή κατέστρεψαν μία έκταση εμβαδού 3000km². Το κέντρο αυτής της καταστροφικής έκρηξης εικάζεται ότι ήταν βόρεια με βορειοανατολικά του νησιού Γυαλί (Λάγιος, 2000). Η ηφαιστειακή ιστορία της Νισύρου μπορεί να χωριστεί σε τρεις κύριες ηφαιστειακές περιόδους.

Η πρώτη περίοδος είναι η περίοδος της προ-καλντέρας του Stratovolcano⁴ και χρονολογείται πριν 160.000 με 40.000 χρόνια. Στην Περιοχή ανάμεσα της Κοντελιούσας και τα Τουρκικά παράλια εξερράγει λάβα, η οποία αποτέλεσε την ηφαιστειακή βάση της Νισύρου. Παράλληλα, η υποθαλάσσια λάβα δημιούργησε ένα Stratovolcano ύψους 500km με 700km, το οποίο σχηματίστηκε σε περισσότερο από 100.000 χρόνια. Τα ηφαιστειακά πετρώματα και η λάβα σχημάτισαν τη βορειοδυτική, νότια και βορειοανατολική κλίση του νησιού.

Η δεύτερη περίοδος είναι ο σχηματισμός της καλντέρας⁵ και χρονολογείται πριν από 40.000 με 15.000 χρόνια. Ένας τεράστιος όγκος πυροκλαστικής ροής⁶ και ελαφρόπετρας κάλυψε ολόκληρο το νησί. Έπειτα, μια μεγάλη κατάρρευση ενός ηφαιστείου δημιούργησε μία καλντέρα διαμέτρου 4km με 5km και βάθους μερικών εκατοντάδων μέτρων. Την περίοδο αυτή σημειώθηκε μεγάλη εναπόθεση ελαφρόπετρας.

Η Τρίτη περίοδος είναι η περίοδος μετά τον σχηματισμό της καλντέρας και τη ροή της λάβας και χρονολογείται πριν από 20.000 με 15.000 χρόνια περίπου. Μεγάλες μάζες από ρυόλιθου απελευθερώθηκαν σχηματίζοντας θόλους και στο κεντρικό και νοτιοανατολικό μέρος του νησιού έρεε μια λεπτή στρώση λάβας.

³ Τόφος είναι πυροκλαστικό πέτρωμα που προέρχεται από υλικά που εκτινάσσονται από τα ηφαίστεια. Ανάλογα με τη φύση των ηφαιστειακών αναβλημάτων (λίθοι, βολίδες, άμμος τέφρα) και την ορυκτολογική τους σύσταση έχουμε διαφορετικά είδη τόφων (πηγή: <https://el.wikipedia.org>).

⁴ Στρωματοηφαίστριο (stratovolcano) είναι ένα σύνθετο κωνικό ηφαίστριο που σχηματίζεται από στρώματα ηφαιστειακού υλικού που εναποτίθενται κατά τη διάρκεια διαδοχικών ηφαιστειακών εκρήξεων. Τα στρωματοηφαίστεια τείνουν να έχουν ήπια κλίση στη βάση τους, αλλά ανεβαίνουν γρήγορα κοντά στην κορυφή σχηματίζοντας ψηλές βουνοκορφές (Eldridge St., 2022).

⁵ Καλντέρα ή Καλντέρα ονομάζεται η εδαφική κοιλότητα που σχηματίζεται όταν υποχωρεί το τμήμα ενός ηφαιστειακού κώνου ή όταν διαβρώνονται βαθμιαία τα εσωτερικά τοιχώματά του (πηγή: <https://el.wikipedia.org>).

⁶ Η πυροκλαστική ροή, γνωστή και ως πυροκλαστικό ρεύμα πυκνότητας, είναι ένα ρευστοποιημένο μίγμα από στερεά και σχεδόν στερεά θραύσματα και από υπέρθερμα διαστελλόμενα αέρια που κατέρχεται έρποντας την πλαγιά ενός ηφαιστειακού οικοδομήματος.

2.2.4 Το ηφαίστειο της Νισύρου

Η Νίσυρος είναι ένα νεαρό στρωματοηφαίστειο (stratovolcano) στο νοτιοανατολικό άκρο του Ελληνικού Ηφαιστειακού Τόξου. Η Νίσυρος αποτελούσε ένα υποθαλάσσιο ηφαίστειο, το οποίο ανυψώθηκε τείνοντας να γίνει ένα ηφαίστειο με θωράκιση και μετατράπηκε σε έναν πολύπλοκο κώνο με πολλές εκρηκτικές πηγές. Μετά από δύο βίαιες εκρήξεις που σημειώθηκαν, κατέρρευσε, σχηματίζοντας τις καλδέρες και δημιούργησε ένα πολύπλοκο υδροθερμικό πεδίο.

³ Αποτελείται από ηφαιστειογενή βουνά, ενώ το κέντρο της νήσου καταλαμβάνει μία καλδέρα διαμέτρου 4km. Από τον πυθμένα και μέχρι την επιφάνεια της καλδέρας απαντάται θείο. Μέσα στη καλδέρα βρίσκεται ο μεγαλύτερος υδροθερμικός κρατήρας στον κόσμο, ο Στέφανος, ο οποίος έχει διάμετρο ³ 300m και θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα αξιοθέατα του νησιού. Η Νίσυρος έχει συνολικά πέντε (5) κρατήρες, ο Στέφανος, ο Μικρός Στέφανος, ο Λογοθέτης, ο Μεγάλος Πολυβώτης, ο Μικρός Πολυβώτης και ο Αλέξανδρος ή Φλέγεθρον (πηγή: <https://nisyrosgeopark.gr>).



Εικόνα 6: Η θέα του ηφαιστείου (πηγή: <https://nisyrosgeopark.gr>)

¹⁸ Η τελευταία έκρηξη του ηφαιστείου έλαβε χώρα το 1887. Λόγω της ηφαιστειακής δραστηριότητας στη Νίσυρο υπάρχουν θερμές πηγές με θερμοκρασία που κυμαίνεται από 30 μέχρι 60 °C, εκ των οποίων οι κυριότερες βρίσκονται βόρεια του νησιού, στους οικισμούς Λουτρά και Πάλιοι (πηγή: <https://el.wikipedia.org>).

Όσον αφορά την έναρξη της έντονης σεισμικής δραστηριότητας, αυτή προσδιορίζεται τουλάχιστον 15.000 με 20.000 χρόνια πριν και οφείλεται στην υποβύθιση της Αφρικανικής λιθόσφαιρας κάτω από την Ευρασιατική πλάκα. Στην πιο πρόσφατη ιστορία του ηφαιστείου της Νισύρου παρουσιάστηκε έντονη σεισμική δραστηριότητα τη χρονική περίοδο 1996 με 1997, όπου σημειώθηκαν σεισμοί ύψους 5,5R με επίκεντρο τα 10km βάθος, που είχαν ως αποτέλεσμα την καταστροφή τριάντα (30) σπιτιών στο Μανδράκι. Η έντονη σεισμική δραστηριότητα οφειλόταν στις διεισδύσεις νέου μάγματος (Παπαγεωργίου, 2011). Μετά από αυτό, επήλθε μία περίοδος αδράνειας.

³² Το διάστημα από τον Απρίλιο του 2021 μέχρι τον Σεπτέμβριο του ίδιου έτους καταγράφηκαν 1.500 σεισμοί. Οι περισσότεροι σεισμοί καταγράφονται στην περιοχή μεταξύ βόρεια της Νισύρου και του νησιού Γυαλί. Μετά από την έντονη σεισμική δραστηριότητα που παρουσίασε το έτος 1996, τον Ιούνιο του 1997 στο νησί εγκαταστάθηκε ένα δίκτυο GPS, το οποίο παρείχε πληροφορίες μέχρι και το 2002. Σε όλους τους σταθμούς του δικτύου παρατηρήθηκε μία ανύψωση της τάξεως των 14mm με 140mm. Παράλληλα, καταγράφηκαν οριζόντιες μετατοπίσεις που οι οποίες κυμάνθηκαν μεταξύ 13mm και 53mm. Τα διανύσματα μετατόπισης δείχνουν ότι η Νίσυρος υφίσταται επέκταση προς τα ανατολικά, δυτικά και νότια (Lagios et al. 2002) (βλ. Κεφάλαιο 3).

Ο κίνδυνος και η επικινδυνότητα μιας υδροθερμικής έκρηξης είναι σχετικά υψηλός, καθώς υπάρχουν πολυάριθμοι πρόσφατοι υδροθερμικοί κρατήρες στο έδαφος της καλδέρας της Νισύρου, περιοχή που επισκέπτονται χιλιάδες τουρίστες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Vougioukalakis & Fytikas, 2005). Ιδιαίτερα η περιοχή στο Λακκί, όπου έλαβαν χώρα όλες οι προηγούμενες εκρήξεις και συγκεντρώνονται ενεργά φουμαρόλια, είναι η ζώνη με τον υψηλότερο κίνδυνο (Marini et al., 1993).

Η αξιολόγηση και η πρόβλεψη του ηφαιστειακού κινδύνου, παραδείγματος χάρι μια φρεατομαγνητική⁷ έκρηξη, δεν μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια. Ένα τέτοιο γεγονός μπορεί να θέσει σε σοβαρό κίνδυνο όχι μόνο τους κατοίκους της Νισύρου, αλλά ακόμη και την κοντινή περιοχή της Κω και τις γειτονικές ακτές της Τουρκίας (Vougioukalakis & Fytikas, 2005).

⁷ Η φρεατομαγνητική έκρηξη χαρακτηρίζεται από εκρηκτική εξώθηση του υπό πίεση γεωθερμικού ρευστού στην επιφάνεια του εδάφους λόγω αστάθειας του υδροθερμικού συστήματος. Αν και το μέγεθος της φρεατομαγνητικής έκρηξης είναι σχετικά μικρό, η φρεατομαγνητική έκρηξη είναι ο πιο συχνός τύπος έκρηξης και μπορεί να είναι επικίνδυνη για τις περιοχές που βρίσκονται πλησίον του τόπου έκρηξης (Fujinawa et al. 2008).

2.3. Ηφαιστειακός κίνδυνος

35

Ως ηφαιστειακός κίνδυνος ορίζεται οποιαδήποτε πιθανή ηφαιστειογενής δραστηριότητα, η οποία θέτει σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές και εγκαταστάσεις κυρίως περιμετρικά του ηφαιστείου. Οι ηφαιστειακοί κίνδυνοι διακρίνονται σε πρωτογενείς και δευτερογενείς.

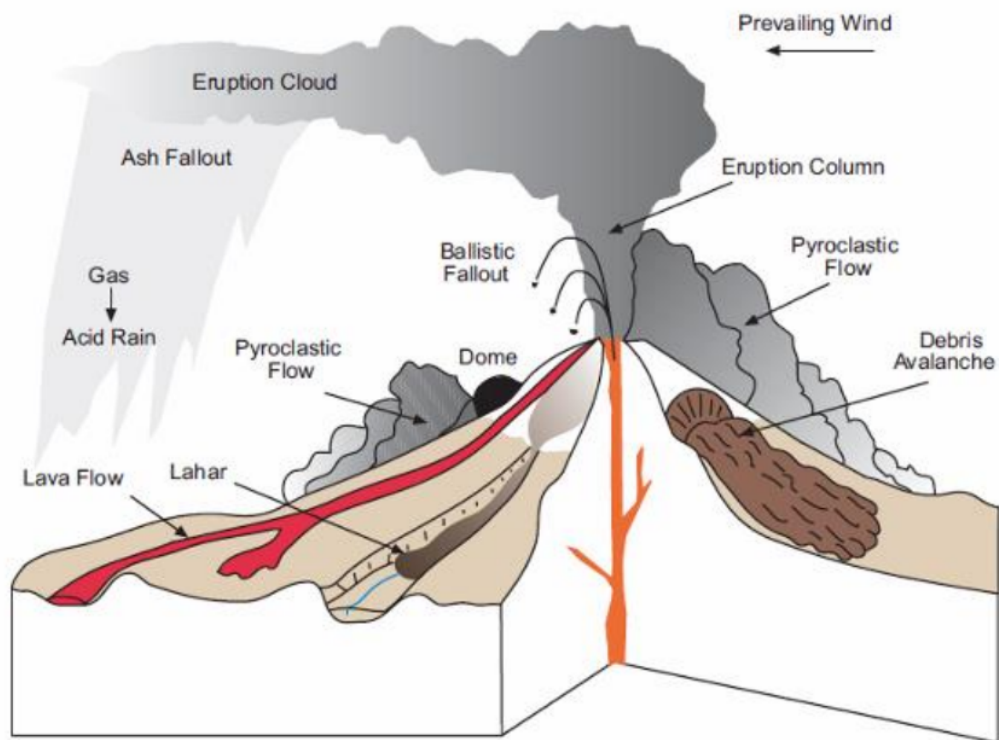
Ως πρωτογενείς ηφαιστειακοί κίνδυνοι θεωρούνται οι κίνδυνοι που προκαλούνται από την έκρηξη ενός ηφαιστείου και εξαρτιούνται από το ένταση του φαινομένου. Συνήθως, οι ηφαιστειακές εκρήξεις συνοδεύονται από πυροκλαστικές ροές (pyroclastic flow), τα οποία αποκαλούνται και ως φλεγόμενα νέφη (glowing clouds). Οι ροές αυτές δημιουργούνται από τη συνένωση φουσαλίδων στο ²μάγμα εντός του ηφαιστειακού αγωγού, οι οποίες διογκώνονται και σπάνε, θραύοντας τη λάβα. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η δημιουργία ενός πυκνού σύννεφου, το οποίο αποτελείται από καυτά αέρια και πυροκλαστικό υλικό, το οποίο ρέει στις πλαγιές του ηφαιστείου. Τέτοια σύννεφα μπορούν να διανύσουν πολλά χιλιόμετρα στην ατμόσφαιρα και να αναπτύξουν ταχύτητα ως 30m/sec (Χατζηφώτη, 2016).

Κατά την έκρηξη του ηφαιστείου εκτοξεύεται τέφρα (tephra) στην ατμόσφαιρα, που όταν πέφτει στο έδαφος μπορεί να βλάψει τα ζώα, τη γεωργία και μολύνει το νερό. Επίσης, οι ροές λάβας (lava flow), που δημιουργούνται με την έκρηξη του ηφαιστείου, θεωρούνται εξαιρετικά επικίνδυνες, ειδικά σε περιπτώσεις που δεν ρέουν εντός του κεντρικού αγωγού (Χατζηφώτη, 2016). Τέλος, οι θόλοι λάβας (lava domes), σχηματίζονται κατά την έκρηξη του ηφαιστείου, όπου συσσωρεύεται πολύ παχύρευστο μάγμα στην περιοχή κοντά στην έξοδο. Η πίεση που ασκείται κατά τη συσσώρευσή του μάγματος στην περιοχή του θόλου μπορεί να αποσταθεροποιήσει τη δομή και να προκαλέσει έκρηξη και κατάρρευση του θόλου λάβας (Sigurdsson, 2015).

Ως δευτερογενείς ηφαιστειακοί κίνδυνοι ορίζονται οι εδαφικές παραμορφώσεις που προκαλούνται από την εκδήλωση του φαινομένου, το οποίο δημιουργεί αποσταθεροποίηση του εδάφους. Τέτοιοι κίνδυνοι μπορεί να είναι τα λαχάρς (lahars), τα οποία αποτελούν ηφαιστειακές λασπορροές, οι κατολισθήσεις (landslide), τα θραύσματα (fragment), οι χιονοστιβάδες (avalanche), οι πλημμύρες Jökulhlaup⁸, τα τσουνάμι κ.ά.

⁸ Jökulhlaup είναι μια ισλανδική λέξη που χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια πλημμύρα από έκρηξη παγετώνα, μια ξαφνική απελευθέρωση νερού από μια λίμνη που βρίσκεται κάτω ή κοντά σε έναν παγετώνα. Ένας από τους παράγοντες που πυροδοτούν ένα jökulhlaup θα μπορούσε να είναι η έκρηξη ενός ηφαιστείου που βρίσκεται κάτω από έναν παγετώνα και λιώνει τον υπερκείμενο πάγο ή αποδυναμώνει ένα φράγμα που αποτελείται από ιζήματα παγετώδους μορίνης. Η ξαφνική απομάκρυνση του φράγματος της λίμνης απελευθερώνει έναν τεράστιο όγκο νερού για την παραγωγή μιας "μεγαλοπλημμύρας" που μπορεί να παρασύρει δρόμους και γέφυρες (πηγή: <https://www.bgs.ac.uk/>).

Οι ηφαιστειακοί κίνδυνοι διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του ηφαιστείου (π.χ. κώνος σκωριών, ασπιδόμορφο ηφαίστειο, στρωματοηφαίστειο κ.ά.), τη σύνθεση του μάγματος, τον τρόπο έκρηξης, την κλίμακα και την ένταση σε κάθε δεδομένη στιγμή. Αυτοί οι κίνδυνοι έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και μπορεί να εμφανιστούν σε διαφορετικούς συνδυασμούς σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (Loughlin et al. 2019). Έχει παρατηρηθεί ότι η ισχύ της έκρηξης του ηφαιστείου είναι ανάλογη του διαστήματος ηρεμίας του (Χατζηφώτη, 2016).



Εικόνα 7: Ηφαιστειακοί κίνδυνοι (Munro & Parkin 1999)

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα μπορεί να δημιουργήσει πολλά προβλήματα σε περιοχές αρκετά χιλιόμετρα μακριά από το ηφαίστειο, όπως η πτώση στάχτης στην ατμόσφαιρά, η απελευθέρωση αερίων και η δημιουργία τσουνάμι. Τέτοιοι κίνδυνοι προκαλούν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων και στην οικονομία, παρόλα αυτά υπάρχουν συναισθηματικοί, κοινωνικοί και οικονομικοί λόγοι για τους οποίους οι άνθρωποι ζουν και δραστηριοποιούνται δίπλα τους. Εκτιμάται ότι περισσότεροι από 500 εκατομμύρια άνθρωποι κινδυνεύουν από τους κινδύνους που προκαλούν τα ηφαίστεια (Dunkley & Young, 2000).

Ο ηφαιστειακός κίνδυνος στον Ελλαδικό χώρο είναι ιδιαίτερα χαμηλός και περιορίζεται στα ενεργά ηφαίστεια της Σαντορίνης και της Νισύρου και σε ακτίνα μερικών δεκάδων χιλιομέτρων από αυτά (πηγή: <https://www.pde.gov.gr>).

Η ηφαιστειακή αδρανής περίοδος επιτρέπει στους επιστήμονες να παρέχουν έγκαιρα προειδοποιήσεις για την ηφαιστειακή δραστηριότητα, σε περιπτώσεις όπου υπάρχει καλό δίκτυο παρακολούθησης (Phillipson et al., 2013).

Τέτοια δίκτυα παρακολούθησης μπορεί να είναι ένα δίκτυο σεισμομέτρων για τον εντοπισμό ηφαιστειακών σεισμών που προκαλούνται από την κίνηση του μάγματος (Chouet, 1996, McNutt, 2005), ένα δίκτυο εδαφικών παραμορφώσεων (π.χ. παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης) για τη μέτρηση της ανόδου και της πτώσης της επιφάνειας του εδάφους, καθώς το μάγμα μεταναστεύει στο υπέδαφος (Dzurisin, 2003, Larson et al., 2010), η αξιολόγηση μέσω τηλεπισκόπησης των εκπομπών αερίων στην ατμόσφαιρα (Nadeau et al., 2011, Edmonds, 2008), η δειγματοληψία και ανάλυση αερίων και νερού που εκπέμπονται από την κορυφή και τις πλευρές ενός ηφαιστείου (Aiurra et al., 2010), οι παρατηρήσεις της ηφαιστειακής δραστηριότητας με τη χρήση διαδικτυακών καμερών και θερμικών εικόνων, οι μετρήσεις άλλων γεωφυσικών ιδιοτήτων, π.χ. strainmeters⁹ (Roberts et al., 2011), τα συστήματα infrasound¹⁰ (Johnson & Ripepe, 2011) και οι περιβαλλοντικοί δείκτες, π.χ. τα επίπεδα υπόγειων υδάτων (Loughlin et al., 2019).

Σήμερα το ηφαίστειο της Νισύρου θεωρείται ενεργό και γι' αυτό το λόγο οι επιστήμονες της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν χρηματοδοτήσει ένα ειδικό πρόγραμμα παρακολούθησης με το όνομα Geowarn Project. Σε αυτό αναφέρεται ότι οι ηφαιστειακοί κίνδυνοι που μπορεί να προκληθούν είναι οι υδροθερμικές εκρήξεις αερίου και ατμού από τον κρατήρα του ηφαιστείου, οι κατολισθήσεις, οι κίνδυνοι από τσουνάμι και η μαγματική και ηφαιστειακή δραστηριότητα.

⁹ Strainmeters χρησιμοποιούνται για τη συνεχή παρακολούθηση της τάσης του φλοιού, είναι εξαιρετικά ευαίσθητα όργανα με ακρίβεια μικρότερη από 1 μέρος ανά δισεκατομμύριο (δηλαδή λιγότερο από 1 ίντσα στα 16.000 μίλια). Τα όργανα αυτά παρακολουθούν τη μεταβολή της τάσης του φλοιού κοντά σε ενεργά ρήγματα και ηφαίστεια που σχετίζονται με την ολίσθηση των ρηγμάτων, τους σεισμούς και την ηφαιστειακή δραστηριότητα (πηγή: <https://earthquake.usgs.gov>).

¹⁰ Infrasound είναι τα ακουστικά κύματα με πολύ χαμηλές συχνότητες ονομάζονται. Τα κύματα αυτά βρίσκονται κάτω από τη ζώνη συχνοτήτων που ακούγεται από το ανθρώπινο αυτί, η οποία συνήθως κυμαίνεται από 20 έως 20.000 Hertz. Παράγεται από διάφορες φυσικές και μη πηγές: εκρήξεις ηφαιστείων, σεισμούς, μετεωρίτες, καταιγίδες κ.ά. (πηγή: <https://www.ctbto.org>).

3. Βιβλιογραφική επισκόπηση

Το ηφαίστειο στο νησί της Νίσυρου έχει υπάρξει τα τελευταία χρόνια αντικείμενο έρευνας για πλήθος μελετών, που αφορούν την παρακολούθηση της εδαφικής παραμόρφωσης με τη χρήση διάφορων γεωδαιτικών τεχνικών. Οι περισσότερες μελέτες εκπονήθηκαν με την ανάπτυξη της δορυφορικής συμβολομετρίας και εστιάζουν στην χρονική περίοδο 1995 με 2000, καθώς το 1995 με 1997 ξέσπασε μία έντονη σεισμική δραστηριότητα, που διήρκησε τρία χρόνια και επικεντρώθηκε μεταξύ στη βόρεια ακτή του νησιού και του νησιού Γυαλί. Κάποιες από αυτές τις μελέτες, που είναι πιο σχετικές με την παρούσα μελέτη παρουσιάζονται παρακάτω.

Lagios (2000) αναφέρει ότι το έτος 1997 δημιουργήθηκε ένα δίκτυο παρακολούθησης GPS στο νησί της Νίσυρου, το οποίο παρείχε δεδομένα από δύο διαφορετικές περιόδους για τα έτη 1997 και 1998 και από μία χρονική περίοδο τα έτη 1999 και 2000. Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ότι υπάρχει μία οριζόντια μετατόπιση στο νησί της τάξεων των 3-5mm προς το εξωτερικό του νησιού, δηλαδή ότι το νησί έχει την τάση να «ανοίξει». Παράλληλα, παρατηρήθηκαν και κάθετες μετατοπίσεις της τάξεως των 14mm με 45mm και συμπεραίνει ότι το νησί παρουσιάζει μία γενικότερη άνοδο του εδάφους.

Parcharidis & Lagios (2001) εφάρμοσαν την ανάλυση DInSAR με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων ERS-2, που καλύπτουν την χρονική περίοδο 1996 με 1999 σε συνδυασμό με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM). Δύο περιοχές του νησιού παρουσιάζουν καλή συνοχή, το νοτιοδυτικό και το ανατολικό τμήμα. Σχεδόν αναγνωρίστηκαν και αξιολογήθηκαν αντιστοίχως δύο συμβολομετρικοί κροσσοί. Οι δύο αυτές ζώνες συμπίπτουν με τα κύρια τεκτονικά ρήγματα του νησιού. Όσον αφορά την ποσοτική παραμόρφωση, αυτή εκτιμάται στα είκοσι οχτώ χιλιοστά (28mm) για κάθε κροσσό. Η παραμόρφωση που περιγράφεται από το συμβολογράφημα είναι συμβατή με τις υπάρχουσες διαφορικές παρατηρήσεις GPS.

Lagios et al. (2001) αναφέρουν ότι δεν μπορεί να αποκλειστεί η πιθανότητα ύπαρξης ηφαιστειακής δραστηριότητας στο νησί, όπου θα προηγηθούν μία σειρά σεισμικών εκρήξεων μερικές εβδομάδες πριν την εκδήλωση του φαινομένου. Εκτιμάται ότι, αν δεν προκύψει κάποια έντονη μεταβολή των τεκτονικών πλακών, όπου σε αυτήν την περίπτωση η έκρηξη που μπορεί να προκληθεί θα είναι μεγάλη, υπάρχει το ενδεχόμενο να εμφανιστούν ροές και θόλοι λάβας. Επίσης, αναφέρει ότι έχουν γίνει δύο υδροθερμικές εκρήξεις, οι οποίες σημειώθηκαν στην ανατολική μεριά της καλντέρας, ως αποτέλεσμα της ηφαιστειογενούς δραστηριότητας στο νησί. Η μία

χρονολογείται το διάστημα μεταξύ 1871 με 1873 και η άλλη το έτος 1887. Από τις υδροθερμικές εκρήξεις δημιουργήθηκαν θερμές πηγές κατά μήκος της ακτογραμμής.

Sachpazi et al. (2002) εστίασαν την μελέτη τους στην χρονική περίοδο 1995 με 1998 χρησιμοποιώντας ERS-2 SAR εικόνες σε ανοδική τροχιά (ascending) σε συνδυασμό με ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους και εφαρμόστηκε η μέθοδος της διαφορικής συμβολομετρίας (DInSAR). Παρατηρήθηκε ότι σημειώθηκαν σημαντικές παραμορφώσεις την επιφάνεια του νησιού τη χρονική περίοδο 1995 με 1997. Ο ρυθμός μεταβολής της παραμόρφωσης τη χρονική περίοδο 1995 με 1996 έφτασε τα 87mm/yr, ενώ τη χρονική περίοδο που ακολούθησε 1996 με 1997 η μεταβολή της επιφάνειας ήταν συνεχόμενη, όμως μειώθηκε στα 53mm/yr. Στο σύνολο της περιόδου μελέτης παρατηρήθηκε μια γενικότερη άνοδο της επιφάνειας, όπου η μέγιστη τιμή φτάνει τα 140mm και εμφανίζεται στο βορειοδυτικό τμήμα του νησιού.

Sakkas et al. (2003) συνδύασαν μετρήσεις DGPS και της μεθόδου διαφορικής συμβολομετρίας (DInSAR) στη Νίσυρο. Η μελέτη εστιάζει στη χρονική περίοδο 1996 με 2001, όπου παρατηρήθηκε μία γενικότερη άνοδο της επιφάνειας του εδάφους, η οποία κυμαίνεται από 13mm ως 40mm ως και τον Σεπτέμβριο του 1997, και αυξήθηκε στα 53mm στους επόμενους οχτώ μήνες. Παράλληλα, έγινε εκτίμηση και για την οριζόντια μετατόπιση του νησιού, όπου παρατηρήθηκε ότι όλο το νησί επεκτείνεται προς τα ανατολικά, δυτικά και νότια.

Parcharidis et al. (2004) εστιάζουν στην χρονική περίοδο 1995 με 1996, πριν την εμφάνιση της σεισμικής αναταραχής. Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της διαφορικής συμβολομετρίας (DInSAR) για τις χρονικές περιόδους 22-5-95 έως 22-1-96 και 4-9-95 έως 20-8-96, όπου χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες SAR και ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM). Τα αποτελέσματα της μεθόδου έδειξαν ότι και στις δυο περιπτώσεις η συνάφεια και ήταν αρκετά καλή για το μεγαλύτερο μέρος του νησιού, με εξαίρεση το βορειοδυτικό τμήμα του νησιού. Στο παραγόμενο συμβολογράφημα από το πρώτο ζεύγος που καλύπτει τη χρονική περίοδο 22-5-95 έως 22-1-96, απεικονίζεται ένας συμβολομετρικός κροσσός που καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του νησιού, ισοδυναμεί με είκοσι οκτώ (28mm) εδαφικής παραμόρφωσης κατά μήκος της οπτικής γραμμής του αισθητήρα αναγνωρίστηκε και αξιολογήθηκε. Επίσης, εντοπίστηκε και ένας δεύτερος κροσσός στο νοτιοδυτικό άκρο του νησιού. Στο παραγόμενο συμβολογράφημα από το δεύτερο ζεύγος που καλύπτει τη χρονική περίοδο 4-9-95 έως 20-8-96, που συμπίπτει με την έναρξη της περιόδου σεισμικής αναταραχής, προκύπτουν επίσης δύο συμβολομετρικοί κροσσοί, ο ένας κατανέμεται χωρικά σε ολόκληρο το νησί και παρουσιάζει σχεδόν σχήμα πετάλου που ανοίγεται στο ΒΔ τμήμα του νησιού και ο άλλος εμφανίζεται πλήρως μόνο στο νοτιοδυτικό τμήμα

του νησιού και εν μέρει κατά μήκος της νότιας παράκτιας ζώνης και παρουσιάζει παραμόρφωση της τάξης πέντε κόμματα έξι εκατοστά (5,6cm). Τέλος, στο νησί παρατηρήθηκε μία άνοδο του εδάφους από 30mm έως 150mm με εξαίρεση το βορειοδυτικό τμήμα του νησιού.

Lagios et al. (2005) μελέτησαν την παραμόρφωση του εδάφους στο ηφαιστειακό πεδίο Κως – Γυαλί – Νίσυρος (NA EHT) τη χρονική περίοδο 1997 με 2002, χρησιμοποιώντας μετρήσεις GPS και ERS-2 SAR εικόνες, όπου εφαρμόστηκε η μέθοδος της διαφορικής συμβολομετρίας (DInSAR). Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας έδειξαν ότι τη χρονική περίοδο 1997 με 1998 υπήρχε άνοδος του εδάφους σε όλο το νησί, της τάξης 40mm με 60mm, με εξαίρεση στο Μανδράκι, όπου σημειώθηκε κάθοδος του εδάφους της τάξης 60mm με 140mm. Στο επόμενο διάστημα 1998 με 1999 σημειώθηκε μία μικρή άνοδος των 8mm. Αντιθέτως, την επόμενη χρονική περίοδο σημειώθηκε καθίζηση του εδάφους της τάξης των 15 mm και το αμέσως επόμενο διάστημα 2000-2001 υπήρξε άνοδος του εδάφους της τάξης των 10mm. Όσον αφορά τις οριζόντιες μετατοπίσεις, παρατηρήθηκαν μετατοπίσεις της τάξης των 20mm με 60mm.

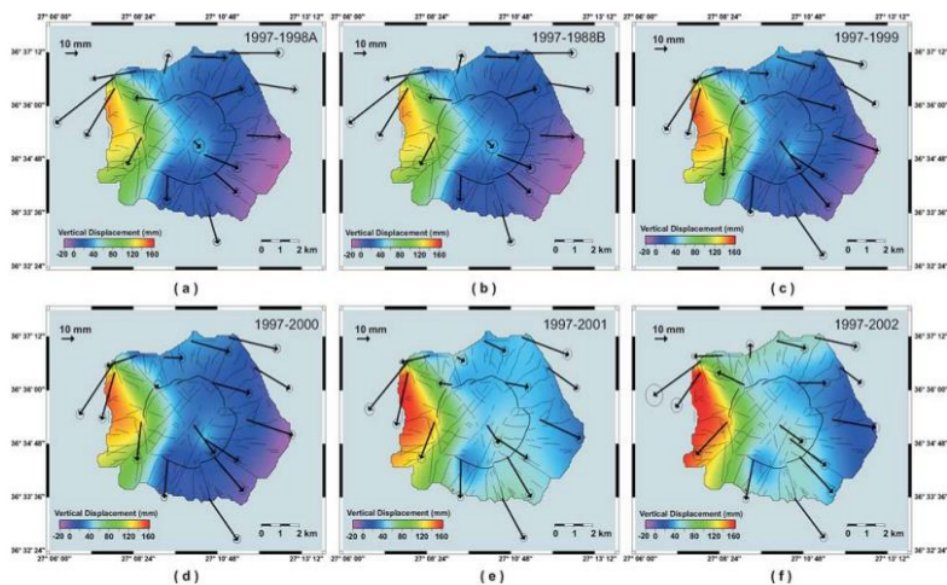
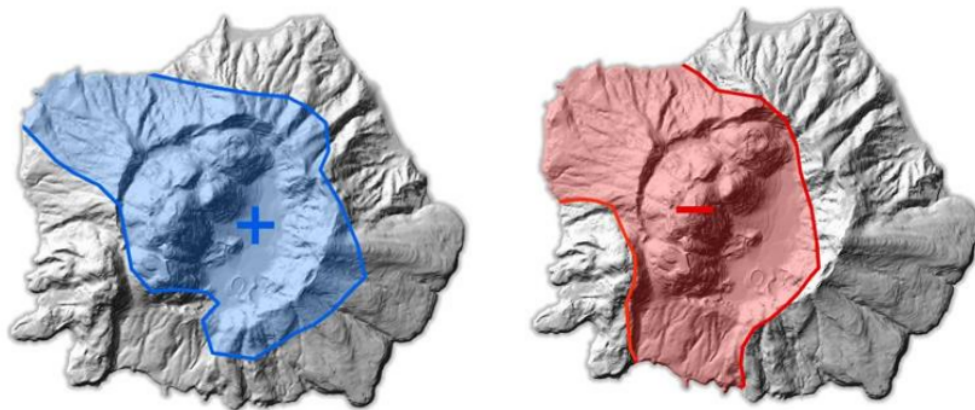


Fig. 4 DGPS horizontal and vertical displacements for the periods: (a) June 1997 – May 1998, (b) June 1997 – Oct. 1998, (c) June 1997 – Sept. 1999, (d) June 1997 – Sept. 2000, (e) June 1997 – June 2001 and (f) June 1997 – July 2002. The horizontal deformation is represented by arrows and the vertical displacement by colour contouring

Εικόνα 8: Οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις της νήσου Νίσυρος (Λάγιος, 2005)

Derdelakos et al. (2013) εφάρμοσε την μέθοδο DInSAR για τη μελέτη μίας περιόδου δεκαοκτώ (18) χρόνων, δηλαδή από το έτος 1992 μέχρι το έτος 2010, όπου χρησιμοποιήθηκαν εικόνες από ανοδική και καθοδική τροχιά των δορυφόρων ERS-1, ERS-2 και ENVISAT. Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό GAMMA, όπου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Singular Value Decomposition (SVD). Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ότι την

περίοδο της έντονης σεισμικής δραστηριότητας, που διήρκησε το 1995 μέχρι το 1997, υπήρχε άνοδος του εδάφους, όμως την περίοδο της αδράνειας, η οποία διήρκεσε από το 2004 μέχρι το 2010 παρατηρήθηκε κάθοδος του εδάφους κατά πέντε εκατοστά (5cm). Για τον ακριβέστερο υπολογισμό της παραμόρφωσης του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν συμπληρωματικά μετρήσεις από δορυφορικούς δέκτες GPS και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους SRTM με χωρική ανάλυση ενενήντα μέτρα (90m).



Εικόνα 9: Αριστερά απεικονίζεται η περιοχή που σημειώθηκε άνοδος του εδάφους το διάστημα 1995 με 1997 και δεξιά η περιοχή που σημειώθηκε κάθοδος του εδάφους το διάστημα 2004 με 2010 (Derdelakos et al. 2013)

4. Βασικές αρχές

4.1. Συστήματα απεικόνισης γήινης επιφάνειας

Η τηλεπισκόπηση είναι η τεχνική συλλογής και ανάλυσης πληροφοριών που αφορούν την γήινη επιφάνεια και συλλέγονται από ειδικά όργανα που δεν έχουν φυσική επιφάνεια με τα αντικείμενα. Η συλλογή πληροφοριών γίνεται από αισθητήρες που καταγράφουν την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που ανακλάται, μεταδίδεται ή εκπέμπεται από την γήινη επιφάνεια. Αυτοί οι αισθητήρες τοποθετούνται σε αεροσκάφη, δορυφόρους, ρουκέτες κλπ.

Υπάρχουν δύο βασικά συστήματα παρακολούθησης και απεικόνισης της Γης:

- i. Τα παθητικά συστήματα είναι εκείνα που καταγράφουν την «φυσική» ακτινοβολία. Η ανακλώμενη ενέργεια, που καταγράφουν τα παθητικά συστήματα, συμβαίνει κατά τη διάρκεια της ημέρας, όταν ο ήλιος φωτίζει τμήματα της Γης. Γι' αυτό δεν υπάρχει ανακλώμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια της νύχτας, δηλαδή στις περιοχές που δεν φωτίζονται από την ηλιακή ακτινοβολία. Τα παθητικά συστήματα έχουν επίσης τη δυνατότητα καταγραφής της εκπεμπόμενης ενέργειας (θερμικό υπέρυθρο) κατά τη διάρκεια της μέρας και της νύχτας, στην περίπτωση που το ποσό της ενέργειας είναι τέτοιο ώστε να είναι δυνατή η καταγραφή. Τα παθητικά συστήματα χρησιμοποιούν το τμήμα του φάσματος από πολύ μικρά μήκη κύματος (μικρότερα του 0,4 μm) έως την περιοχή του μήκους κύματος 1.000 μm .
- ii. Τα ενεργητικά συστήματα είναι εκείνα που καταγράφουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία εκπέμπονται από μία άλλη εξωτερική πηγή ή από το ίδιο το όργανο καταγραφής. Συνήθως το σύστημα καταγραφής είναι αυτό που εκπέμπει και την ενέργεια προς την επιφάνεια και στη συνέχεια ανακλάται, επιστρέφει και καταγράφεται η «ηχώ» του σήματος από το ίδιο το σύστημα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου τύπου οργάνου είναι τα Radars που εκπέμπουν στην περιοχή των μικροκυμάτων. Η ανάγκη των ενεργών συστημάτων σε ενέργεια είναι μεγάλη και για τον λόγο αυτό η λειτουργία τους δεν είναι συνεχής.

Τα συστήματα απεικόνισης (αισθητήρες) της γήινης επιφάνειας υποδιαιρούνται σε τρεις τύπους: α) τις κάμερες, β) τους σαρωτές και γ) τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) (Παρχαρίδης, 2011).

4.2. Πρόγραμμα Copernicus⁷

Το πρόγραμμα Copernicus είναι ένα σύστημα παρατήρησης της Γης του διαστημικού προγράμματος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το οποίο εξετάζει τον ολόκληρο τον πλανήτη και το περιβάλλον. Στόχο του έχει το όφελος όλων των Ευρωπαίων πολιτών και προσφέρει υπηρεσίες πληροφόρησης που αντλούνται από δορυφορικά δεδομένα παρατήρησης της Γης και τα επιτόπια (μη διαστημικά) δεδομένα.

Το πρόγραμμα πήρε το όνομά του από τον Ευρωπαίο επιστήμονα Νικόλαο Κοπέρνικο ως φόρος τιμής για τη συμβολή του στη κατανόηση του σύμπαντος και την θέσπιση της βάσης για τη σύγχρονη αστρονομία με το έργο του «Εξι βιβλία για τις Περιστροφές των Ουράνιων σφαιρών», το οποίο εκδόθηκε πρώτη φορά το 1543. Ο Κοπέρνικος υποστήριξε τη θεωρία ενός ηλιοκεντρικού σύμπαντος, δηλαδή ότι ο ήλιος βρίσκεται στο κέντρο του σύμπαντος ακίνητος και ότι οι πλανήτες περιστρέφονται γύρω από αυτόν. Παράλληλα, εξήγησε ότι η κίνηση του ήλιου στη Γη από την ανατολή προς τη δύση οφείλεται στην περιστροφή της Γης γύρω από τον εαυτό της.

⁶ Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή διαχειρίζεται το πρόγραμμα. Υλοποιείται σε συνεργασία με τα κράτη μέλη, τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA), τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό για την Εκμετάλλευση των Μετεωρολογικών Δορυφόρων (EUMETSAT), το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προβλέψεων Καιρού (ECMWF), τους οργανισμούς της ΕΕ και το Mercator Ocean.

Το πρόγραμμα Copernicus στηρίζεται κυρίως από την οικογένεια δορυφόρων Sentinel και από υπάρχοντες αποστολές που εξυπηρετούν εμπορικούς και δημόσιους σκοπούς. Μετά την εκτόξευση του δορυφόρου Sentinel-1A, ξεκίνησε η διαδικασία τοποθέτησης σε τροχιά άλλων είκοσι (20) δορυφόρων πριν από το 2030. Παράλληλα, συλλέγει πληροφορίες από επίγειους σταθμούς. Η επεξεργασία, η ανάλυση και η σύγκριση των δεδομένων προηγούμενων ετών δίνει τη δυνατότητα ανίχνευσης αλλαγών. Βάσει αυτών δημιουργούνται κατάλληλα πρότυπα για την βέλτιστη πρόβλεψη μελλοντικών αλλαγών στο περιβάλλον.

² Τεράστιες ποσότητες δεδομένων παγκόσμιας κλίμακας από δορυφόρους και επίγεια, εναέρια και θαλάσσια συστήματα μετρήσεων παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την ατμόσφαιρα, τη ξηρά, τη θάλασσά, της κλιματικής αλλαγής, την ασφάλεια και τα επείγοντα περιστατικά. Τα δεδομένα που συλλέγονται συμβάλουν στην διαχείριση των αστικών περιοχών, στη βιώσιμη ανάπτυξη, στην προστασία της φύσης, στον χωροταξικό και πολεοδομικό σχεδιασμό, στην αλιεία,

στη γεωργία, στην δασοκομία, στην υγεία, στην πολιτική προστασία, στην ασφάλεια και στην άμυνα, στις υποδομές, στις μεταφορές και στον τουρισμό.



Εικόνα 10: Πρόγραμμα Copernicus (<https://www.copernicus.eu>)

Το πρόγραμμα παρέχει έξι υπηρεσίες:

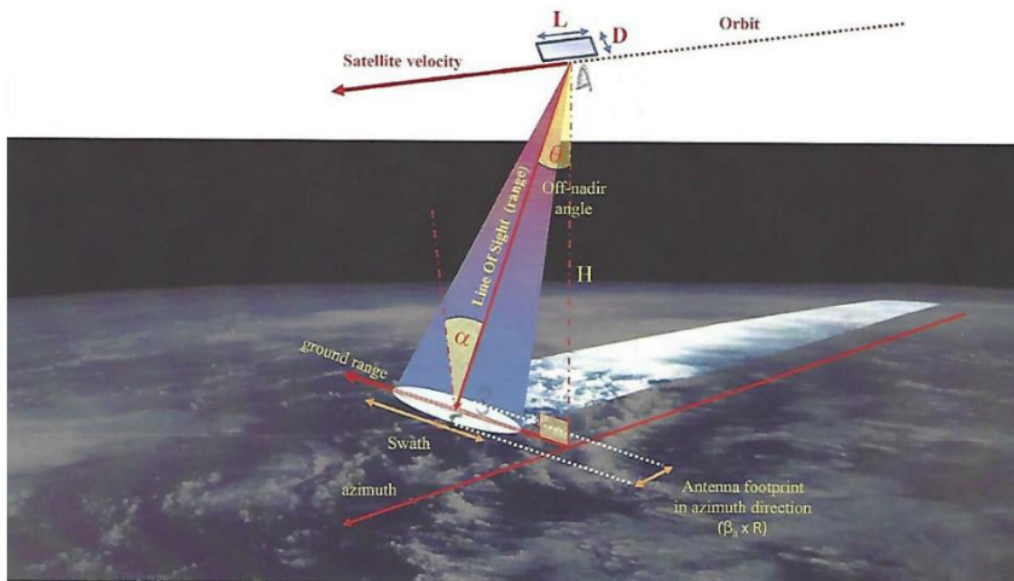
- i. Την Υπηρεσία Παρακολούθησης της Ατμόσφαιρας Copernicus (Copernicus Atmosphere Monitoring Service - CAMS). Η υπηρεσία παρέχει συνεχή δεδομένα και πληροφορίες για τη σύνθεση της ατμόσφαιρας και επικεντρώνεται στην ποιότητα του αέρα, στο στρώμα όζοντος και στην υπεριώδη ακτινοβολία, στις εκπομπές και στις επιφανειακές ροές, στην ηλιακή ακτινοβολία και στην κλιματική πίεση.
- ii. Την Θαλάσσια Υπηρεσία Copernicus (Copernicus Marine Environment Monitoring Service), όπου χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή επιτροπή και υλοποιείται από την Mercator Ocean International και έχει ως στόχο την προστασία των θαλασσών, τη θαλάσσια ασφάλεια, τη βιώσιμη χρήση των θαλάσσιων πόρων και την ανάπτυξη ανανεώσιμων θαλάσσιων ενεργειακών πόρων.
- iii. Η Υπηρεσία Παρακολούθησης της Γης Copernicus (Copernicus Land Monitoring Service-CLMS) παρέχει πληροφορίες σχετικά με την κάλυψη γης και τις μεταβολές της, τη χρήση γης, την κατάσταση της βλάστησης, τον κύκλο του νερού και τις μεταβλητές ενέργειας της γήινης επιφάνειας σε ένα ευρύ φάσμα χρηστών στην Ευρώπη και σε ολόκληρο τον κόσμο στον τομέα των περιβαλλοντικών χερσαίων εφαρμογών. Η υπηρεσία διατίθεται από το

- 2012 και υλοποιείται από κοινού ²⁸ από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος και το Κοινό Κέντρο Ερευνών της DG της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.
- iv. ² Η Υπηρεσία Κλιματικής Αλλαγής του Copernicus (Copernicus Climate Change Service- ¹³ C3S) παρέχει έγκυρες πληροφορίες σχετικά με το παρελθόν, το παρόν και το μέλλον του ² κλίματος στην Ευρώπη και τον υπόλοιπο κόσμο.
- v. Η Υπηρεσία Copernicus για τις Εφαρμογές Ασφάλειας που έχει σαν στόχο την προστασία την Ευρώπης και συμβάλει στην επιτήρηση των συνόρων, στη θαλάσσια επιτήρηση, στην υποστήριξη των εξωτερικών δράσεων και των ενεργειών ασφάλειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης.
- vi. ²³ Η Υπηρεσία Διαχείρισης Εκτάκτων Αναγκών του Copernicus (Copernicus Emergency ² Management Service - EMS) που παρέχει ακριβείς γεωχωρικές πληροφορίες σε φορείς που εμπλέκονται στη διαχείριση φυσικών καταστροφών, ανθρωπογενών καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και ανθρωπιστικών κρίσεων. Η Υπηρεσία έχει δύο συνιστώσες, την χαρτογράφηση και την έγκαιρη προειδοποίηση. Η υπηρεσία διατίθεται από το 2012 και υλοποιείται από το Κοινό Κέντρο Ερευνών της DG της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.

⁶ Τα δεδομένα που συλλέγονται διατίθενται σε παρόχους υπηρεσιών, στις δημόσιες αρχές και σε άλλους διεθνείς οργανισμούς και χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και την παρακολούθηση αλλαγών, που εξετάζονται και την δημιουργία καλύτερων προβλέψεων. Συγχρόνως, αποτελούν τη βάση της ανάπτυξης της περιβαλλοντικής νομοθεσίας και γενικότερα των πολιτικών αποφάσεων, όπως, για παράδειγμα, τις αποφάσεις διαχείρισης μίας φυσικής καταστροφής. ⁶ Οι παρεχόμενες υπηρεσίες πληροφοριών είναι δωρεάν και ανοικτά προσβάσιμες στους χρήστες (Copernicus).

4.3. Δορυφόροι SAR

Η τηλεπισκόπηση με τη χρήση ραντάρ προσφέρει το μοναδικό πλεονέκτημα ότι παρέχει δεδομένα (εικόνες) ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών, καθώς οι αισθητήρες SAR (Synthetic Aperture Radar) εκπέμπουν και λαμβάνουν κύματα στη μικροκυματική ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (με μήκος κύματος 1m -1mm και συχνότητα 300MHz - 300GHz). Στην εικόνα 10, που ακολουθεί παρακάτω, απεικονίζεται αναλυτικά το σύστημα απεικόνισης SAR.



Εικόνα 11: SAR Principles (Ferretti, 2014)

Οι αισθητήρες SAR εκπέμπουν και λαμβάνουν ¹ ακτινοβολία από γωνία και δεξιά κατά μήκος της κατεύθυνσης του δορυφόρου. Σύμφωνα με αυτόν τον τρόπο λήψης προκύπτουν δύο διαφορετικές γεωμετρικές προβολές (LOS), την αύξουσα και τη φθίνουσα. Η αύξουσα (ascending) λαμβάνεται κατά τη διέλευση του δορυφόρου από το νότο στο βορρά και η φθίνουσα (descending) λαμβάνεται κατά τη διέλευση του δορυφόρου από το βορρά προς το νότο.

⁴ Η κλίση της κεραίας ως προς το ναδίρ (nadir) ονομάζεται γωνία πρόσπτωσης (off-nadir angle ή γωνία θ) και στα περισσότερα συστήματα SAR κυμαίνεται μεταξύ 20° με 50° . Η δυνατότητα μεταβολής της γωνίας πρόσπτωσης δίνει το πλεονέκτημα προσαρμογής στις λοφώδεις και στις ορεινές περιοχές, όπου η κλίση του εδάφους είναι απότομη. ¹ Λόγω της καμπυλότητας της επιφάνειας της Γης, η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας (α), σε ένα οριζόντιο επίπεδο στο έδαφος, είναι μεγαλύτερη στην πραγματικότητα από τη γωνία off-nadir. Η γωνία πρόσπτωσης δεν

μπορεί να είναι ποτέ μηδενική, καθώς το ραντάρ λαμβάνει ηχώ από τα απεικονιζόμενα αντικείμενα σχεδόν ταυτόχρονα, καθιστώντας αδύνατη τη δημιουργία εικόνας (Ferretti 2014). Η διεύθυνση της απόστασης (ground range) είναι κάθετη στην τροχιά του της πλατφόρμας (γωνία A) και η διεύθυνση του αζιμουθίου (azimuth) είναι κάθετη σε αυτή.

Μια εικόνα SAR αποτελείται από την ισχύ του σήματος που οπισθοσκεδάζεται (backscatter) προς την κεραία του δορυφόρου από ένα αντικείμενο (σκεδαστής) της γήινης επιφάνειας.

Η τιμή της ισχύς του σήματος που οπισθοσκεδάζεται εξαρτάται από α) τον προσανατολισμό, β) την τραχύτητα, γ) το μέγεθος και δ) τις διηλεκτρικές ιδιότητες των αντικειμένων (σκεδαστών) της γήινης επιφάνειας. Για παράδειγμα, οι αστικές και οι βραχώδεις περιοχές παρουσιάζουν ισχυρά πλάτη, σε αντίθεση με τις λείες επιφάνειες, χαρακτηριστικό παράδειγμα τα ήρεμα νερά, οι οποίες παρουσιάζουν χαμηλές τιμές πλάτους, καθώς η ακτινοβολία αντανακλάται μακριά από το ραντάρ.

Τα όργανα SAR είναι συνεκτικά συστήματα, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να καταγράψουν όχι μόνο το πλάτος αλλά και τη φάση ενός καταγεγραμμένου σήματος. Η φάση είναι μια μέτρηση του χρόνου που μια ηχώ που εκπέμπεται από μια κεραία ραντάρ χρειάζεται για να φθάσει στα αντικείμενα του εδάφους και στη συνέχεια να επιστρέψει στο ραντάρ. Η φάση είναι το κλειδί όλων των τεχνικών SAR με συμβολομετρική μέθοδο (Ferretti 2014).

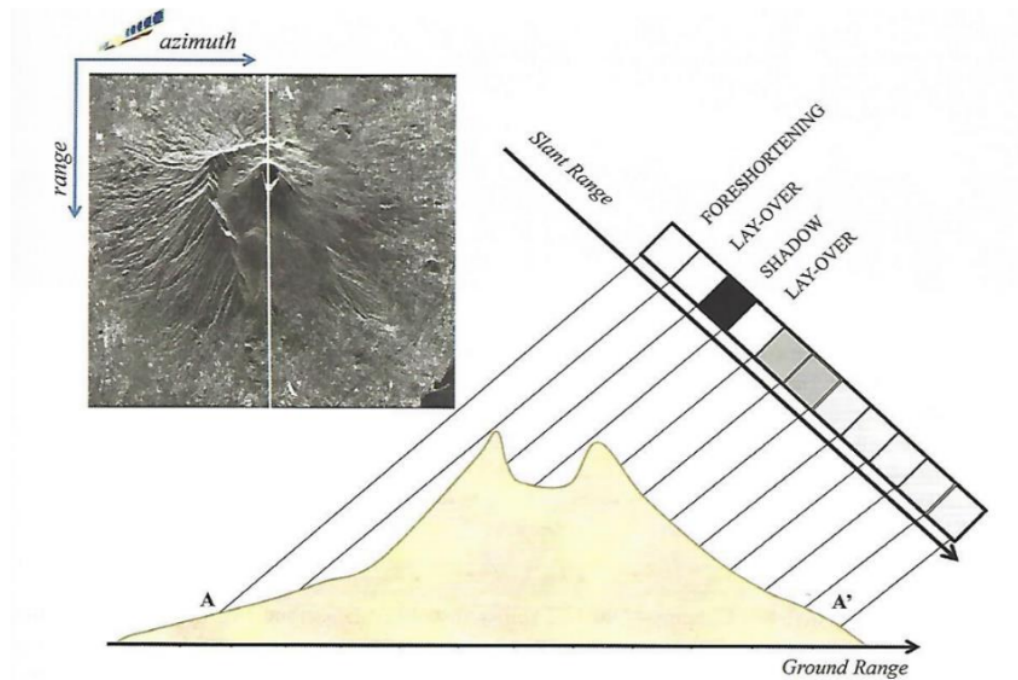
Τα όργανα ραντάρ σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να εκπέμπουν και να λαμβάνουν και να καταγράφουν το εύρος αλλά και τη φάση ενός καταγεγραμμένου σήματος. Με την αλλαγή της πόλωσης ενός μεταδιδόμενου σήματος, μπορούν να ληφθούν πληροφορίες σχετικά με τις πολωσιμετρικές¹¹ ιδιότητες των παρατηρούμενων επιφανειών. Συνήθως, τα συστήματα SAR είναι μονοπολικά, δηλαδή μεταδίδουν είτε οριζόντια, είτε κατακόρυφα πολωμένα κύματα και λαμβάνουν τα ίδια (HH, VV). Όμως, υπάρχουν και συστήματα SAR, τα οποία μπορούν να είναι πλήρως πολωσιμετρικά και να λειτουργούν σε όλους τους τρόπους πόλωσης: HH, VV, HV, VH.

Κατά τη διέλευση του δορυφόρου, μπορεί να προκύψουν γεωμετρικές στρεβλώσεις στις δορυφορικές εικόνες SAR, όπως αυτές απεικονίζονται στην Εικόνα 11, οι οποίες προκύπτουν λόγω της διαμόρφωσης της γωνίας θέασης της επιφάνειας της γης και οδηγούν σε παρερμηνείες

²² n¹¹ Πολωσιμετρία: είναι η μέθοδος με την οποία μετράται η γωνία στροφής του επιπέδου φωτός που προκαλεί μια οπτικά ενεργή ουσία (πηγή: Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Επιστήμης Διαιτολογίας-Διατροφής).

για την επιφάνεια του εδάφους. Παρακάτω, αναλύονται τα είδη των γεωμετρικών στρεβλώσεων και πως επηρεάζονται τα αντικείμενα που απεικονίζονται:

- i. Foreshortening: προκαλεί τη συμπίεση της εικόνας και έχει ως αποτέλεσμα την εσφαλμένη αναπαράσταση μήκους επιφάνειας.
- ii. Layover: 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.



Εικόνα 12: Σφάλματα εικόνων SAR (Ferretti, 2014)

4.4. Δορυφορική αποστολή Sentinel-1

Οι δορυφόροι Sentinel έχουν σχεδιαστεί για τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) και παρέχουν έναν τεράστιο όγκο δεδομένων και εικόνων για το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Copernicus.

Η αποστολή Sentinel 1 παρέχει υψηλή αξιοπιστία, βελτιωμένο χρόνο επανάληψης, γεωγραφική κάλυψη και ταχεία διάδοση δεδομένων για την υποστήριξη επιχειρησιακών εφαρμογών στους τομείς προτεραιότητας της παρακολούθησης της θάλασσας, της ξηράς και των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης και αποτελεί κληρονομιά των ERS-1, ERS-2, Envisat και Radarsat. Η αποστολή Sentinel 1 αποτελείται από ένα δίδυμο δορυφόρων, τους Sentinel-1A και Sentinel-1B, οι οποίοι έχουν τεθεί σε πολική τροχιά, με διαφορά τροχιακής φάσης 180° με εύρος σάρωσης τα 250km. Κάθε δορυφόρος παρέχει δεδομένα για κάθε περιοχή κάθε 6 μέρες (χρόνος επαναφοράς).



Εικόνα 13: Δορυφόρος Sentinel-1 (ESA, 2012)

Στις 3 Απριλίου του 2014 εκτοξεύθηκε ο δορυφόρος Sentinel-1A και στις 25 Απριλίου του 2016 εκτοξεύθηκε ο δορυφόρος Sentinel-1B. Η αποστολή για τον δορυφόρο Sentinel-1B σταμάτησε το 2022 λόγω ενός ηλεκτρολογικού προβλήματος και εντός του 2024 θα τεθεί σε τροχιά ο δορυφόρος Sentinel-1C.

Τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) δίνουν δεδομένα όλο το εικοσιτετράωρο, ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών.

Η αποστολή Sentinel-1 διασφαλίζει τη συνέχεια των δεδομένων SAR της C-Band ($f = 5,405\text{GHz}$, $\lambda = 5,547\text{cm}$) στις εφαρμογές, καθώς τα όργανα καταγραφής διατηρούν τα βασικά χαρακτηριστικά των προηγούμενων δορυφόρων, όπως η σταθερότητα και τα ακριβή και καλά βαθμονομημένα προϊόντα δεδομένων. ¹⁰ Το όργανο C-SAR υποστηρίζει τη λειτουργία σε διπλή πόλωση (HH+HV, VV+VH) που υλοποιείται μέσω μιας επαναλαμβανόμενης εκπομπής (με δυνατότητα εναλλαγής σε H ή V) και δύο παράλληλες επαναλαμβανόμενες λήψεις για πόλωση H και V.

Το όργανο ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) των δορυφόρων Sentinel 1 μπορεί να αποκτήσει δεδομένα σε τέσσερις αποκλειστικές λειτουργίες:

- i. **Stripmap (SM):** Μια τυπική λειτουργία απεικόνισης stripmap SAR, όπου η επίγεια έκταση φωτίζεται με μια συνεχή ακολουθία παλμών, ενώ η δέσμη της κεραίας είναι στραμμένη σε μια σταθερή γωνία αζιμούθιου και ανύψωσης.
- ii. **Interferometric Wide swath (IW):** Τα δεδομένα αποκτώνται σε τρεις ζώνες με την τεχνική απεικόνισης Terrain Observation with Progressive Scanning SAR (TOPSAR). Στη λειτουργία IW, τα bursts συγχρονίζονται από πέρασμα σε πέρασμα για να εξασφαλιστεί η ευθυγράμμιση των συμβολομετρικών ζευγών. Η IW είναι η κύρια επιχειρησιακή λειτουργία του Sentinel 1 στην ξηρά.
- iii. **Extra Wide swath (EWS):** Τα δεδομένα αποκτώνται σε πέντε σαρώσεις με την τεχνική απεικόνισης TOPSAR. Ο τρόπος λειτουργίας EW παρέχει πολύ μεγάλη κάλυψη σάρωσης σε βάρος της χωρικής ανάλυσης.
- iv. **Wave (WV):** Τα δεδομένα αποκτώνται σε μικρές stripmap σκηνές που ονομάζονται "vignettes" και βρίσκονται σε τακτά διαστήματα των 100km κατά μήκος της τροχιάς. Οι vignettes αποκτώνται εναλλάξ, αποκτώντας μια vignette σε γωνία πρόσπτωσης κοντινής εμβέλειας, ενώ η επόμενη vignette αποκτάται σε γωνία πρόσπτωσης μακρινής εμβέλειας. Το WV είναι η επιχειρησιακή λειτουργία του Sentinel 1 στην ανοικτή θάλασσα.

Η αποστολή Sentinel 1 παρέχει τα παρακάτω προϊόντα δεδομένων:

Level-0

Ακατέργαστα δεδομένα επιπέδου-0 (για ειδική χρήση): Παρέχουν συμπιεσμένα, μη επεξεργασμένα, συμπτυκνωμένα πακέτα, τα οποία έχουν πρόσθετες παρατηρήσεις και διαθέτουν

βοηθητικές πληροφορίες, που υποστηρίζουν την επεξεργασία. Περιλαμβάνει αρχείο manifest.safe, στοιχεία δεδομένων μέτρησης και ευρετηρίου.

Level-1

Τα προϊόντα των επεξεργασμένων δεδομένων του επιπέδου-1 είναι τα Single Look Complex (SLC) και τα Ground Range Detected (GRD).

Single Look Complex (SLC)

Είναι εικόνες στην περιοχή κλίσης ανά αζιμούθιο επίπεδο απεικόνισης, στο επίπεδο εικόνας της απόκτησης δορυφορικών δεδομένων. Κάθε εικονοστοιχείο εικόνας αντιπροσωπεύεται από μια μιγαδική τιμή μεγέθους (I και Q) και επομένως περιέχει πληροφορίες τόσο για το πλάτος όσο και για τη φάση. Κάθε τιμή I και Q είναι 16 bit ανά εικονοστοιχείο. Η επεξεργασία για όλα τα προϊόντα SLC έχει ως αποτέλεσμα μια ενιαία εμφάνιση σε κάθε διάσταση χρησιμοποιώντας το πλήρες διαθέσιμο εύρος ζώνης του σήματος. Οι εικόνες γεωαναφέρονται χρησιμοποιώντας δεδομένα τροχιάς και στάσης του δορυφόρου. Οι εικόνες SLC παράγονται σε γεωμετρία μηδενικού Doppler. Αυτή η σύμβαση είναι κοινή με τα τυποποιημένα προϊόντα κεκλιμένου εύρους που διατίθενται από άλλους αισθητήρες SAR. Περιλαμβάνουν σύνθετες εικόνες με πλάτος και φάση (συστηματική διανομή που περιορίζεται σε συγκεκριμένες σχετικές περιοχές).

Ground Range Detected (GRD)

Δεδομένα επιπέδου-1 που ανιχνεύονται από την απόσταση εδάφους (GRD) με ένταση μόνο με πολλαπλές ματιές (συστηματική διανομή). Αποτελούνται από εστιασμένα δεδομένα SAR τα οποία έχουν ανιχνευθεί, εξεταστεί πολλαπλώς και προβληθεί σε απόσταση εδάφους χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο ελλειψοειδούς της Γης. Η ελλειψοειδής προβολή των προϊόντων GRD διορθώνεται χρησιμοποιώντας το ύψος εδάφους που καθορίζεται στη γενική σημείωση του προϊόντος. Το ύψος εδάφους που χρησιμοποιείται ποικίλλει στο αζιμούθιο αλλά είναι σταθερό στο εύρος. Δεν περιέχουν τιμές φάσεις.

Level-2

Τα προϊόντα επιπέδου 2 αποτελούνται από γεωφυσικά προϊόντα με γεωγραφικό εντοπισμό που αντιγράφονται από το επίπεδο 1. Τα προϊόντα Ωκεανού (OCN) επιπέδου-2, που εφαρμόζονται για τον άνεμο, τα κύματα και τα ρεύματα, μπορούν να έχουν γεωφυσικές συνιστώσες που λαμβάνονται από τα δεδομένα SAR. Η διαθεσιμότητα του καθενός εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο λήψης.

Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές παρακολούθησης των πάγων, των πετρελαιοκηλίδων, των θαλάσσιων συνθηκών, της αλλαγής χρήσης της γήινης επιφάνειας, των καλλιεργειών, την αποψίλωση των δασών, την παραμόρφωση της γήινης επιφάνειας και χρησιμοποιούνται στη χρήση εκτίμησης και η διαχείριση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης όπως πλημμύρες, σεισμοί κοκ. (ESA).

4.5. InSAR

Η τεχνική InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) είναι ένα εργαλείο, παγκοσμίως διαδεδομένο, με το οποίο μετρούνται οι επιφανειακές παραμορφώσεις του εδάφους, ώστε να κατανοήσουμε τη δυναμική της Γης, η οποία σχετίζεται με τη σεισμική δραστηριότητα και την ηφαιστιογενή δραστηριότητα. Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιείται για τη μελέτη τη σταθερότητας κλίσης και κατολισθήσεων, μπορεί να υπολογίσει εξαιρετικά μικρές μετατοπίσεις, οι οποίες δεν μπορούν να είναι ανιχνεύσιμες με κάποια άλλη μέθοδο.

Πιο αναλυτικά, μία εικόνα SAR είναι ένας πίνακας με σύνθετους αριθμούς και οι τιμές φάσεις σχετίζονται με την απόσταση του αισθητήρα από το στόχο (Ferretti, 2014). Συγκεκριμένα, είναι μία τεχνολογία που μετρά τη διαφορά φάσης μεταξύ δύο εικόνων SAR, που αφορούν το ίδιο σημείο στο έδαφος, οι οποίες ελήφθησαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.

Γενικά υπάρχουν δύο μέθοδοι για την απόκτηση ενός συμβολομετρικού ζεύγους: α) την μονή διέλευση συμβολομετρίας και β) την επαναλαμβανόμενη διέλευση της συμβολομετρίας.

Στην πρώτη μέθοδο, το σύστημα SAR χρησιμοποιεί δύο κεραίες εκπομπής-λήψης σήματος με μία διέλευση σε μία περιοχή. Στην δεύτερη μέθοδο, ο αισθητήρας SAR περνάει επανειλημμένα στην ίδια περιοχή για να αποκτήσει ένα συμβολομετρικό ζεύγος.

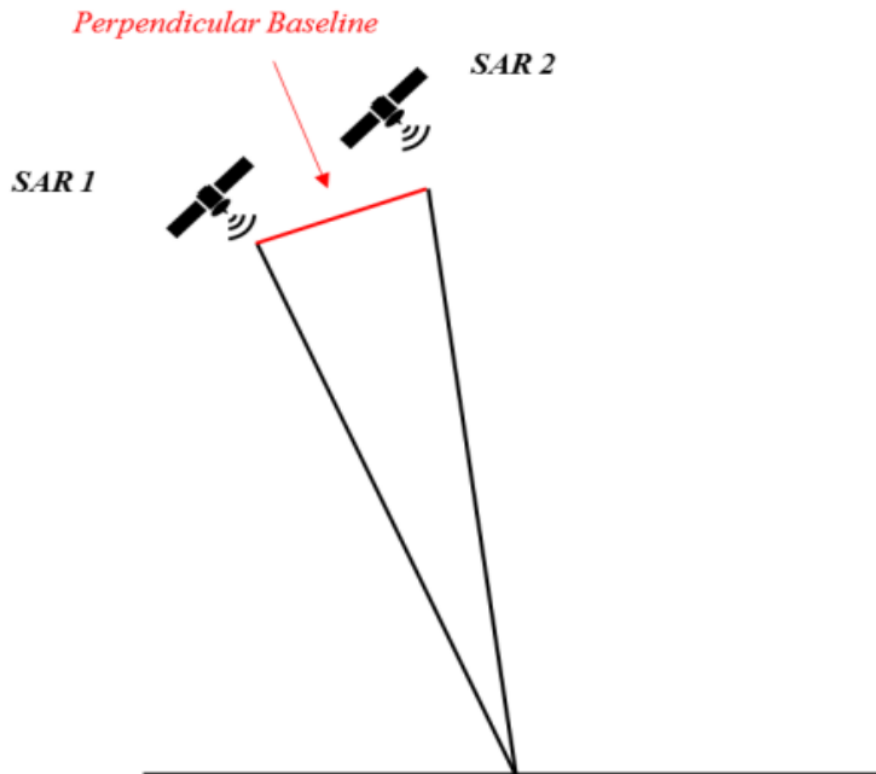
Όταν συλλεχθεί ένα συμβολομετρικό ζεύγος, το συμβολογράφημα δημιουργείται από πολλαπλό πολλαπλασιασμό, pixel με pixel, της πρώτης εικόνας SAR με το σύνθετο συζυγές του δεύτερου (Balmer & Hartl 1998, Rosen 2000).

Η παράμετρος της συνάφειας (γ) εκφράζει τη μέτρηση φάσης θορύβου και της ακρίβειας φάσης (Εξίσωση 1). Οι τιμές της συνάφειας κυμαίνονται από 0 έως 1. Οι τιμές που είναι κοντά στο 0 παρουσιάζουν μία μη συσχετιζόμενη εικόνα, σε αντίθεση, οι τιμές κοντά στο 1 ανταποκρίνονται σε ένα σταθερό σήμα που σκεδάζεται από την περιοχή. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της συνάφειας, τόσο χαμηλότερος είναι ο θόρυβος και ως εκ τούτου προκύπτουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Η συνάφεια υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\gamma = \frac{(S_1 S_2)}{\sqrt{(S_1 S_1)(S_2 S_2)}}, \text{ όπου } 0 \leq |\gamma| \leq 1 \quad (1)$$

Οι παράμετροι S_1 και S_2 της παραπάνω εξίσωσης αφορούν τις εικόνες του συμβολομετρικού ζεύγους.

¹ Η ποιότητα της συμβολομετρικής συνάφειας συνδέεται άμεσα με τον θόρυβο της συμβολομετρικής φάσης. Οι περιοχές με θόρυβο συνδέονται με χαμηλή συμβολομετρική συνάφεια και το αντίστροφο. Ο υπολογισμός της συμβολομετρικής συνάφειας περιέχει μία σειρά από παραμέτρους, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται οι πηγές θορύβου της συμβολομετρικής φάσης.



Εικόνα 14: Γεωμετρία του δορυφορικού συμβολομετρικού συστήματος SAR (Bountzouklis, 2016)

¹ Οι παράγοντες που πλαισιώνουν την τελική τιμή της συμβολομετρικής συνάφειας αποτυπώνουν και το αίτιο αποσυσχέτισης (decorrelation) της συμβολομετρικής φάσης (Παρχαρίδης, 2015). Γενικά, η αποσυσχέτιση υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση που ακολουθεί:

$$\gamma_{\text{total}} = \gamma_{\text{temporal}} + \gamma_{\text{geometric}} + \gamma_{\text{volume}} + \gamma_{\text{thermal}} + \gamma_{\text{processor}} + \gamma_{\text{DC}} \quad (2),$$

όπου:

γ_{temporal} : η χρονική αποσυσχέτιση εμφανίζεται όταν συμβαίνουν φυσικές αλλαγές στα αντικείμενα-στόχους, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά σκέδασης της επιφάνειας.

$\gamma_{\text{geometric}}$:	η γεωμετρική ή βασική αποσυσχέτιση προκύπτει από τη διαφορά των γωνιών πρόσπτωσης μεταξύ δύο λήψεων εικόνων.
γ_{volume} :	η αποσυσχέτιση του όγκου προκαλείται από τον όγκο των σκεδαστών. Όσο μεγαλύτερη είναι η κατακόρυφη έκταση των σκεδαστών που συμβάλλουν στην ηχώ του ραντάρ, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η αποσυσχέτιση.
γ_{thermal} :	ο θερμικός θόρυβος που προκαλείται από το σύστημα και τα χαρακτηριστικά της κεραίας του αισθητήρα.
$\gamma_{\text{processor}}$:	η αποσυσχέτιση της επεξεργασίας προκύπτει από την επιλογή των αλγορίθμων για την εκτέλεση μιας σειράς λειτουργιών, όπως η συσχέτιση ή η παρεμβολή.
γ_{DC} :	η αποσυσχέτιση του κεντροειδούς Doppler προκαλείται από διαφορές του Doppler κεντροειδών μεταξύ δύο λήψεων.

Γενικά, οι σκεδαστές συνάφειας, όπως οι τεχνητές κατασκευές, τα γυμνά πετρώματα και τα εδάφη προτιμώνται για ανάλυση, δεδομένου ότι μπορούν να παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα.

Για την ελαχιστοποίηση των εικονοστοιχείων αποσυσχέτισης, οι χρήστες μπορούν να εκτελέσουν μια πολύ ακριβή συσχέτιση και να επιλέξουν ζεύγη συμβολομετρικών μετρήσεων με μικρή χρονική και κάθετη γραμμική βάση.

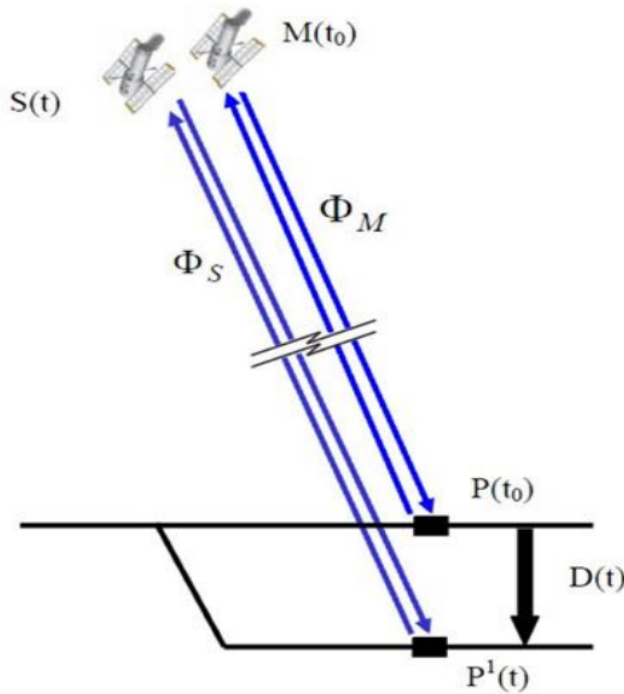
4.6. ¹ DInSAR

Η διαφορική συμβολομετρία (DInSAR) αποτελεί μία πιο εξελιγμένη τεχνική της συμβολομετρίας και στοχεύει στον εντοπισμό των μεταβολών της επιφάνειας, οι οποίες μπορεί να προέρχονται από φυσικά φαινόμενα ή από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη διαφορική συμβολομετρία είναι να είναι γνωστά:

- i. η τοπογραφία της περιοχής, δηλαδή να υπάρχει διαθέσιμο ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) για τον περιορισμό της επίδρασης της τοπογραφίας κατά τη δημιουργία ενός διαφορικού συμβολογραφήματος,
- ii. οι δορυφορικές τροχιές του δορυφόρου τη στιγμή λήψης των εικόνων.

Η φάση που δημιουργείται από την επίδραση της τοπογραφίας αφαιρείται από τη συμβολομετρική φάση, αποτυπώνοντας με αυτό το τρόπο τη παραμόρφωσή της γήινης επιφάνειας. Γι' αυτό το λόγο ονομάζεται διαφορική συμβολομετρία (Feretti, 2014).

Οι μέθοδοι συμβολομετρίας και της διαφορικής συμβολομετρίας παρουσιάζουν μικρές διαφορές, καθώς η διαφορική συμβολομετρία χρησιμοποιεί της μεθόδους της συμβολομετρίας και παρουσιάζει όλα τα πλεονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα της.



Εικόνα 15: Τεχνική DInSAR (¹ Crosetto et al. 2005)

Ο πρώτος δορυφόρος που διέρχεται από την περιοχή μελέτης ονομάζεται Master (M) και καταγράφει την πρώτη εικόνα SAR τη χρονική στιγμή (t_0) και υπολογίζει τη φάση Φ_M . Ακολουθεί ο δεύτερος δορυφόρος, ο οποίος ονομάζεται Slave (S), αποκτά την δεύτερη εικόνα SAR πάνω από την ίδια περιοχή σε κάποια άλλη χρονική στιγμή (t) και υπολογίζει τη φάση Φ_S .

Η τεχνική InSAR υπολογίζει τη συμβολομετρική φάση από τη διαφορά των φάσεων Φ_M και Φ_S . Στην περίπτωση που το έδαφος δεν μεταβάλλεται μετά από συμβάν $D(t)$, τα σημεία P1 και P θα πρέπει να επικαλύπτονται και η διαφορά φάσης να σχετίζεται με τη διαφορά απόστασης των σημείων του εδάφους από το δορυφόρο τη στιγμή της λήψης. Βάση αυτής της πληροφορίας υπολογίζεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους με τη τεχνική InSAR.

Στην αντίθετη περίπτωση, όπου σημειώνεται μεταβολή στη γήινη επιφάνεια και το σημείο P μετακινείται στην P1 μεταξύ δύο σκηνών SAR, εκτός από το τοπογραφικό στοιχείο φάσης Φ_{Topo} , η $\Delta\phi_{Int}$ περιλαμβάνει επίσης την παραμόρφωση του εδάφους συνεισφορά $\Delta\Phi$. Όταν είναι διαθέσιμο ένα DEM, το στοιχείο Φ_{Topo} μπορεί να προσομοιωθεί και να αφαιρεθεί από το $\Delta\phi_{Int}$ και έτσι να ληφθεί η φάση DInSAR $\Delta\phi_{D-Int}$. Πιο αναλυτικά:

$$\Delta\phi_{D-Int} = \Delta\phi_{Int} - \Delta\phi_{topo_sim} = \Delta\phi_{deformation} + \Delta\phi_{atmosphere} + \Delta\phi_{noise} + \Delta\phi_{res_topo} \quad (3),$$

Όπου:

$\Delta\phi_{topo_sim}$: 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.

$\Delta\phi_{deformation}$: είναι η φάση που πρέπει να απομονωθεί από όλες τις άλλες συνιστώσες φάσης προκειμένου να υπολογιστεί η ποσότητα της παραμόρφωσης σε μια περιοχή.

$\Delta\phi_{atmosphere}$: 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.

$\Delta\phi_{noise}$: είναι η διαφορά φάσης που τυπικά κυριαρχείται από τα φαινόμενα διακόσμησης που διευκρινίζονται παρακάτω.

$\Delta\phi_{res_topo}$: αντιπροσωπεύει το υπολειπόμενο στοιχείο λόγω σφαλμάτων στη προσομοίωση.

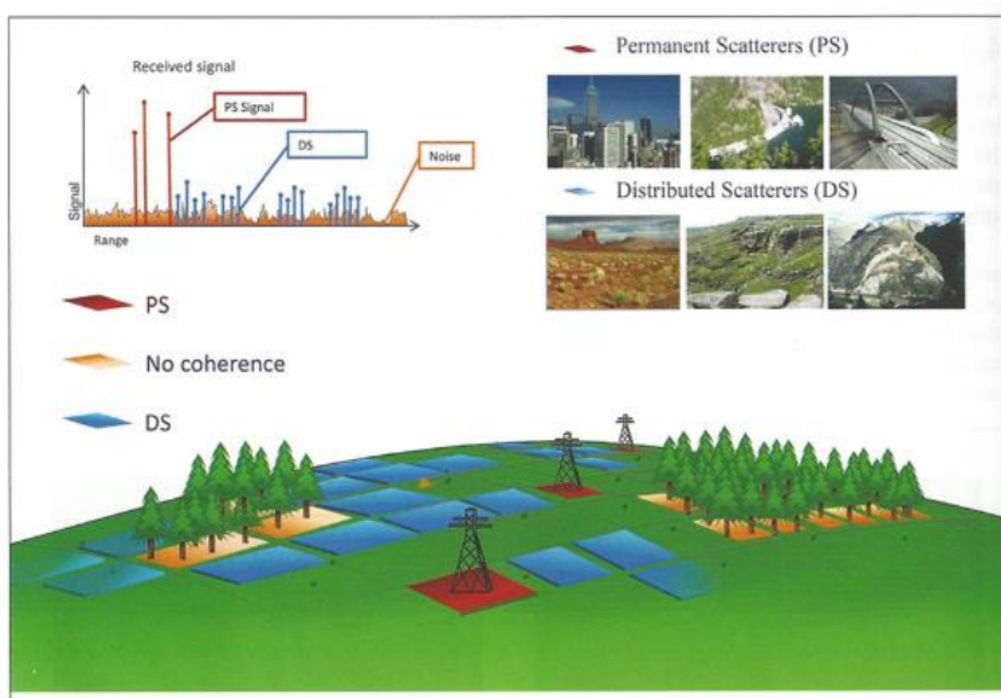
(Massonnet et al. 1998, Crosetto 2005, Hooper et al. 2012)

4.7. Multi-temporal InSAR

Η τεχνική MT-InSAR έχει γίνει δημοφιλής και έχει αναδειχθεί ως εργαλείο για τη μέτρηση των παραμορφώσεων λόγω της ικανότητάς τους να ξεπερνούν περιορισμούς, όπως η χρονική, γεωμετρική αποσυσχέτιση και η ατμοσφαιρική ομοιογένεια (Jamhir Safani, 2023).

Η τεχνική MT-InSAR χρησιμοποιεί είτε μόνιμους σκεδαστές (PS) είτε καταναμημένους σκεδαστές (DS) είτε στόχους συνάφειας (coherence). Συνήθως, οι μόνιμοι σκεδαστές (PS) είναι τεχνητά αντικείμενα που αντανακλούν καλά το σήμα του ραντάρ, όπως οι μεταλλικές κατασκευές, τα κτίρια και οι βραχώδεις εκτάσεις, και χρησιμοποιούνται στη συμβολομετρία σταθερών σκεδαστών (PSI), π.χ. η μέθοδος PS-InSAR. Στις αστικές περιοχές, υπάρχει επικράτηση των PS και οι μέθοδοι PSI επιτρέπουν την ανάλυση ακόμη και μεμονωμένων κατασκευών στο έδαφος.

Οι μέθοδοι που εκμεταλλεύονται συνεκτικούς στόχους περιλαμβάνουν αλγορίθμους, όπως η τεχνική Small BAseline Subset (SBAS), η οποία επιτρέπει την ανίχνευση επιφανειακών παραμορφώσεων και την ανάλυση των χωροχρονικών χαρακτηριστικών τους (Lanari et al., 2007).



Εικόνα 16: Μόνιμοι και καταναμημένοι σκεδαστές (Feretti, 2014)

Η DS αντανακλά χαμηλότερα ραντάρ σε ενέργεια σε σύγκριση με τους στόχους PS και συνήθως καλύπτει αρκετά εικονοστοιχεία σε εικόνες SAR υψηλής ανάλυσης, οι οποίες παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες σκέδασης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί για την εκτίμηση της παραμόρφωσης.

Ο εντοπισμός και η παρακολούθηση τέτοιων στόχων είναι χρήσιμη ιδίως σε προαστιακές και πιο αγροτικές περιοχές, όπου η πυκνότητα των PS μπορεί να είναι χαμηλή. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο συνδυασμός PS και DS είναι σημαντικός για την αποτελεσματική παρακολούθηση της μετατόπισης με τη χρήση δεδομένων SAR Single Look Complex (SLC). Όμως η ακρίβεια των μετρήσεων είναι εξαιρετικά περίπλοκη, καθώς εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου και του αριθμού των εικόνων SAL SLC που χρησιμοποιούνται, της χωρικής πυκνώσης, της ποιότητας των στόχων μέτρησης, την απόστασή τους από τους μόνιμους σκεδαστές, των κλιματικών συνθηκών και τον κύκλο επανάληψης του δορυφόρου (Gatsios, 2020).

4.8. Small Baseline Subset

Σύμφωνα με τον Ferretti (2014), η τεχνική Small Baseline Subset (SBAS) είναι μία πολύ-χρονική συμβολομετρική τεχνική, που ήταν η πρώτη της δεύτερης οικογένειας αλγορίθμων. Αναπτύχθηκε από το CNR-IREA της Νάπολης (Berardino et al. 2002) και έχει υποστεί αλλαγές και βελτιώσεις για την αντιμετώπιση τόσο των πολύπλευρων (Lanari et al. 2007) όσο και των συμβολογραφημάτων πλήρους ανάλυσης (Lanari et al. 2004). Η τεχνική SBAS είναι μια προσέγγιση της DInSAR, που επιτρέπει την ανίχνευση της γήινης επιφανειακής παραμόρφωσης και αναλύει τη χρονική της εξέλιξη (Lanari et al. 2007). Το χαρακτηριστικό του αλγορίθμου της SBAS είναι ότι αντί να μοιράζεται ένα σύνολο διαφορικών συμβολογραφημάτων, όπου όλα μοιράζονται την ίδια Master εικόνα SAR, η SBAS λειτουργεί σε συμβολογραφήματα που έχουν κανονική τιμή της Baseline, που είναι σημαντικά μικρότερη από την κρίσιμη. Επιπλέον, το διάγραμμα της Baseline, που σχετίζεται με την SBAS, είναι διαφορετικό σε σύγκριση με τις τεχνικές PSI. Ο τελικός στόχος είναι πάντα η εκτίμηση των χρονοσειρών μετατόπισης για όσο το δυνατόν περισσότερα σημεία. Τα διαφορικά συμβολογραφήματα βαθμονομούνται με τη χρήση ενός κοινού σημείου αναφοράς και όλες οι διαφορικές μετατοπίσεις αναφέρονται στην πρώτη εικόνα ραντάρ που αποκτάται, η οποία γίνεται μια αποτελεσματική κύρια εικόνα για το σύνολο των δεδομένων. Παρά το γεγονός ότι όλα τα συμβολογραφήματα έχουν μικρή κανονική Baseline, τα πιθανά σφάλματα του DEM πρέπει να εκτιμηθούν και να αντισταθμιστούν, όπως επισημαίνουν οι Fattahi and Amelung (2013). Η εκτίμηση των ατμοσφαιρικών συνιστωσών είναι παρόμοια με αυτήν που πραγματοποιείται στις τεχνικές PSI.

Οι κύριες διαφορές μεταξύ των τεχνικών SBAS και PSI είναι (α) η διαδικασία που χρησιμοποιείται για το ξετύλιγμα των δεδομένων φάσης και (β) ο τύπος των σκεδαστών που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση και την αφαίρεση των ατμοσφαιρικών. Ο αλγόριθμος SBAS δεν μπορεί να παράσχει χρήσιμες πληροφορίες στα δεδομένα φάσης, τα οποία δεν μπορούν να ξετυλιχθούν. Στην SBAS, ο αλγόριθμος ξεκινάει από τα M συμβολογραφήματα χαμηλής Baseline, τα οποία φιλτράρονται και ξετυλίζονται χωρικά. Γενικά, $M > N$ και το διάγραμμα της Baseline δείχνει ένα πλήρως συνδεδεμένο δίκτυο σημείων. Αυτό είναι αρκετά εύκολο να εκτιμηθεί, για κάθε κατανεμημένο σκεδαστή DS, μία καλή συνάφεια στα M διαθέσιμα συμβολογραφήματα, οι N ανεπεξέργαστες τιμές φάσης που αναφέρονται στην πρώτη εικόνα του σύνολο δεδομένων, δημιουργώντας μια χρονοσειρά από $N+1$ τιμές φάσης, όπως ο αριθμός των διαθέσιμων δεδομένων SAR. Κάθε φορά που ξετυλίγεται η φάση, πραγματοποιείται με επιτυχία σε όλα τα M συμβολογραφήματα. Η τεχνική SBAS εφαρμόζεται εικονοστοιχείο προς εικονοστοιχείο σε όλες τις περιοχές που παρουσιάζουν επαρκώς υψηλή συνάφεια και είναι

ανθεκτική σε σχέση με πιθανά σφάλματα του DEM που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των (Berardino et al. 2002, Falaras 2021).

Η αρχή γύρω από της τεχνική αυτή είναι ότι οι αρχικές εικόνες N+1 SAR που καλύπτουν μία συγκεκριμένη περιοχή δημιουργούν M «τυλιγμένα» συμβολογραφήματα με την υπόθεση ότι η χωροχρονική βασική γραμμή είναι εντός ενός συγκεκριμένου εύρους. Τα σημεία στα οποία η μέση συνάφεια (coherence) φάσης είναι μεγαλύτερη από ένα ορισμένο όριο (threshold) θεωρούνται σημεία υψηλής συνάφειας. Το ζετύλιγμα φάσης ενός σημείου με υψηλή συνάφεια (x, r) ενός i «τυλιγμένου» συμβολογραφήματος (που αντιστοιχούν σε δύο χρονικές στιγμές t₁ και t₂) εκφράζεται ως εξής:

$$\Delta\varphi_i(x,r) = \varphi_{t_2}(x,r) + \varphi_{t_1}(x,r) = (4\pi/\lambda) * (d(t_2,x,r) - d(t_1,x,r)) + \Delta\varphi_{top}^i + \Delta\varphi_{noise}^i \quad (1)$$

όπου:

- d(t₂,x,r) και d(t₁,x,r) αντιπροσωπεύουν τη αθροιστική μετατόπιση της οπτικής γραμμής του ραντάρ (LOS) σε t₁ και t₂ σε σχέση με την ώρα έναρξης,
- Δφ_{top}ⁱ είναι η υπολειπόμενη φάση ανύψωσης που προκαλείται από τις ανακρίβειες του ψηφιακού μοντέλου εδάφους DEM
- Δφ_{noise}ⁱ είναι ο θόρυβος φάσης και τα λάθη ζετυλίσματος της φάσης

Μετά την αφαίρεση της υπολειπόμενης φάσης ανύψωσης, η φάση λύνεται για να λυθεί ο όρος της ταχύτητας. Οι παράμετροι που πρέπει να λυθούν είναι οι εξής:

$$v^T = [v_1 = ((\varphi_1 - \varphi_0)/(t_1 - t_0)), v_N = ((\varphi_N - \varphi_{N-1})/(t_N - t_{N-1}))] \quad (2)$$

Η φάση του I συμβολογράμματος ζετυλίσματος μπορεί να γραφτεί ως:

$$\sum_{t_{1,i}+1}^{t_{2,i}} (t_k - t_{k-1}) V_k = \Delta\varphi_i \quad (3)$$

Οι φάσεις όλων των συμβολογραμμάτων εκφράζονται με την παραπάνω μορφή. Οι συνδυασμένες εκφράσεις αντιπροσωπεύονται στο σφάλμα εξίσωση ως:

$$AV = \Delta\varphi \quad (4)$$

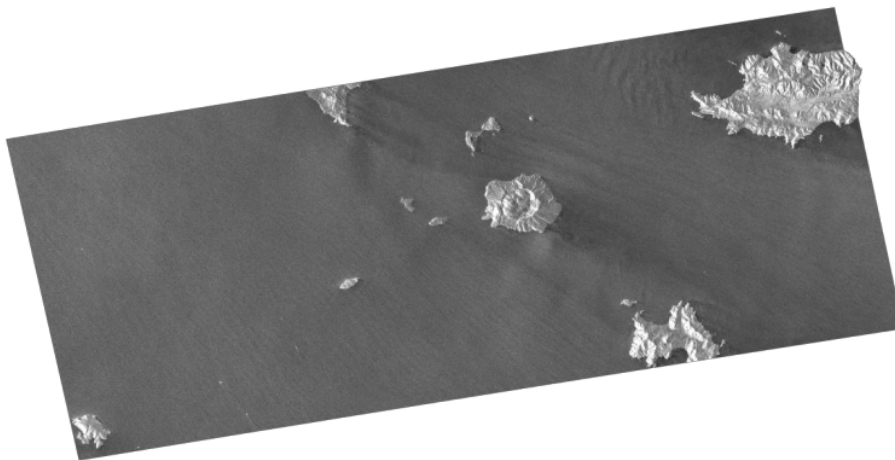
(Shaowei et al., 2022)

5. Δεδομένα και μεθοδολογία

5.1. Δεδομένα

Για την εκπόνηση αυτής της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν ενενήντα (90) εικόνες Single Look Complex (SLC) του δορυφόρου Sentinel-1A σε ανηφορική τροχιά (ascending), όπου ο δορυφόρος ακολουθεί πορεία από το Νότο προς τον Βορρά και ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων του Copernicus Open Hub της ESA (<https://scihub.copernicus.eu/>). Οι εικόνες καλύπτουν το χρονικό διάστημα από 01/01/2018 μέχρι και τις 30/09/2021.

Οι εικόνες έχουν beam mode Interferometric Wide (IW). Όλες οι εικόνες IW swath περιέχουν 3 sub-swath (IW1, IW2, IW3), όπου το κάθε sub-swath περιλαμβάνει 9 burst. Κάθε sub-swath παρέχει κάλυψη 250km, με ανάλυση pixel 5m και 20m σε εύρος και αζιμούθιο (Berger et al., 2012). Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο IW1 μεταξύ των burst 7 και 8. Η λίστα των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται αναλυτικά στον πίνακα του Παραρτήματος Α.



Εικόνα 17: Δορυφορική εικόνα περιοχής μελέτης (IW1 και burst 7 & 8)

Στην εικόνα, οι φωτεινές περιοχές είναι οι πλαγιές που είναι στραμμένες προς τον αισθητήρα λήψης του δορυφόρου και επηρεάζονται από τα φαινόμενα layover και foreshortening. Σε αντίθεση οι πολύ σκοτεινές περιοχές είναι στραμμένες προς την αντίθετη πλευρά του αισθητήρα του δορυφόρου, όπου το χωρικό δείγμα μειώνεται μερικά μέτρα.

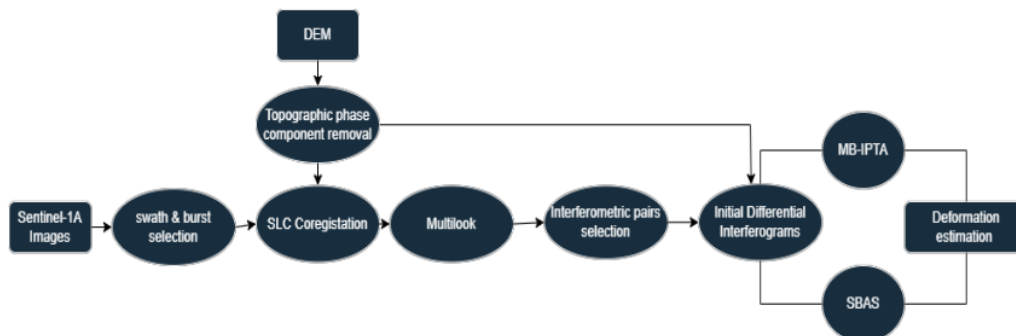
Επίσης, χρησιμοποιήθηκε και το SRTM DEM με χωρική ανάλυση 30m για την περιοχή μελέτης από τον Ελληνικό Οργανισμό Χαρτογραφίσεων και Κτηματολογίου.

5.2. Μεθοδολογία

Η επεξεργασία των ενενήντα εικόνων (90) Sentinel-1 SAR θα γίνει με τη διαχρονική συμβολομετρία MT-InSAR. Η τεχνική αυτή είναι αρκετά δημοφιλής και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των παραμορφώσεων της γήινης επιφάνειας λόγω της ικανότητάς της να ξεπερνά περιορισμούς, όπως η χρονική και η γεωμετρική αποσυσχέτιση και η ατμοσφαιρική ομοιογένεια (Jamhir, 2023). Η MT-InSAR αποτελεί μία επέκταση της τεχνικής DInSAR (Balmer & Hartl, 1998), στην οποία συγκρίνονται οι φάσεις πολλαπλών εικόνων SAR, οι οποίες συλλέγονται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους για την περιοχή μελέτης και οι παραμορφώσεις του εδάφους κατά μήκος της διεύθυνσης της γραμμής ορατότητας του αισθητήρα SAR (LOS) υπολογίζονται με ακρίβεια χιλιοστών (Crosetto et al., 2016).

Στην παρούσα μελέτη, η εφαρμογή της μεθόδου της συμβολομετρίας, που επιλέχτηκε, πραγματοποιείται στο λογισμικό GAMMA (GAMMA Remote Sensing AG, Gümligen, Ελβετία) και η μέθοδος ²⁵ Interferometric Point Target Analysis (IPTA) (Werner et al., 2003).

Στην Εικόνα 18 αναφέρονται τα κύρια στάδια επεξεργασίας των εικόνων SCL που ακολουθήθηκαν για την εκτίμηση των παραμορφώσεων της γήινης επιφάνειας στη Νίσυρο. Οι εικόνες αυτές περιέχουν πληροφορίες για τις διαφορετικές παρεμβαλόμενες φάσεις ενός εικονοστοιχείου (pixel) και διαφορετικές φάσεις πολλαπλών όψεων.

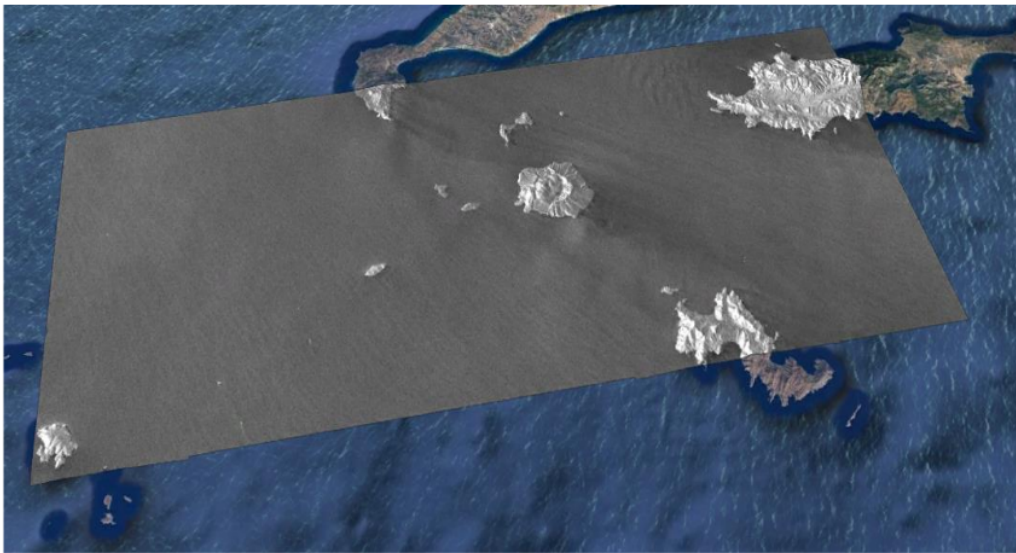


Εικόνα 18: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας

Αρχικά, γίνεται η εισαγωγή των εικόνων SLC του δορυφόρου Sentinel-1A, όπως αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Α. Ως πρώτο βήμα της επεξεργασίας αποτελεί η διόρθωση της τροχιάς του δορυφόρου κατά τη λήψη των εικόνων, με τη χρήση των συνοδευτικών αρχείων τροχιάς που διατίθεται για κάθε δορυφορική εικόνα. Σε αυτά περιέχονται πληροφορίες για τη θέση και την ταχύτητα που έχει ο δορυφόρος τη στιγμή της λήψης της εικόνας.

Έπειτα, επιλέγονται τα κατάλληλα swaths και bursts των αρχικών δορυφορικών εικόνων που επιλέχθηκαν, στα οποία εντοπίζεται η περιοχή μελέτης, και δημιουργείται η Multi-Look Intensity (MLI) εικόνα, όπου μειώνεται ο θόρυβος από στίγματα (speckle noise).

Ακολουθεί η διαδικασία συν-εγγραφής της εικόνας (co-registration), στην οποία γίνεται αντιστοίχιση των εικονοστοιχείων των εικόνων SAR ανά ζεύγη, βήμα απαραίτητο καθώς μπορεί να υπάρχουν αποκλίσεις στην περιοχή που καλύπτουν οι εικόνες, εφόσον ο δορυφόρος δεν περνάει ακριβώς από την ίδια θέση κατά τη λήψη τους. Αυτό το στάδιο είναι πολύ σημαντικό για την ακριβή προσδιορισμό της φάσης. Στη μέθοδο IPTA, η συν-εγγραφή ενός ζεύγους SLC εικόνων είναι υψίστης σημασίας (Prats-Iraola et al., 2015), καθώς, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η συμβολομετρία με δεδομένα Sentinel 1 SLC προϋποθέτει υψηλή ακρίβεια και ακριβή συγχρονισμό των ζευγών εικόνων SLC (Bountzoukis, 2016). Τα ζεύγη των SLC εικόνων δημιουργούνται μεταξύ της εικόνας αναφοράς (master images) και των υπόλοιπων επιλεγμένων εικόνων, οι οποίες ορίζονται ως slave images.



Εικόνα 19: Master Image Visualization

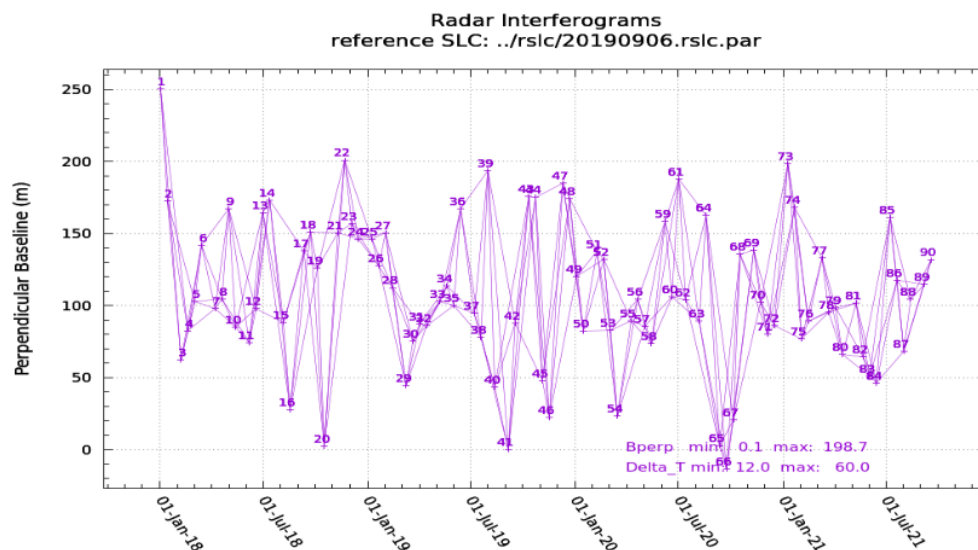
Ως εικόνα αναφοράς ορίζεται μία από τις εικόνες που λαμβάνονται υπόψη για την εκτίμηση των παραμορφώσεων. Ως εικόνα αναφοράς επιλέχτηκε η εικόνα με ημερομηνία λήψης 20190906. Κατά τη μέρα λήψης της εικόνας, η τιμή της βροχόπτωσης ήταν μηδέν χιλιοστά (0mm), σύμφωνα με τα στοιχεία από τη Μετεωρολογική Υπηρεσία (meteo.gr). Η εικόνα αναφοράς, ή αλλιώς master image, θα πρέπει να βρίσκεται περίπου στη μέση της χρονοσειράς, σύμφωνα με τη συσχέτιση των εντάσεων (Wegmüller et al., 1998).

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι κατά τη διαδικασία της συν-εγγραφής χρησιμοποιήθηκε το SRTM DEM στην επεξεργασία, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την απαλοιφή των επιδράσεων της τοπογραφίας των εικόνων SLC. Η χρήση του DEM συμβάλει σημαντικά στη διαδικασία της συν-εγγραφής των εικόνων και στη δημιουργία των συμβολογραφημάτων, καθώς αφαιρείται η συνεισφορά της τοπογραφίας από τα συμβολομετρικά διαγράμματα.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας της συν-εγγραφής ακολουθεί η δημιουργία των συμβολογραφικών διαγραμμάτων λαμβάνοντας υπόψη δύο κριτήρια. Το πρώτο κριτήριο είναι το κριτήριο της εγκάρσιας συνιστώσας (Perpendicular Baseline), όπου η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή είναι τα διακόσια μέτρα (200μ.), με την προϋπόθεση ότι στην περιοχή μελέτης δεν εντοπίζονται απότομες ορεινές περιοχές, οι οποίες προκαλούν παραμορφώσεις στα συμβολομετρικά διαγράμματα. Το δεύτερο κριτήριο αφορά το φαινόμενο της χρονικής αποσυσχέτισης, όπου το μέγιστο χρονικό παράθυρο που επιλέχθηκε για τον σχηματισμό των συμβολογραφημάτων είναι εξήντα (60) μέρες.

Κατά την εκτέλεση αυτής της διαδικασίας σχηματίστηκαν διακόσια εξήντα τέσσερα (264) συμβολομετρικά ζεύγη, εκ των οποίων κρίθηκαν κατάλληλα και χρησιμοποιήθηκαν τα εκατό είκοσι οχτώ (128) ζεύγη (βλ. Παράρτημα Β). ⁴ Καθοριστικό παράγοντα για την καταλληλότητα ενός ζεύγους SAR αποτελεί η εγκάρσια συνιστώσα του ανύσματος βάσης, η οποία αντιστοιχεί στην κάθετη προβολή του ενός αισθητήρα στη διεύθυνση λήψης του άλλου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το μήκος της εγκάρσιας συνιστώσας του ανύσματος βάσης προκαλεί μετατόπιση του φάσματος ίση με το εύρος του σήματος και οδηγεί σε πλήρη αποσυσχέτιση του σήματος του ραντάρ (Φουμέλης, 1999), για κάθε συμβολογράφημα ορίζεται μία κρίσιμη τιμή για τη γραμμική βάση, ⁴ η οποία εξασφαλίζει τα βέλτιστά αποτελέσματα, ενώ για τιμές μεγαλύτερες της κρίσιμης τιμής δεν μπορεί να εφαρμοστεί η συμβολομετρία.

Στην Εικόνα 20 απεικονίζονται τα 128 επιλεγόμενα συμβολομετρικά ζεύγη από τις 90 εικόνες του Sentinel-1A, για χρονικό διάστημα από 12 έως 60 ημέρες και με διαφορά απόστασης του δορυφορικού δέκτη μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης λήψης (Perpendicular Baseline). Οι μωβ γραμμές παρουσιάζουν το σύνολο των ζευγών SAR που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχηματισμό των συμβολογραφημάτων. Οι κάθετες γραμμές βάσης ήταν σχετικά μικρές, με τη μεγαλύτερη να έχει την τιμή εκατό ενενήντα οχτώ κόμμα επτά μέτρα (198,7μ.).



Εικόνα 20: Δίκτυο εικόνων

Για την μείωση των γεωμετρικών σφαλμάτων ακολουθήθηκε η επεξεργασία πολλαπλών όψεων (Multilook) για τη μείωση των σφαλμάτων γεωμετρίας. **Ο αριθμός των looks μιας εικόνας Multilooking αντιστοιχεί στον μέσο όρων των εικονοστοιχείων.** Οι εικόνες μεταβαίνουν στο επόμενο στάδιο επεξεργασίας με λιγότερα στίγματα αλλά κάπως υποβαθμισμένες ως προς τη χωρική τους ανάλυση.

Στο επόμενο στάδιο γίνεται το ξετύλιγμα φάσης. Στο βήμα αυτό απαλείφεται **το φαινόμενο της διπλώμενης φάσης**, δηλαδή η φάση εμφανίζεται παραμορφωμένη λόγω του **ανάγλυφου του εδάφους και της γωνίας λήψης της εικόνας.**

Βάσει των παραπάνω δεδομένων δημιουργήθηκαν διαφορετικές συμβολομετρικές φάσεις πολλαπλών στόχων (DS) και στη συνέχεια εκτιμήθηκαν οι διαφορετικές συμβολομετρικές φάσεις των (PS) χρησιμοποιώντας τη χαμηλή φασματική ποικιλομορφία και τη χρονική μεταβλητότητα της έντασης των SLC. Πιο αναλυτικά, γίνεται υπολογισμός της διαφοράς φάσης για κάθε pixel του ζεύγους SLC εικόνων, έτσι ώστε τα ομόλογα εικονοστοιχεία να αντιστοιχούν στο ίδιο κελί ανάλυσης (Ferretti, 2014). Σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της εγκάρσιας συνιστώσας, η οποία επαναυπολογίζεται για τα διαφορικά συμβολογραφήματα, στα οποία έχει γίνει ξετύλιγμα φάσης και σε αυτά που δεν έχει γίνει.

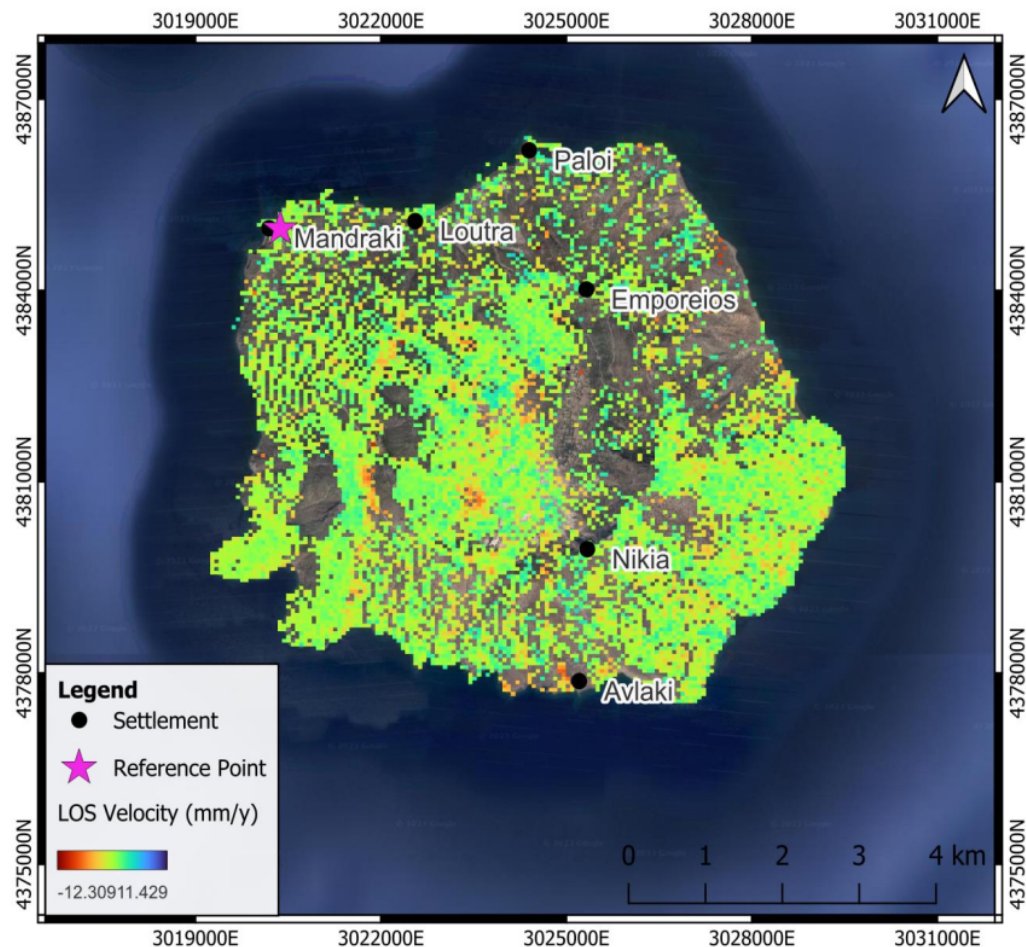
Μετά την εκτέλεση της διαδικασίας η τιμή της εγκάρσιας συνιστώσας επαπροσδιορίζεται και αντικαθιστά την παλιά τιμή για κάθε ζεύγος. Στο τέλος της επεξεργασίας, οι φάσεις μετατράπηκαν σε χρονοσειρές παραμόρφωσης, στις οποίες περιέχονται οι στόχοι PS και DS, οι οποίες χωρίστηκαν.

Στο τελικό στάδιο, χρησιμοποιήθηκε για την γεωκωδικοποίηση το διαθέσιμο ψηφιακό μοντέλο εδάφους που παρέχεται από τον Ελληνικό Οργανισμό Χαρτογραφίσεων και Κτηματολογίου, προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα των αποτελεσμάτων εξόδου. Με την επανάληψη της διαδικασίας δύο με τρεις φορές, επιτεύχθηκε βελτίωση των αποτελεσμάτων και ολοκληρώθηκε η αξιολόγηση και ο ποιοτικός έλεγχος των συμβολογραφημάτων που πιθανότατα περιείχαν την ατμοσφαιρική φάση. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μία γεωκωδικοποιημένη εικόνα στο σύστημα αναφοράς WGS 84.

6. Αποτελέσματα

⁴ Από την επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων του δορυφόρου Sentinel-1A με τη μέθοδο MT-InSAR προκύπτει ότι το νησί της Νισύρου στο χρονικό διάστημα 2019 με 2021 υφίστατο καθίζηση, η οποία φτάνει ως τα 6,4 cm το χρόνο (LOS). Οι μέγιστες τιμές καθίζησης του εδάφους παρατηρήθηκαν στο νότιο τμήμα του νησιού κοντά στον παραθαλάσσιο οικισμό Αυλάκι. Δηλαδή, εμφανίζεται ένας συμβολομετρικός κροσσός στην περιοχή αυτή. Επίσης, καθιζήσεις παρατηρούνται σποραδικά γύρω από την καλντέρα του ηφαιστείου, προς το βορειοδυτικό τμήμα του νησιού, και στο παραλιακό βορειοδυτικό τμήμα του νησιού.

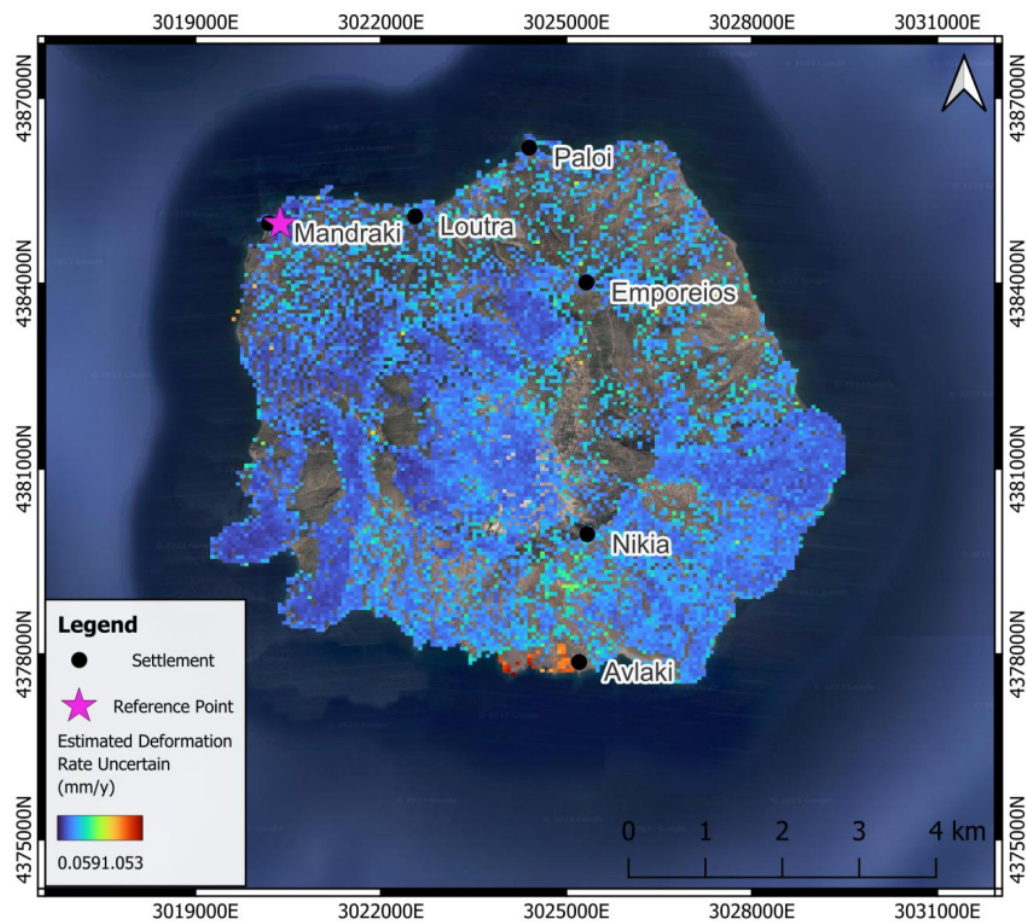
Με την τεχνική SBAS υπολογίστηκε ο μέσος ρυθμός καθίζησης στα 0,18mm/yr. Όμως, σημειώθηκαν και ελάχιστες άνοδοι του εδάφους, οι οποίες παρουσιάζονται διάσπαρτα σε όλη τη νήσο και δεν ξεπερνούν τα 3,8cm.



Εικόνα 21: Χάρτης μέσης ετήσιας εδαφικής παραμόρφωσης (LOS) της χρονικής περιόδου 2019-2021

Στην Εικόνα 21 απεικονίζεται η μέση ετήσια εδαφική παραμόρφωση της χρονικής περιόδου 2019-2021, όπου δείχνει τις περιοχές που παρουσιάζουν γρήγορες κινήσεις και τις περιοχές που είναι σχετικά σταθερές ή που κινούνται πολύ αργά, και κυμαίνεται από -12.309mm/y με 11.429mm/y . Παρατηρείται ότι το έδαφος του νησιού παρουσιάζει μία σχετική σταθερότητα εκτός των οικιστικών περιοχών, των ηφαιστειακών θόλων, στην περιοχή του Ιερού Σπηλαίου του Αγίου Ιωάννη, της ευρύτερης περιοχής μεταξύ των οικισμών Αυλάκι και Νικία και της Λιμνοδεξαμενής της Νισύρου, που βρίσκεται περίπου 16km βορειοανατολικά από τον οικισμό Εμποριό (βλ. Εικόνα 23 & 24).

Όσον αφορά τις περιοχές που παρουσιάζουν αργές κινήσεις, αυτές εντοπίζονται κοντά στον οικισμό Αυλάκι, κατά μήκος της Επαρχιακής Οδού Μανδρακίου και σε κάποιες περιοχές εντός της καλντέρας.

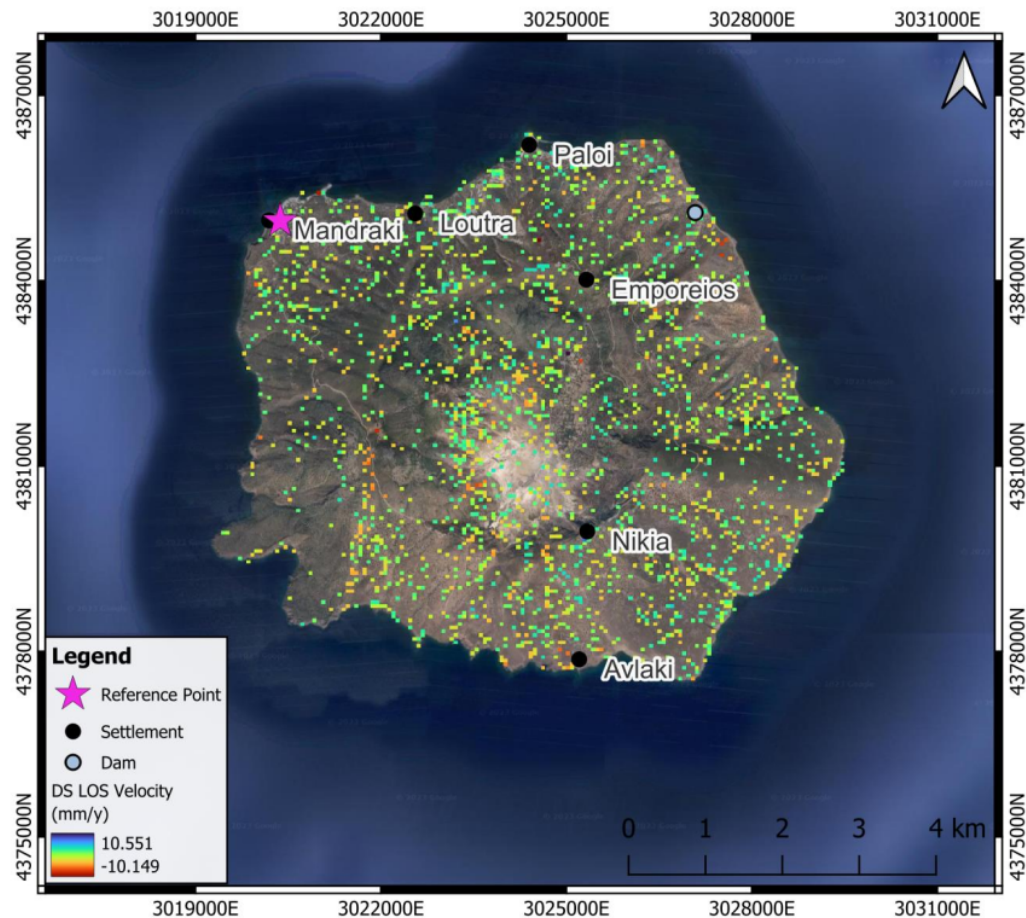


Εικόνα 22: Χάρτης αβεβαιότητας εκτιμώμενου ρυθμού παραμόρφωσης ης χρονικής περιόδου 2019-2021

Στην Εικόνα 22 απεικονίζεται η αβεβαιότητα του εκτιμώμενου ρυθμού παραμόρφωσης της χρονικής περιόδου 2019-2021, η οποία κυμαίνεται από 0,0591mm/y, που συναντάται σε όλο τον νησί πλην της περιοχής περίπου 1χλμ ανατολικά από τον παραθαλάσσιο οικισμό Αυλάκι, όπου υπολογίζονται οι μέγιστες τιμές αβεβαιότητας που φτάνουν τα 1,053mm/y.

Οι τιμές της συνάφειας που υπολογίστηκαν κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 0,7 – 1. Οι τιμές αυτές φανερώνουν χαμηλό θόρυβο στο σκεδαζόμενο σήμα και των εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

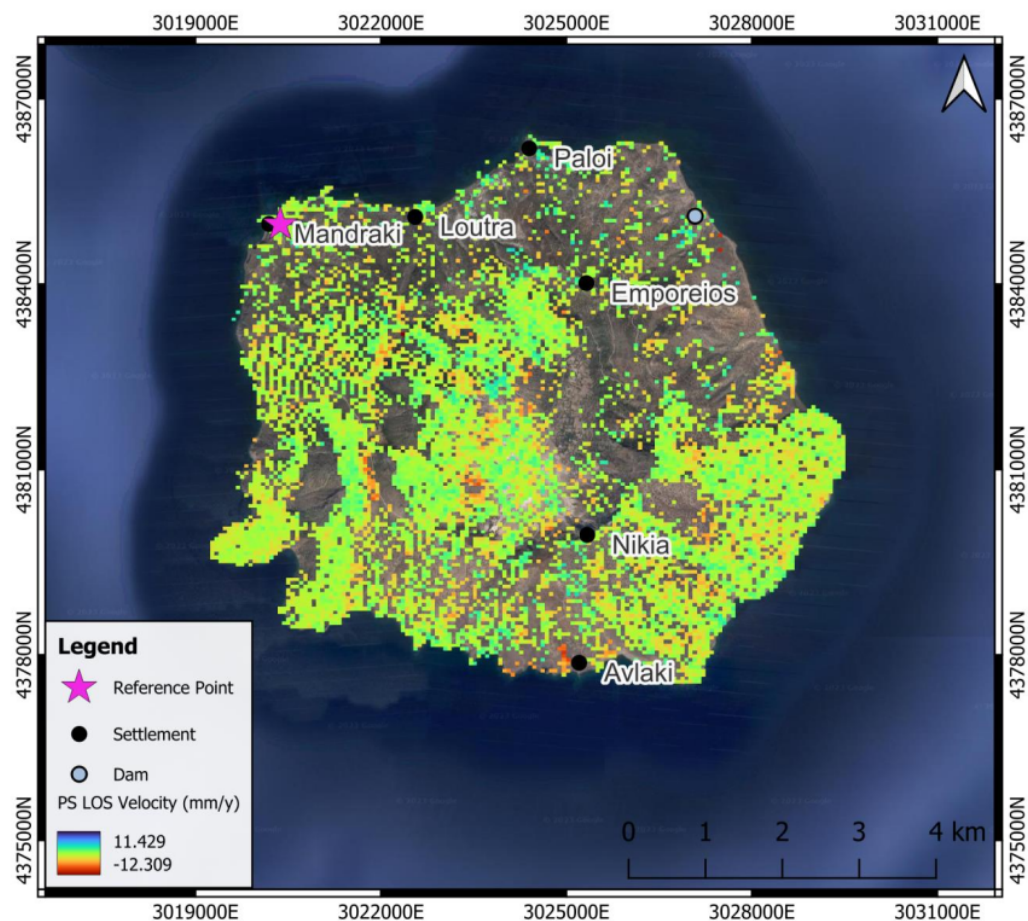
Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 4.7, η μέθοδος MT-InSAR χρησιμοποιεί είτε μόνιμους σκεδαστές (PS) είτε κατανεμημένους σκεδαστές (DS). Από την επεξεργασία προέκυψε ότι ανακτήθηκαν 12980 στόχοι PS και 2310 στόχοι DS. Οι περισσότεροι στόχοι εντοπίζονται σε γεωλογικούς σχηματισμούς που παρουσιάζουν έντονη συνοχή και κοντά σε οικιστικές περιοχές.



Εικόνα 23: LOS Velocity των DS στόχων

Οι κατανεμημένοι σκεδαστές (DS) βρίσκονται διάσπαρτοι σε ολόκληρο το νησί, εκτός από τις δομημένες περιοχές κοντά στους οικισμούς και σε ακάλυπτες περιοχές που παρουσιάζουν ήπια κλίση. Εντοπίζονται στο κεντρικό οριζόντιο τμήμα της καλντέρας, στο κέντρο του νησιού, και στις βόρειες, ανατολικές και νότιες περιοχές του νησιού.

Οι μόνιμοι σκεδαστές συγκεντρώνονται περιμετρικά της καλντέρας, ΝΔ, νότια και Δυτικά του νησιού. Εμφανίζονται κυρίως στις οικιστικές περιοχές, σε βραχώδεις ορεινούς όγκους και κατά μήκος του οδικού δικτύου, ειδικά στον δρόμο που οδηγεί από τον Κρατήρα του Αγίου Στεφάνου προς τον οικισμό Μανδράκι και ΝΔ του νησιού, στον κόλπο ανάμεσα στον Άγιο Δημήτριο και στο Άκρα Κατερό.



Εικόνα 24: LOS Velocity των PS στόχων

Οι μόνιμοι σκεδαστές που παρουσιάζουν μεγάλες τιμές μέσης εδαφικής παραμόρφωσης βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή μεταξύ των οικισμών Αυλάκι και Νικία και βόρεια του νησιού κοντά στους οικισμούς Εμποριό, Πάλοι και Λουτρά και στην Λιμνοδεξαμενή του νησιού, η οποία

ολοκληρώθηκε το 2003, έχει έκταση 1,36Ha και τροφοδοτείται από δύο υδροληψίες όμβριων υδάτων (βλ. Εικόνα 24).

7. Συζήτηση – Συμπεράσματα

Ο κύριος στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αφορά την ενημέρωση των μελετών που αφορούν στην εκτίμηση της παραμόρφωσης του εδάφους στη Νίσυρο και η εκτίμηση της ηφαιστειακής δραστηριότητας με τη χρήση των δορυφορικών δεδομένων SAR της αποστολής Sentinel-1A της ESA. Παρόλο που υπάρχει πληθώρα μελετών που αφορά την παραμόρφωση του εδάφους στο ηφαίστειο της Νίσυρου, σχεδόν όλες επικεντρώνονται στο χρονικό διάστημα από το έτος 1995 μέχρι το έτος 1997, όπου εμφανίστηκε μία έντονη σεισμική δραστηριότητα στο νησί. Επίσης, έχουν γίνει μελέτες που καλύπτουν το χρονικό διάστημα που ακολούθησε από την σεισμική περίοδο, από 1997 μέχρι το 1999. Επίσης, έχουν γίνει μελέτες για τα μεταγενέστερα χρονικά διαστήματα από το έτος 1999 μέχρι το 2002 και από το έτος 2004 μέχρι το έτος 2010. Στις χρονιές που ακολούθησαν από τη σεισμική περίοδο (unrest period) το ηφαίστειο είχε περάσει σε μία περίοδο αδράνειας (rest period).

Η παρούσα μελέτη είναι η πρώτη που επιχειρεί την ανάλυση MT-InSAR με τη χρήση δορυφορικών εικόνων SLC του δορυφόρου Sentinel-1A για τη χρονική περίοδο 2019 με 2021, σχεδόν είκοσι χρόνια από τις πρώτες μελέτες, που κάλυπταν την περίοδο της έντονης σεισμικής δραστηριότητας με απώτερο στόχο την εστίαση της προσοχής γύρω από το ενεργό ηφαίστειο της Νίσυρου και την δημοσίευση νέων μελετών που θα επικεντρώνονται στο σήμερα.

Ενώ το ηφαίστειο της Νίσυρου παρουσίαζε άνοδο έως 5cm τη σεισμική περίοδο 1995 με 1997, εκτός του ΝΔ τμήματος του νησιού (Parcharidis et al., 2004), ακολούθησε μία περίοδος από το 1998 με 2002 που παρουσίαζε μία πτωτική άνοδο και από το έτος 2002 (Lagios et al., 2005), (Derdelakos et al., 2013) παρουσιάζει μία καθίζηση σε όλη της την έκταση του νησιού, η οποία συνεχίζει μέχρι και σήμερα.

Τα αποτελέσματα της MT-InSAR δείχνουν ότι υπήρξε καθίζηση σε όλη την έκταση του νησιού, η οποία φτάνει ως τα 6,4cm το χρόνο (LOS) για το χρονικό διάστημα 2019 με 2021, ενώ υπήρξαν ελάχιστες ανυψώσεις, οι οποίες παρουσιάζονται σε όλη τη νήσο και δεν ξεπερνούν τα 3,8cm. Η μέση ετήσια εδαφική παραμόρφωση κυμαίνεται από -12.309mm/y με 11.429mm/y με μέσο ρυθμό καθίζησης στα 0,18mm/yr. Ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι σημαντικά μικρότερος από αυτόν της χρονικής περιόδου 1995 με 1997, ο οποίος έφτασε τα 87mm/yr (Sachpazi et al., 2002), ο οποίος υπολογίστηκε με την μέθοδο DInSAR σε συνδυασμό με τις μετρήσεις DGPS.

Γενικά παρατηρείται καθίζηση του εδάφους με αρκετά χαμηλούς ρυθμούς, η οποία προδίδει μεν μια σεισμική δραστηριότητα ή οποία όμως βρίσκεται σε περίοδο αδράνειας (rest period).

Οι επεξεργασίες των δορυφορικών εικόνων του δορυφόρου Sentinel-1A κατάφεραν να δώσουν μία καλή εικόνα σχετικά με την παραμόρφωση του εδάφους και κατ' επέκταση της εκτίμησης της έντασης της ηφαιστειακής δραστηριότητας, η οποία είναι σημαντική για την έγκαιρη λήψη πολιτικών αποφάσεων πρόληψης μέτρων αντιμετώπισης μιας ενδεχόμενης εκδήλωσης κάποιου ηφαιστειακού κινδύνου.

Το πρόβλημα που παρουσιάστηκε στην εκτίμηση της εδαφικής παραμόρφωσης είναι ότι τα δεδομένα του Sentinel-1A μας δίνουν πληροφορίες για τις κατακόρυφες μετακινήσεις του εδάφους και όχι και για τις οριζόντιες μετακινήσεις και τις αντίστοιχες ταχύτητες αυτών, οι οποίες θα μπορούσαν να υπολογιστούν από δεδομένα επίγειων μετρήσεων με τη χρήση δεκτών GPS της ίδιας χρονικής περιόδου.

Προτείνονται οι μεταγενέστερες μελέτες:

- να λάβουν υπόψη δορυφορικά δεδομένα σε συνδυασμό με επίγειες μετρήσεις δεκτών GPS,
- να εστιάσουν στα ρήγματα της περιοχής, στους βόλους του ηφαιστείου και στις περιοχές που υπάρχουν θερμές πηγές, για να γίνει εκτίμηση της επιρροής τους στην παραμόρφωση των περιοχών που τα περιβάλλουν,
- να συγκριθεί ο ρυθμός παραμόρφωσης του εδάφους με αυτός της παρούσας εργασίας, για να διαπιστωθεί αν θα είναι ίδιος, γεγονός που θα έδειχνε ότι το έδαφος παρουσιάζει σταθερότητα, ή αν αυξήθηκε, που θα μπορούσε να δείξει την ενεργοποίηση της ηφαιστειακής δραστηριότητας.

Τα δεδομένα αυτά και σε συνδυασμό με αντίστοιχες γεωλογικές μελέτες μπορούν να συνεισφέρουν στην πρόληψη και στην έγκαιρη αντιμετώπιση κινδύνων που προέρχονται από φυσικές καταστροφές, όπως στην ²¹παρούσα περίπτωση την σεισμική δραστηριότητα. Η παρακολούθηση τέτοιων περιοχών ²¹μπορεί να μας δώσει περισσότερες πληροφορίες για τον τρόπο που λειτουργούν τα ηφαίστεια και πως επηρεάζεται η γήινη επιφάνεια πάνω από αυτά, στην οποία ζουν και δραστηριοποιούνται οι άνθρωποι.

Γεωδαισία με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων

ORIGINALITY REPORT

19%

SIMILARITY INDEX

18%

INTERNET SOURCES

0%

PUBLICATIONS

6%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	estia.hua.gr Internet Source	5%
2	pergamos.lib.uoa.gr Internet Source	3%
3	el.wikipedia.org Internet Source	1%
4	dias.library.tuc.gr Internet Source	1%
5	dspace.aua.gr Internet Source	1%
6	hdl.handle.net Internet Source	1%
7	Submitted to University of West Attica Student Paper	1%
8	www.lhlogismiki.gr Internet Source	1%
9	ikee.lib.auth.gr Internet Source	<1%

- | | | |
|----|--|------|
| 10 | Submitted to Cyprus University of Technology
Student Paper | <1 % |
| 11 | (3-1-15)
http://195.251.240.254:8080/bitstream/handle/10184/4/sequence=1
Internet Source | <1 % |
| 12 | okeanis.lib2.uniwa.gr
Internet Source | <1 % |
| 13 | Submitted to Harokopio University
Student Paper | <1 % |
| 14 | www.copernicus.eu
Internet Source | <1 % |
| 15 | www.thedockrat.gr
Internet Source | <1 % |
| 16 | Submitted to Hellenic Open University
Student Paper | <1 % |
| 17 | beta.kallipos.gr
Internet Source | <1 % |
| 18 | toulapan95.blogspot.com
Internet Source | <1 % |
| 19 | Deming Ma, Rui Zhao, Yongsheng Li, Zhengguang Li. "Land Subsidence Assessment of an Archipelago Based on the InSAR Time Series Analysis Method", Water, 2023 | <1 % |

20	Submitted to National Technical University of Athens Student Paper	<1 %
21	hellanicus.lib.aegean.gr Internet Source	<1 %
22	Submitted to European University of Cyprus Student Paper	<1 %
23	docplayer.gr Internet Source	<1 %
24	www.elinyae.gr Internet Source	<1 %
25	www.researchgate.net Internet Source	<1 %
26	issuu.com Internet Source	<1 %
27	okeanis.lib.teipir.gr Internet Source	<1 %
28	Submitted to Aristotle University of Thessaloniki Student Paper	<1 %
29	Submitted to International Hellenic University Student Paper	<1 %
30	www.versustravel.eu Internet Source	<1 %

31	Submitted to Technical University of Crete Student Paper	<1 %
32	cstaikouras.gr Internet Source	<1 %
33	b38948441bd54666d914035d8d1d3829256d1172- www.googledrive.com Internet Source	<1 %
34	www.bounasprogress.gr Internet Source	<1 %
35	www.ecclesia.gr Internet Source	<1 %
36	www.mirc.ntua.gr Internet Source	<1 %
37	www.moa.gov.cy Internet Source	<1 %
38	www.nature.com Internet Source	<1 %
39	dx.doi.org Internet Source	<1 %

Exclude quotes Off

Exclude matches Off

Exclude bibliography Off