



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**



**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ, ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

### **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

«Χαρτογράφηση των εδαφικών μετατοπίσεων εξαιτίας των σεισμών του 2021, με την χρήση δορυφορικών εικόνων Radar στην περιοχή του Αρκαλοχωρίου(Κρήτη) και του Δαμασίου(Λάρισα)»

**Φοιτήτρια:** ΤρουλλινούΡαφαέλα Χριστίνα

**Επιβλέπων Καθηγητής:** Φαρασλής Ιωάννης

**Λάρισα, Ιούνιος 2025**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ (Abstract)

### Περίληψη

Οι σεισμοί είναι φυσικά φαινόμενα που προκαλούνται από την ξαφνική απελευθέρωση ενέργειας στο εσωτερικό της Γης. Η απελευθέρωση αυτή δημιουργεί σεισμικά κύματα που διαδίδονται στην επιφάνεια προκαλώντας δονήσεις, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφές, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα ή χαμηλή αντισεισμική προστασία. Οι μετακινήσεις που προκαλούνται στο έδαφος από τέτοιες δονήσεις μπορούν να μελετηθούν αποτελεσματικά με σύγχρονες τεχνικές, όπως η διαφορική συμβολομετρία. Το ενδιαφέρον για την παρούσα εργασία ξεκίνησε από τα γεγονότα του 2021, όταν ισχυροί σεισμοί έπληξαν περιοχές της Ελλάδας προκαλώντας σημαντικές ζημιές. Ειδικότερα, οι περιοχές του Αρκαλοχωρίου στην Κρήτη και του Δαμασίου στη Θεσσαλία βρέθηκαν στο επίκεντρο της σεισμικής δραστηριότητας, με πολλά κτίρια να υφίστανται καταστροφές και το έδαφος να παρουσιάζει μετακινήσεις και καθιζήσεις. Στόχος της εργασίας είναι να αξιοποιήσει τη μέθοδο DInSAR με σκοπό τον εντοπισμό και την ανάλυση των παραμορφώσεων του εδάφους που προκλήθηκαν από τους σεισμούς αυτούς. Η μελέτη βασίζεται σε δορυφορικά δεδομένα που καλύπτουν τις περιοχές μελέτης πριν και μετά τους σεισμούς, με σκοπό να αποτυπωθούν οι μεταβολές που προκλήθηκαν από το φαινόμενο. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση των επιπτώσεων που είχε η σεισμική δραστηριότητα στο ανάγλυφο του εδάφους και υπογραμμίζουν τη σημασία της χρήσης σύγχρονων τεχνολογιών για την παρακολούθηση φυσικών καταστροφών.

**Λέξεις-Κλειδιά:** Συνθετική Άνοιγμα Κεραίας (SAR), Τηλεπισκόπηση, Σεισμική Δραστηριότητα, Συμβολομετρική Ανάλυση, Εδαφική Παραμόρφωση

### Abstract

Earthquakes are natural phenomena caused by the sudden release of energy within the Earth's interior. This release generates seismic waves that propagate to the surface and produce ground shaking, which can lead to significant damage, especially in areas with dense human activity or poor seismic protection. Ground displacements caused by such events can be effectively studied using modern techniques such as Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR). The motivation for this study stems from the events of 2021, when strong earthquakes struck various regions of Greece, causing severe damage. In particular, the areas of Arkalochori in Crete and Damasi in Thessaly were at the center of seismic activity, with many buildings suffering structural damage and the ground showing signs of displacement and subsidence.

The aim of this study is to utilize the DInSAR method to detect and analyze the ground deformations caused by these earthquakes. The research is based on satellite data covering the areas of interest before and after the seismic events, with the goal of mapping the changes induced by the phenomenon. The results of the analysis contribute to a better understanding of the impact that seismic activity had on the Earth's surface and highlight the importance of using advanced technologies for monitoring natural disasters.

**Keywords:** Synthetic Aperture Radar (SAR), Remote Sensing, Seismic Activity, Interferometric Analysis, Ground Deformation

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Κ. Ιωάννη Φαρασλή για την επίβλεψη της πτυχιακής εργασίας μου και τις συμβουλές που μου πρόσφερε, τον Κ. Βασίλειο Λέτσιο για την πολύτιμη βοήθεια του, και τέλος την οικογένειά μου για την στήριξη καθόλη την διάρκεια των σπουδών μου μέχρι σήμερα.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ (Abstract) .....                                      | 2         |
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....                                               | 4         |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ.....                             | 7         |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ .....                                         | 7         |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....                                                  | 8         |
| <b>1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....</b>                    | <b>10</b> |
| 1.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ .....                                  | 10        |
| 1.1.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ .....            | 10        |
| 1.1.2 ΣΕΙΣΜΟΙ .....                                            | 11        |
| 1.1.3 ΑΙΤΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΣΕΙΣΜΩΝ.....                           | 13        |
| 1.1.4 ΚΛΙΜΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΣΕΙΣΜΩΝ.....     | 13        |
| 1.1.5 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΕΙΣΜΩΝ .....                                 | 14        |
| 1.1.6 ΣΕΙΣΜΟΙ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΚΡΑΤΕΙΑ.....                    | 15        |
| 1.2 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ .....                             | 16        |
| 1.2.1 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ..... | 17        |
| 1.2.2 ΕΙΔΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ .....                       | 18        |
| 1.2.3 ΡΑΝΤΑΡ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ (SAR) .....                 | 19        |
| 1.2.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COPERNICUS ΚΑΙ SENTINEL 1.....                 | 22        |
| 1.3 ΕΙΚΟΝΕΣ ΡΑΝΤΑΡ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΣΕΙΣΜΩΝ .....            | 24        |
| 1.3.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ InSAR ΤΕΧΝΙΚΩΝ .....                 | 26        |
| <b>2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ .....</b>                   | <b>28</b> |
| 2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ .....                       | 28        |
| 2.1.1 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ.....                            | 28        |
| 2.1.2 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΛΑΡΙΣΑΣ.....                           | 30        |
| 2.1.3 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ, ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ.....       | 32        |
| 2.1.4 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΛΑΡΙΣΑ, ΔΑΜΑΣΙ .....         | 33        |
| 2.2 ΥΛΙΚΑ & ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....                                      | 34        |
| <b>3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ.....</b>            | <b>38</b> |
| <b>4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>                         | <b>45</b> |
| 4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΔΑΜΑΣΙΟΥ .....                       | 45        |
| 4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙΟΥ .....                   | 49        |
| 4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΠΕΡΙΟΧΩΝ .....                            | 52        |
| <b>5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....</b>            | <b>54</b> |

|     |                                                     |           |
|-----|-----------------------------------------------------|-----------|
| 5.1 | ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ..... | 54        |
| 5.2 | ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ RANDAR.....                     | 56        |
| 5.3 | ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....                                     | 57        |
|     | <b>ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>                  | <b>59</b> |
|     | <b>ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>                      | <b>61</b> |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 1: Απεικόνιση λειτουργίας ενός συστήματος SAR (google) .....                                            | 20 |
| Εικόνα 2: Απεικόνιση αποτύπωσης και χωρικής ανάλυσης ενός συστήματος ραντάρ (google) .....                     | 22 |
| Εικόνα 3: Sentinel-1C .....                                                                                    | 23 |
| Εικόνα 4: Μορφή πλατφόρμας συλλογής δεδομένων .....                                                            | 35 |
| Εικόνα 5 Footprint περιοχής Δαμασίου .....                                                                     | 37 |
| Εικόνα 6 Footprint περιοχής Αρκαλοχωρίου .....                                                                 | 37 |
| Εικόνα 7: Πληροφορίες ζεύγους εικόνων Αρκαλοχωρίου .....                                                       | 39 |
| Εικόνα 8: Πληροφορίες ζεύγους εικόνων Δαμασίου .....                                                           | 40 |
| Εικόνα 9: RGB εικόνα ζεύγους περιοχής Δαμασίου .....                                                           | 40 |
| Εικόνα 10: Συμβολογράφημα περιοχής μελέτης Δαμασίου .....                                                      | 41 |
| Εικόνα 11: Συνοχή ζεύγους εικόνων Δαμασίου .....                                                               | 42 |
| Εικόνα 12: Φιλτραρισμένο διαφορικό συμβολογράφημα .....                                                        | 43 |
| Εικόνα 13: Φιλτραρισμένο συμβολογράφημα μετά από ξετύλιγμα .....                                               | 44 |
| Εικόνα 14 Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων των τιμών μετατόπισης για την ευρύτερη περιοχή του Δαμασίου .....     | 46 |
| Εικόνα 15 Ιστόγραμμα συχνότητας περιοχής Δαμασίου .....                                                        | 48 |
| Εικόνα 16 Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων των τιμών μετατόπισης για την ευρύτερη περιοχή του Αρκαλοχωρίου ..... | 49 |
| Εικόνα 17 Ιστόγραμμα συχνότητας περιοχής Αρκαλοχωρίου .....                                                    | 50 |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| Χάρτης 1: Χάρτης περιοχής μελέτης οικισμού Αρκαλοχωρίου ..... | 30 |
| Χάρτης 2: Χάρτης περιοχής μελέτης οικισμού Δαμασίου .....     | 32 |
| Χάρτης 3 Χάρτης μετατοπίσεων της περιοχής Δαμασίου .....      | 47 |
| Χάρτης 4 Χάρτης μετατοπίσεων της περιοχής Αρκαλοχωρίου .....  | 51 |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Πίνακας 1 Λειτουργίες Λήψης του Sentinel-1 και οι Χρήσεις τους .....                               | 24 |
| Πίνακας 2 Νεογενείς και τεταρτογενής αποθέσεις της λεκάνης του Ηρακλείου .....                     | 28 |
| Πίνακας 3 Γεωχωρικά δεδομένα για την δημιουργία των χαρτών του Δαμασίου και του Αρκαλοχωρίου ..... | 36 |
| Πίνακας 4 Εικόνες Radar που χρησιμοποιήθηκαν στις 2 περιοχές μελέτης .....                         | 36 |
| Πίνακας 5 Συμβολομετρία (SAR Interferometry) .....                                                 | 38 |
| Πίνακας 6 Τομείς Εφαρμογής της Τηλεπισκόπησης και Δυνατότητες Ανάλυσης .....                       | 57 |

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο άνθρωπος καθημερινά έρχεται αντιμέτωπος με προκλήσεις που δύναται να διαχειριστεί και να καταπολεμήσει. Ένα μεγάλο ποσοστό αυτών των προκλήσεων μπορεί να αφορά την μακροπρόθεσμη ανάπτυξη του, την περιβαλλοντική και κοινωνική βιωσιμότητα, την δυνατότητα πολιτικής προσαρμογής του και την ανταγωνιστικότητα. Οι δυσκολίες αυτές και τα προβλήματα που παρουσιάζονται προκύπτουν από πράξεις του ίδιου του ανθρώπου και είναι κατά ένα μεγάλο ποσοστό εύκολα στο να αντιμετωπιστούν και τελικώς να επιλυθούν.

Είναι γνωστό όμως και από τα παλαιότερα χρόνια ως και σήμερα και με πολλά παραδείγματα ανά ολόκληρο τον κόσμο, πως κάποιες καταστάσεις δεν είναι αποτέλεσμα ανθρώπινων ενεργειών, αλλά ο ίδιος καλείται να τις διαχειριστεί με μοναδικό στόχο την επιβίωση του. Τέτοιες καταστάσεις είναι οι φυσικές καταστροφές.

Μια φυσική καταστροφή όπως αναφέρει και το όνομα της είναι φυσικό γεγονός και δεν μπορεί να καταστεί υπό τον έλεγχο του ανθρώπου. Το μέγεθος της κάθε φορά είναι ακανόνιστο και μη προβλέψιμο. Ένας φυσικός κίνδυνος έχει την δυνατότητα να εξελιχθεί σε φυσική καταστροφή καθώς πέραν από την απειλή θανάτου ή τραυματισμού των ανθρώπινων ζώων μπορεί να προκαλέσει και αλλαγές ή καταστροφές στο περιβάλλον και στις ανθρώπινες ιδιοκτησίες.

Η χρήση σύγχρονων τεχνολογιών γεωπληροφορικής βοηθά σημαντικά στην άμεση και αποτελεσματική αντιμετώπιση των συνεπειών μιας φυσικής καταστροφής και στη σωστή πορεία των ενεργειών από την αρχή μέχρι την πλήρη αποκατάσταση της περιοχής.

Η χρήση των εφαρμογών αυτών σε συνδυασμό και με επιστήμες όπως η Τηλεπισκόπηση, τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, η Χαρτογραφία, βοηθούν στην δημιουργία γεωχωρικών δεδομένων και στην συνέχεια στην επεξεργασία των δεδομένων αυτών με την χρήση αναγκαίων μεθοδολογιών και λογισμικών προγραμμάτων με σκοπό τον εντοπισμό προτύπων, τάσεων και την οπτικοποίηση των αντίστοιχων πληροφοριών.

Κύριος στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η χαρτογράφηση των μετατοπίσεων του εδάφους που είχαν ως αποτέλεσμα δύο σεισμοί στην περιοχή του Αρκαλοχωρίου στην Κρήτη και στην περιοχή του Δαμασίου στην Λάρισα, στις 27 Σεπτεμβρίου του 2021 και στις 3 Μαρτίου του 2021 αντίστοιχα.

Η εργασία αυτή αποτελείται από πέντε κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση του θεωρητικού πλαισίου και αφορά τις φυσικές καταστροφές και την ταξινόμησή τους. Στην συνέχεια επικεντρώνεται εκτενέστερα στο φαινόμενο του σεισμού, στα είδη του, τα όργανα και τον τρόπο μέτρησης



του και φυσικά στις επιπτώσεις του. Παρουσιάζεται η δορυφορική τηλεπισκόπηση με αναφορές στο σύστημα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος κεραίας και στον Sentinel-1 που αποτελεί τον πρώτο δορυφόρο της αποστολής Sentinel του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος. Τέλος, εξετάζεται η σχέση της τηλεπισκόπησης με την παρακολούθηση σεισμών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται στοιχεία και πληροφορίες για την ιστορική σεισμική δραστηριότητα ευρύτερα στην Ελλάδα, στην Κρήτη και στην Λάρισα. Επίσης γίνεται αναφορά σε σημαντικά γεωλογικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά των περιοχών του Αρκαλοχωρίου και του Δαμασίου καθώς επίσης και στους δύο σεισμούς του Μαρτίου και του Σεπτεμβρίου του 2021.

Το τρίτο κεφάλαιο σχετίζεται με την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, παρουσιάζονται τα υλικά που χρειάστηκαν, η συμβολομετρία και ο τρόπος εισαγωγής και προ επεξεργασίας των αντίστοιχων δορυφορικών δεδομένων με την βοήθεια των λογισμικών DEM, SNAP και QGIS.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μεθοδολογία τα οποία αποτυπώνονται σε δύο τελικούς χάρτες για καθεμία από τις περιοχές.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της μελέτης, και προτάσεις για μελλοντική μελέτη.

## 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

### 1.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ

#### 1.1.1 *ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ*

Οι φυσικές καταστροφές έχουν οριστεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Είναι στοιχεία του φυσικού περιβάλλοντος που μπορεί να βλάψουν τον άνθρωπο και προέρχονται από δυνάμεις άγνωστες ή ξένες σε αυτόν. Ο κίνδυνος αφορά την πιθανότητα εμφάνισης ενός δυνητικά καταστροφικού γεγονότος σε συγκεκριμένο χρόνο και τόπο. Τέλος, μια φυσική ή ανθρωπογενής γεωλογική κατάσταση ή φαινόμενο θεωρείται απειλή όταν υπάρχει πραγματικός ή πιθανός κίνδυνος για τη ζωή και τις περιουσίες των ανθρώπων. (Λεκκας, 2000):

Η «καταστροφή» μπορεί να θεωρηθεί και ως ένα μεμονωμένο γεγονός το οποίο προκαλεί ζημιές μεγαλύτερες από 1 εκατομμύριο δολάρια και τραυματισμούς ή θανάτους σε περισσότερους από 100 ανθρώπους. Η προσπάθεια εκτίμησης των επιπτώσεων που θα έχει μια καταστροφή ποικίλλει, καθώς μικρές καταστροφές είναι ικανές για μικρές ζημιές εάν όμως δεν υπάρχουν ακριβές κατασκευές ή πολύτιμα αντικείμενα. Για τον λόγο αυτόν έχει παρατηρηθεί πως στις φτωχές χώρες τα καταστροφικά γεγονότα προκαλούν πολλά δυστυχήματα, ενώ στις παραπάνω ανεπτυγμένες και πλούσιες χώρες μεγάλες υλικές ζημιές. (Λέκκας, 2000).

Η διαδικασία ταξινόμησης των καταστροφών αλλά και των αιτιών που τις προκαλούν είναι μια αρκετά δύσκολη διαδικασία, καθώς αντιστοιχούν σε πολύπλοκους μηχανισμούς και είναι πιθανό να δημιουργηθούν και άλλα είδη καταστροφών μετά την εκδήλωσή τους. Παράδειγμα, είναι ένας σεισμός που μπορεί να συνοδεύεται από τσουνάμι, κατολισθήσεις, διαρρήξεις σε φράγματα, καταστροφές και πυρκαγιές σε περιοχές, κα. (Λέκκας, 2000).

Αξίζει να αναφερθεί ότι δεν προκαλούν καταστροφές όλα τα φαινόμενα που εκδηλώνονται, ακόμη και αν λόγω μεγέθους χαρακτηρίζονται ακραία καταστροφικά. Ένα παράδειγμα είναι ένας σεισμός μεγαλύτερος από 7 Ρίχτερ που γίνεται κάτω από τη θάλασσα ή μακριά από περιοχές με ανθρώπους. Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να υπάρχει κίνδυνος, αλλά δεν έχει γίνει ακόμα καταστροφή. Αυτή είναι η διαφορά μεταξύ μιας πιθανής καταστροφής και μιας που έχει ήδη συμβεί μετά από ένα φυσικό γεγονός. (Μακρόπουλος, 2006).

Οι καταστροφές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διάφορες κατηγορίες, οι οποίες αρχικά αφορούν τα αίτια και τον χρόνο δράσης τους.

Ως προς τον χρόνο δράσης τους, μπορούν να διακριθούν σε:

- αστραπιαίας δράσης ή
- σε δράσεις αργού ρυθμού

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι καταστροφές που δημιουργούνται σε ώρες (πλημμύρες), λεπτά (τυφώνες), ή σε μερικά δευτερόλεπτα (σεισμοί). Στην δεύτερη κατηγορία αντιστοιχούν καταστροφές που για να συμβούν χρειάζονται μήνες (τύποι ηφαιστειακών εκρήξεων), χρόνια (τύποι εδαφικών καθιζήσεων) ή και αιώνες (τύποι διάβρωσης). (Λέκκας, 2000).

Ως προς τα αίτια που προκαλούν με την εμφάνιση τους, διακρίνονται σε επίσης δύο κατηγορίες καταστροφών, οι οποίες είναι (Μακρόπουλος, 2006):

- φυσικές καταστροφές και
- ανθρωπογενείς ή τεχνολογικές καταστροφές

Οι φυσικές καταστροφές είναι αποτέλεσμα της εκδήλωσης φυσικών φαινομένων, ικανών να τις προκαλέσουν. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ο κίνδυνος, άρα το μέγεθος της καταστροφής εξαρτάται από το μέγεθος και την ένταση του φυσικού φαινομένου, από το πόσο ευάλωτο ή τρωτό είναι το σύστημα που θα υποστεί την εκδήλωση του φαινομένου και από την αξία του στοιχείου που εκτίθεται στον κίνδυνο.

Τουλάχιστον σε επίπεδο Ελληνικού αλλά και Ευρωπαϊκού ενδιαφέροντος, τέτοια φυσικά εν δυνάμει επικίνδυνα φαινόμενα, τα οποία αποτελούν και τους φυσικούς κινδύνους (Natural Hazards) σε αντιδιαστολή με τους ανθρωπογενείς κινδύνους (Man-made/Technological Hazards) (Μακρόπουλος, 2006) είναι τα εξής:

1. Πλημμύρες
2. Πυρκαγιές
3. Κατολισθήσεις
4. Ηφαίστεια
5. Κλιματικές Μεταβολές
6. Ακραία Καιρικά Φαινόμενα και
7. Σεισμοί

Η παρούσα εργασία μεταξύ των φυσικών καταστροφών θα εστιάσει σε αυτήν των σεισμών οι οποίοι θα αναλυθούν στην επόμενη ενότητα.

### *1.1.2 ΣΕΙΣΜΟΙ*

Ως σεισμός, ορίζεται το φυσικό φαινόμενο που εκδηλώνεται απότομα, συνήθως χωρίς κάποια σαφή προειδοποίηση, δεν μπορεί να αποτραπεί και είναι αποτέλεσμα των εδαφικών δονήσεων που δημιουργούνται με τις διαταράξεις της μηχανικής ισορροπίας των γήινων πετρωμάτων από φυσικά αίτια που βρίσκονται στο εσωτερικό της γης (Παπαζάχος&Παπαζάχου, 1999).

Το αποτέλεσμα της μακρόχρονης επίδρασης των τεκτονικών δυνάμεων στο εσωτερικό της γης, (κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών) είναι η αργή παραμόρφωση των πετρωμάτων. Αυτά που βρίσκονται κοντά στις περιοχές των πιέσεων, συσσωρεύουν

τεράστια ποσά δυναμικής ενέργειας (ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης πετρωμάτων) και αναπτύσσουν μεγάλες τάσεις που συνεχώς αυξάνουν. Όταν αυξηθούν τόσο ώστε να υπερβούν το όριο αντοχής του λιθοσφαιρικού υλικού, το πέτρωμα κάμπτεται, και δημιουργείται μια διάρρηξη. Αυτή είναι το σεισμικό ρήγμα και κατά την διαδικασία αυτή την δεδομένη χρονική στιγμή γεννιέται ένας σεισμός.

Εκατέρωθεν της διάρρηξης που δημιουργείται, το πέτρωμα πραγματοποιεί μια απότομη κίνηση και αναπηδά προς τα πίσω λόγω ελαστικής επαναφοράς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την απελευθέρωση ενέργειας που χρησιμοποιείται για την μετακίνηση τους στη νέα τους θέση μέχρι να ισορροπήσουν ξανά, δημιουργώντας έτσι και σεισμικά κύματα. Αυτά, διαδίδονται ακτινωτά και προς όλες τις κατευθύνσεις από την εστία του σεισμού (το σημείο δηλαδή διάρρηξης), μεταφέροντας ενέργεια η οποία απελευθερώνεται και προκαλεί ταλαντώσεις και αναταράξεις στο έδαφος (Δρούτσος, 2000).

Ο σεισμός μπορεί να προσδιοριστεί με βάση τρία χαρακτηριστικά:

1. Την εστία (ή υπόκεντρο)
2. Το επίκεντρο και
3. Το εστιακό βάθος

Η ακριβής θέση στην οποία συμβαίνει ένας σεισμός ή το σημείο στο οποίο πραγματοποιείται διάρρηξη των πετρωμάτων, ονομάζεται εστία ή αντίστοιχα υπόκεντρο. Επίκεντρο ονομάζεται η προβολή της εστίας στην επιφάνεια της γης. Το εστιακό βάθος είναι η απόσταση από το υπόκεντρο του σεισμού ως το επίκεντρο του και είναι πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό ενός σεισμού καθώς δίνει στοιχεία ως προς τις καταστροφές που μπορεί να επιφέρει στις ανθρώπινες κατασκευές. Όσο πιο μικρό είναι το εστιακό βάθος τόσο πιο αντιληπτός γίνεται στην επιφάνεια της γης. Αντιθέτως, σε μεγάλο εστιακό βάθος, η ενέργεια του εξασθενεί σημαντικά μέχρι να φτάσει στην επιφάνεια καθώς η απόσταση μεταξύ της εστίας και της επιφάνειας της γης αυξάνεται.

Σεισμοί γεννιούνται μόνο μέσα στην λιθόσφαιρα και οι σεισμικές εστίες φθάνουν περίπου μέχρι 700χλμ βάθος. Το μεγαλύτερο εστιακό βάθος που έχει καταγραφεί είναι 750χλμ και είναι το σημείο όπου ο γήινος φλοιός καταβυθίζεται στον ανώτερο μανδύα.

Ανάλογα με το εστιακό βάθος, οι σεισμοί διακρίνονται σε:

- Μικρού βάθους ή επιφανειακοί
- Ενδιάμεσου βάθους και
- Μεγάλου βάθους

Στους σεισμούς μικρού βάθους, το εστιακό βάθος είναι μικρότερο από 30χλμ, στους ενδιάμεσου βάθους κυμαίνονται μεταξύ 30 και 70χλμ, και στους σεισμούς μεγάλου βάθους, το εστιακό βάθος είναι μεγαλύτερο από 70χλμ. Οι ενδιάμεσου και μεγάλου βάθους σεισμοί χαρακτηρίζονται ως πλουτώνιοι (Γαρυφαλλίδης & Ρουμελιώτης).

### 1.1.3 ΑΙΤΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΣΕΙΣΜΩΝ

Γενικά, η λέξη «σεισμός» περιγράφει κάθε σεισμικό γεγονός, αποτέλεσμα ανθρώπινης δραστηριότητας ή φυσικό φαινόμενο που παράγει σεισμικά κύματα που διαδίδονται στο εσωτερικό της γης(Βασιλείου, 2011).

Οι σεισμοί ανάλογα με τα αίτια δημιουργίας τους κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Τους τεκτονικούς
- Τους ηφαιστειογενείς και
- Τους εγκατακρημνισιγενείς

Τεκτονικοί είναι οι σεισμοί που η εστία τους μπορεί να βρίσκεται σε βάθος 700χλμ από την επιφάνεια της γης και συνήθως έχουν μεγάλο μέγεθος. Είναι η μεγαλύτερη κατηγορία των σεισμικών δονήσεων και είναι οι μεγάλοι σεισμοί που πραγματοποιούνται στον πλανήτη μας. Στην χώρα μας καλύπτουν το 90% των σεισμών και το 90% των σεισμών ολόκληρου του κόσμου.

Οι ηφαιστειογενείς σεισμοί, συνοδεύουν ή προηγούνται των ηφαιστειακών εκρήξεων. Προκαλούνται με την απελευθέρωση των αερίων του μάγματος που τροφοδοτεί τα ηφαίστεια μέσα από τις ρωγμές ή τους πόρους που φτάνουν μέχρι και την επιφάνεια της γης. Πρόκειται για μικρούς σεισμούς που η εστία τους βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τα ηφαίστεια αλλά με το πέρασμα του χρόνου γίνονται συχνότεροι καθώς συνεχώς πλησιάζει προς αυτό με όλο και μικρότερο βάθος. Οι σεισμοί αυτοί καλύπτουν περίπου το 7% του συνόλου των σεισμών που πραγματοποιούνται στον πλανήτη μας και το μέγεθος τους εξαρτάται από την αντίσταση που συναντάει το μάγμα κατά την ανύψωση του προς την επιφάνεια.

Τέλος, οι εγκατακρημνισιγενείς σεισμοί, είναι τοπικοί και καλύπτουν το 3% των σεισμών που πραγματοποιούνται στην γη. Προκαλούνται από την πτώση μεγάλων πετρωμάτων που πέφτουν από τις οροφές διάφορων σπηλαίων πάνω στην γη λόγω βαρύτητας. Πρόκειται για μικρού μεγέθους σεισμούς και διαρκούν τόσο όσο απαιτείται για την πτώση των πετρωμάτων(Λουμάνη, 2017).

### 1.1.4 ΚΛΙΜΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΣΕΙΣΜΩΝ

Για την μέτρηση μιας σεισμικής δόνησης χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων, κυρίως δύο κλίμακες:

1. Κλίμακα Ρίχτερ (Richter) και
2. Κλίμακα Μερκάλι (Mercalli)

Στην κλίμακα Ρίχτερ μετριέται το μέγεθος ενός σεισμού στην εστία του, η ενέργεια δηλαδή που αποδεδμεύεται στον εστιακό χώρο με την σεισμική θραύση και την κίνηση των πετρωμάτων. Δεν έχουν παρατηρηθεί σεισμοί άνω των 9,5 ρίχτερ παρόλο που

η κλίμακα δεν έχει όριο. Είναι λογαριθμική και χρησιμοποιείται και για σεισμούς μικρότερους από 5 Ρίχτερ.

Στην κλίμακα Μερκάλλι μετριέται η ένταση ενός σεισμού σε μια περιοχή στην επιφάνεια του φλοιού της γης. Αντιστοιχεί στο μέγεθος που θα είχε στο επίκεντρο μιας περιοχής, ένας επιφανειακός σεισμός με καταστροφικά αποτελέσματα. Είναι δωδεκαβάθμια εμπειρική κλίμακα και εκτιμάει την ένταση του σεισμού με βάση τις επιπτώσεις του σε υποδομές, κτίρια, κλπ. Αν ένας σεισμός πλήττει μια ακατοίκητη περιοχή, είναι αδύνατο να αξιολογηθεί επαρκώς καθώς η κλίμακα αυτή μετρά κυρίως τις καταστροφές που προκαλούνται σε ανθρώπινες κατασκευές (Λουμάνη, 2017).

Για την καταγραφή των σεισμών χρησιμοποιούνται τέσσερα όργανα:

- Τα σεισμοσκόπια
- Τα σεισμόμετρα
- Τους σειсмоγράφους και
- Τους επιταχυνσιογράφους

Τα σεισμοσκόπια είναι όργανα που σημειώνουν απλά την γένεση των σεισμών ή τους αναγράφουν πάνω σε ακίνητη πλάκα, παρέχοντας έτσι πληροφορίες για την ένταση της σεισμικής κίνησης.

Τα σεισμόμετρα καταγράφουν με πολύ μεγάλη ακρίβεια τις σεισμικές κινήσεις. Σε σύγκριση με τους σειсмоγράφους, τα σεισμόμετρα διαθέτουν συσκευή που επιτυγχάνουν την απόσβεση της αιώρησης του εκκρεμούς με αποτέλεσμα την ακριβέστερη αντιγραφή της σεισμικής κίνησης. Οι καταγραφές των σεισμόμετρων ονομάζονται σειсмоγράμματα. Με τους σειсмоγράφους επιτυγχάνεται η αυτόματη αλλά όχι ακριβής αναγραφή της σεισμικής κίνησης. Το σειсмоγράφημα, δηλαδή η αναγραφή αυτή, γίνεται με φωτεινή κηλίδα πάνω σε φωτογραφική ταινία ή με γραφίδα πάνω σε ταινία. Τέλος, οι επιταχυνσιογράφοι αποτελούν μια ειδική κατηγορία σεισμόμετρων και δίνουν την σεισμική επιτάχυνση σε συνάρτηση με τον χρόνο (Γαρυφαλλίδης & Ρουμελιώτης).

#### 1.1.5 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΕΙΣΜΩΝ

Για να υπάρξει προστασία από τους σεισμούς, σημαντική προϋπόθεση αποτελεί η γνώση των έμμεσων ή άμεσων επιπτώσεων τους. Υπάρχουν τριών ειδών επιπτώσεις, και αυτές αφορούν το φυσικό περιβάλλον, τις τεχνικές κατασκευές και πιο σημαντικό την ανθρώπινη κοινωνία (Αρτινού, 2011).

Όσον αφορά τις μεταβολές στο φυσικό περιβάλλον παρατηρούνται από τους ανθρώπους αρχικά τα μακροσεισμικά αποτελέσματα, χωρίς τη χρήση οργάνων και περιλαμβάνουν περιβαλλοντικές μεταβολές στο έδαφος και στο νερό της θάλασσας και της ξηράς. Οι πιο συχνές μεταβολές στο έδαφος είναι καταρρεύσεις βράχων, εξάρσεις ακτών και ρευστοποιήσεις εδαφών, ρωγμές, και κατολισθήσεις ή καθιζήσεις. Η σημαντικότερη μεταβολή στα θαλάσσια ύδατα είναι το τσουνάμι και συνήθως

δημιουργείται σε υποθαλάσσιες περιοχές στις εστίες σεισμών. Οι μεταβολές στο νερό της ξηράς αφορούν τα υπόγεια και τα επιφανειακά νερά της ξηράς και περιλαμβάνουν την αποξήρανση ή δημιουργία λιμνών, την αλλαγή της κοίτης ποταμών και τέλος αυξομειώσεις στην παροχή πηγών.

Οι επιπτώσεις στις τεχνικές κατασκευές διακρίνονται σε άμεσες και έμμεσες. Οι άμεσες εξαρτώνται από το μέσο διάδοσης των σεισμικών κυμάτων μεταξύ της θέσης της κατασκευής και της σεισμικής εστίας και από τις ιδιότητες της. Εξαρτάται επίσης από την κατάσταση της ίδιας της κατασκευής με αυτό να περιλαμβάνει την ποιότητα των υλικών της, το ύψος αλλά και η ευκαμψία της, και τέλος το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα και την ποιότητα του εδάφους στο οποίο βρίσκεται. Οι έμμεσες βλάβες προκαλούνται από πυρκαγιές που παράγονται κατά τη διάρκεια των σεισμών λόγω βραχυκυκλωμάτων, διαρρήξεων των αγωγών αερίων κ.α.

Η σημαντικότερη επίπτωση στην ανθρώπινη κοινωνία είναι οι απώλειες ζωής και οι τραυματισμοί. Υπάρχουν πιθανότητες εξαιτίας της καταστροφής του δικτύου ύδρευσης να προκληθούν επιδημικές ασθένειες ή επιδεινώσεις των συνθηκών υγιεινής. Κίνδυνος μπορεί να επέλθει και λόγω πυρκαγιών, καταρρεύσεων βράχων ή κτιρίων και άλλων τεχνικών έργων όπως είναι οι γέφυρες, βλάβες ειδικών εγκαταστάσεων κ.α. Σημαντικές είναι επίσης και οι ψυχολογικές επιπτώσεις που προκαλούνται καθώς δημιουργείται ψυχολογική αναστάτωση, νευρική υπερδιέγερση, έντονος φόβος και άγχος. Τέλος, υπάρχουν και οικονομικές συνέπειες που διακρίνονται σε έμμεσες κυρίως λόγω της μακροχρόνιας παραμονής των σεισμοπλήκτων εκτός της παραγωγικής διαδικασίας αλλά και εξαιτίας της αποδιοργάνωσης του κοινωνικού ιστού και σε άμεσες που αφορούν ολοσχερείς καταστροφές ή βλάβες των τεχνικών υποδομών και κατασκευών (Αρτινού, 2011).

#### *1.1.6 ΣΕΙΣΜΟΙ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΚΡΑΤΕΙΑ*

Η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από τις μεγαλύτερες σε υψηλή σεισμικότητα χώρα σε παγκόσμια κλίμακα, καθώς βρίσκεται σ' ένα πολύ ενεργό γεωλογικό τμήμα της Λιθόσφαιρας (Θανάση, 2020). Ως τώρα διαθέτει 157 διαγνωσμένα ενεργά σεισμικά ρήγματα. Ο ελληνικός χώρος κατέχει την πρώτη θέση στη Μεσόγειο από άποψη σεισμικότητας και την έκτη θέση σε παγκόσμιο επίπεδο, μετά από χώρες με μεγάλη σεισμικότητα, όπως η Ιαπωνία, το Περού, τα νησιά Σολομώντος και η Χιλή (Κασκαρά, 2015).

Τα κύρια χαρακτηριστικά της τεκτονικής του Ελλαδικού τόξου, που περιλαμβάνει τα νησιά Κρήτη, Κάρπαθο, Ρόδο και Κύθηρα είναι:

- η Ελληνική τάφρος
- το Ελληνικό νησιωτικό ιζηματογενές τόξο
- η οπισθοτάφρος και
- το ηφαιστειακό τόξο

Η Ελληνική τάφρος δημιουργείται στην επαφή των δύο πλακών και αποτελείται από μια σειρά από θαλάσσιες λεκάνες που έχουν βάθος 2000-5000m από τη Ρόδο μέχρι την Κεφαλονιά (Κασκαρά, 2015).

«Οι γεωλογικές ιδιαιτερότητες της Ελλάδας οφείλονται στην μετωπική της θέση στο πιο δραστήριο γεωλογικά τμήμα του ενεργού νότιου ηπειρωτικού περιθωρίου της ευρωπαϊκής πλάκας, κάτω από το οποίο υπό βυθίζονται τα αρχαιότερα υπολείμματα ωκεάνιας λιθόσφαιρας της αφρικανικής πλάκας που κινείται προς τον βορρά. Το ελληνικό τμήμα της ενεργής αυτής δομής ονομάζεται ελληνικό ορογενετικό τόξο. Η γεωμετρία του ελληνικού τόξου χαρακτηρίζεται από μια διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ στα Ιόνια νησιά και τη δυτική Ελλάδα-Πελοπόννησο, που κάμπτεται σε Α-Δ από τα Κύθηρα στην Κρήτη και στην συνέχεια γίνεται ΝΔ-ΒΑ στα Δωδεκάνησα. Συνεπώς το ελληνικό τόξο αποτελεί έναν κρίσιμο μεταβατικό κρίκο στον εξελικτικό κύκλο των ωκεανών, δηλαδή τη μετάβαση από την συμπίεση στην σύγκρουση των ηπείρων και την εξαφάνιση του ωκεανού» (Θανάσης, 2020).

Η ιστορία της Ελλάδας είναι συνδεδεμένη με σεισμούς καθώς ιστορικά έχουν καταγραφεί καταστροφικοί σεισμοί ήδη από την αρχαιότητα, όπως ο σεισμός της Ρόδου το 226 π.Χ. προκαλώντας την κατάρρευση του Κολοσσού, ενός από τα Επτά Θαύματα του Αρχαίου Κόσμου. Στη σύγχρονη εποχή, ισχυροί σεισμοί ήταν εκείνοι της Αθήνας το 1999, του Ιονίου το 1953 και της Σάμου το 2020 επιβεβαιώνοντας τη συνεχή σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή (Parazachos&Parazachou, 2003).

Οι περισσότεροι σεισμοί εντοπίζονται στα Επτάνησα, τη Νότια Κρήτη, στη Δυτική Ελλάδα, το Ανατολικό Αιγαίο και τα Δωδεκάνησα. Στην Ελλάδα το σύνολο ξεπερνά τους 5.000 σεισμούς, εκ των οποίων 100 περίπου γίνονται αντιληπτοί από τον άνθρωπο (Makropoulosetal., 2012).

Επιστημονικά Ινστιτούτα όπως το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης και το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών παρακολουθούν συνεχώς τη σεισμική δραστηριότητα συμβάλλοντας έτσι στην γρήγορη και έγκυρη πληροφόρηση καθώς και στην πρόβλεψη για την αντιμετώπιση τους. (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 2024)

## 1.2 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Η επιστήμη της Γεωγραφικής Πληροφορίας (GeographicInformationScience – GIScience) ασχολείται με την συστηματοποίηση της κατανομής και αναπαράστασης του γεωγραφικού χώρου, με την συλλογή, την επεξεργασία, την ανάλυση, την διαχείριση και την παρουσίαση των στοιχείων που ονομάζονται γεωχωρικά δεδομένα (geospatialdata) (Κάβουρας κ.α. 2016).



Η χρήση εξελιγμένων υπολογιστικών συστημάτων και της πληροφορικής, στη συλλογή ανάλυση και διαχείριση των χωρικών δεδομένων, οδήγησε σε μια καινούργια επιστημονική περιοχή που ονομάζεται “Γεωπληροφορική” και είναι η επιστήμη που σε συνδυασμό με θεωρίες και μεθόδους σε παρόμοιους τομείς, χρησιμοποιεί τεχνολογίες και τεχνικές πληροφορικής, στοχεύοντας στην επίλυση προβλημάτων συλλογής, διαχείρισης, επεξεργασίας, ανάλυσης και χαρτογράφησης ψηφιακών χωρικών δεδομένων (Ατζαράκη, 2019).

Για την περιγραφή της διαδικασίας λήψης πληροφοριών για μια περιοχή, ένα αντικείμενο ή ένα φαινόμενο, γίνεται εφαρμογή της τηλεπισκόπησης (τηλεανίχνευσης), με την χρήση συσκευών ανίχνευσης που δεν βρίσκονται σε επαφή με το αντικείμενο παρατήρησης. Ουσιαστικά, είναι η άντληση πληροφοριών για μια γήινη επιφάνεια με την μέτρηση και αποτύπωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από απόσταση, που εκπέμπεται ή ανακλάται από την επιφάνεια της ατμόσφαιρας και την επιφάνεια της γης.

Γενικά ο όρος τηλεπισκόπηση περιλαμβάνει την ανθρώπινη όραση, τις ακτίνες X για εφαρμογές στην επιστήμη της ιατρικής, τις αεροφωτογραφίες, τις συμβατικές φωτογραφίες, την λήψη εικόνων με Radar, τις δορυφορικές εικόνες, κ.α. Ειδικότερα η δορυφορική τηλεπισκόπηση (satelliteremotesensing) ασχολείται με την καταγραφή δεδομένων από ανιχνευτές δορυφόρων που καταγράφουν και ανιχνεύουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανακλάται ή εκπέμπεται σε διάφορες φασματικές περιοχές από κάποια επιφάνεια. Οι δορυφορικοί αισθητήρες καταγράφουν ακτινοβολία διαμορφωμένη από την αλληλεπίδραση της με την επιφάνεια και την ατμόσφαιρα της γης, μεταφέροντας έτσι πληροφορίες για τις φυσικοχημικές ιδιότητες τους (Περάκης κ.α, 2015).

#### *1.2.1 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ*

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χωρίζεται σε περιοχές με βάση το μήκος κύματος και με βάση τη θέση του στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (Κανακάκη, 2012).

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (Electromagnetic radiation – EMR) μετριέται σε joules και είναι η ποσότητα ενέργειας με την ικανότητα να παράγει έργο. Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια εκφράζεται ως ηλεκτρική, μηχανική, χημική και θερμική. Η μετάδοση της γίνεται με τρεις τρόπους: ακτινοβολία, επαφή και μεταφορά, αλλά μόνο η ακτινοβολία μπορεί να μεταδώσει ενέργεια από ένα σώμα σ’ ένα άλλο χωρίς να χρειαστεί η παρέμβαση ενός ενδιάμεσου φορέα (Κανακάκη, 2012).

Η τηλεπισκόπηση, με κατάλληλο αισθητήριο όργανο εκμεταλλεύεται την μέθοδο της μεταφοράς ενέργειας με ακτινοβολία, η οποία γίνεται από ένα σώμα προς τον δέκτη που λαμβάνει το σήμα. Οι δορυφορικοί αισθητήρες καταγράφουν ή την ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα σώματα στη γη ή την ανακλώμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από τη γήινη επιφάνεια. Στην τηλεπισκόπηση, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία καθορίζεται ποσοτικά από:

- την ένταση (I)
- το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) ή
- τη συχνότητα ( $\nu$ ) του ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Όλο το εύρος της ηλεκτρικής ακτινοβολίας αποτελεί το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (EMS – Electromagnetic Spectrum), το οποίο διαχωρίζεται σε φασματικά κανάλια (spectral bands), που με τη σειρά τους συγκροτούνται από ομάδες συνεχών φασματικών γραμμών, τα οποία είναι:

- το υπεριώδες (Ultraviolet, UV) (3nm έως 0,4  $\mu\text{m}$ )
- το ορατό (Visible) (0.38 $\mu\text{m}$  έως 0.72 $\mu\text{m}$ )
- το υπέρυθρο (Infrared, IR) και
- το μικροκυματικό (Microwave) (1mm έως 1m)

Η υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος περιλαμβάνει μήκη κύματος μεγαλύτερα από του ορατού και εκτείνεται από 0.7 $\mu\text{m}$  έως 1000 $\mu\text{m}$  (εγγύς, μέσο, απώτερο υπέρυθρο).

### 1.2.2 ΕΙΔΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ

Υπάρχουν δύο ειδών δορυφόροι, ως προς τις τροχιές τους. Αρχικά είναι οι γεωστατικοί δορυφόροι με περίοδο τροχιάς 24 ώρες και ακολουθούν τους παραλλήλους προς τον ισημερινό. Ένα ελάττωμα που συναντάται είναι πως φαίνονται ακίνητοι από την επιφάνεια της γης και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μικρή διακριτική τους ικανότητα. Από την άλλη, δυο πλεονεκτήματα τους είναι πως έχουν μεγάλη επιφάνεια κάλυψης και παρατηρούν συνεχώς την ίδια περιοχή της επιφάνειας της γης.

Επιπλέον είναι ηλιοσύγχρονοι, Εφόσον η γη δεν είναι σφαιρική δημιουργεί ως προς τον άξονα περιστροφής της μια μετάπτωση στο επίπεδο της τροχιάς του δορυφόρου, και κατά μια ορισμένη γωνία κλίσης. Καθώς κατά την διάρκεια της ημέρας και των διαφόρων εποχών του χρόνου ο ήλιος φωτίζει τα ίδια αντικείμενα αλλά σε διαφορετική γωνία, ο δορυφόρος είναι τοποθετημένος έτσι, ώστε οι συνθήκες φωτισμού να μην εξαρτώνται από τη θέση του ήλιου και να είναι οι ίδιες. Σε αυτού του είδους τους δορυφόρους η κάλυψη της επιφάνειας της γης είναι σχεδόν καθολική με σχεδόν πολική τροχιά (Περάκης, 2015).

Οι παθητικοί αισθητήρες ενώ καταγράφουν και ανιχνεύουν σε υπέρυθρα και ορατά μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος την ανακλώμενη ηλιακή και θερμική ακτινοβολία, δεν εκπέμπουν οι ίδιοι ακτινοβολία. Οι περισσότεροι δορυφόροι όπως οι Sentinel 2 και Landsat είναι εφοδιασμένοι με έναν πολυφασματικό σαρωτή που καταγράφει την ίδια χρονική στιγμή το προερχόμενο ηλεκτρομαγνητικό σήμα από την ίδια περιοχή της γήινης επιφάνειας σε διάφορα μήκη κύματος. Έτσι παρέχει διαφορετικά φασματικά κανάλια μιας πολυφασματικής δορυφορικής εικόνας. Οι δορυφόροι αυτοί καταγράφουν στο εγγύς και θερμικό υπέρυθρο, στο ορατό. Επίσης υπάρχουν

χαρτογραφικοί δορυφόροι (Sentinel 1) που καταγράφουν και σε τμήματα της περιοχής των μικροκυμάτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Οι ενεργητικοί αισθητήρες εκπέμπουν δική τους ακτινοβολία και το σήμα αυτό διαθλάται, διαχέεται ή ανακλάται στην γήινη ατμόσφαιρα/επιφάνεια, έχοντας έτσι την δυνατότητα να το καταγράφουν στην επιστροφή του. Λειτουργούν ημέρα και νύχτα καθώς δεν εξαρτώνται από συνθήκες φωτισμού του ήλιου αλλά ούτε από καιρικές συνθήκες γιατί μπορούν να διαπεράσουν την σχετικά χαμηλή βροχή, το χιόνι και τα σύννεφα. Μπορούν να εκτιμήσουν την υγρασία του επιφανειακού στρώματος του εδάφους, διαπερνούν το έδαφος και την βλάστηση μέχρι περίπου ένα μέτρο και χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές όπως η ωκεανογραφία, η υδρολογία, η γεωλογία, η καταγραφή και μελέτη των πάγων στην γήινη επιφάνεια, η γεωργία και η δασολογία.

Το ραντάρ (RADAR – RadioDetection and Ranging) αποτελεί μια ενεργή απομακρυσμένη μέθοδο παρατήρησης, η οποία βασίζεται στην εκπομπή και λήψη μικροκυματικής ακτινοβολίας. Μέσω της ανάλυσης της ανακλώμενης ακτινοβολίας από την επιφάνεια της Γης ή άλλους στόχους, δημιουργούνται εικόνες ραντάρ, ανεξάρτητες από καιρικές συνθήκες και φωτισμό. Οι εικόνες αυτές παρέχουν πληροφορίες για τη μορφολογία και τις μεταβολές της επιφάνειας, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για γεωχωρική παρακολούθηση, όπως η ανίχνευση μικρομετακινήσεων μέσω της μεθόδου της συμβολομετρίας (Παρασκευάς, 2022). Το κυριότερο ελάττωμα των ραντάρ είναι ότι λόγω παρεμβολών επέρχεται η αλλοίωση του σήματος καταγραφής εξαιτίας και της χαμηλής εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Οι πιο γνωστοί ενεργειακοί αισθητήρες είναι τα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (SyntheticApertureRadar/SAR) τα οποία μπορεί να είναι απεικονιστικά ραντάρ (imagingradars), σκεδασίμετρα (scatterometers) και ραντάρ μετρήσεων των υψομετρικών διαφορών (altimeters)(Περάκης, 2015).

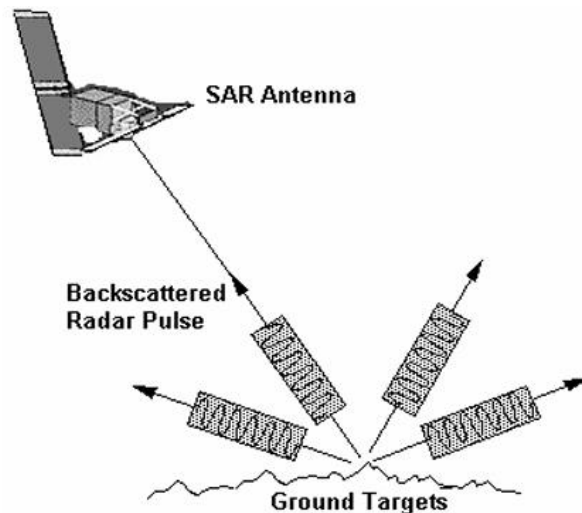
Στην συνέχεια θα γίνει μια περιγραφή των ενεργητικών συστημάτων καταγραφής SAR καθώς με την χρήση δεδομένων τους θα ανιχνευθούν οι μικρομετατοπίσεις των περιοχών μελέτης της παρούσας εργασίας.

### *1.2.3 PANTAP ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ (SAR)*

Μια από τις σημαντικότερες τεχνολογίες της δορυφορικής τηλεπισκόπησης είναι το σύστημα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος κεραίας που εκμεταλλεύεται τις αρχές απεικόνισης με ραντάρ και προσφέρει έναν ξεχωριστό τρόπο μελέτης και παρατήρησης της γήινης επιφάνειας και των επιμέρους φαινομένων. Η ονομασία δόθηκε λόγω της ικανότητας του συστήματος, να συνθέτει χρησιμοποιώντας την κίνηση του δορυφόρου σε συνδυασμό με το φαινόμενο Doppler, μια μεγάλη εικονική κεραία(Λέτσιος, 2023).

Το SAR (syntheticaperture radar), είναι ένα οπτικό σύστημα που βασίζεται στην ακτινοβολία μικροκυμάτων. Τα δεδομένα ραντάρ στηρίζονται στην συνοχή (coherent), μεταξύ τους, καθώς σε ένα τέτοιο σύστημα, η αλλαγή του χρόνου επιστροφής της ακτινοβολίας από τον στόχο στον δέκτη μετριέται με την ακρίβεια ενός κλάσματος του

μήκους κύματος. Αποτελεί ένα ενεργό σύστημα που λειτουργεί και καταγράφει ανεξάρτητα από την ηλιακή ενέργεια, το αν είναι μέρα ή νύχτα και τις καιρικές συνθήκες. Ένα σύστημα SAR λειτουργεί στις φασματικές ζώνες των ραδιοφωνικών και των μικροκυμάτων ανιχνεύοντας την ακτινοβολούμενη ή ανακλώμενη ενέργεια από το έδαφος. Ο δορυφόρος είναι εξοπλισμένος με ένα πομποδέκτη ραντάρ που εκπέμπει παλμούς ηλεκτρομαγνητικής μικροκυματικής ακτινοβολίας μικρής διάρκειας και καταγράφει τις επιστροφές τους από τους στόχους της επιφάνειας (εικόνα 1) (Λέτσιος, 2017).



Εικόνα 1: Απεικόνιση λειτουργίας ενός συστήματος SAR (google)

Ανάλογα το μήκος κύματος η ηλεκτρομαγνητική μικροκυματική ακτινοβολία μπορεί να διεισδύει στο έδαφος και την βλάστηση καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο πιο ισχυρή είναι και η διείσδυση της ακτινοβολίας. Ο δορυφόρος Sentinel 1 διαθέτει αισθητήρα συνθετικού ανοίγματος με συχνότητα εκπομπής 5.405GHz. Κάθε συχνότητα ( $\nu$ ) της ακτινοβολίας σε GHz, μπορεί να μετατραπεί σε μήκος κύματος  $\lambda$  (cm). Τα βασικότερα μήκη κύματος που χρησιμοποιούν οι δορυφόροι ραντάρ είναι.

1. P-band ~ 65 cm
2. L-band ~ 23 cm
3. S-band ~ 10cm
4. C-band Sentinel ~ 5 cm
5. X-band ~ 3 cm
6. K-band ~ 1.2 cm

Η πόλωση της ακτινοβολίας είναι επίσης πολύ σημαντική καθώς με αυτήν γίνεται αναφορά στον προσανατολισμό της ακτινοβολίας στο ηλεκτρικό πεδίο. Αυτή όπως και ο προσανατολισμός μπορούν να είναι οριζόντιοι ή κάθετοι.

Τα ραντάρ έχουν σχεδιαστεί για να μεταδίδουν την ακτινοβολία είτε σε κάθετη πόλωση (V) είτε σε οριζόντια (H) και αντίστοιχα η λήψη της ανακλώμενης ή

ακτινοβολούμενης ενέργειας από την επιφάνεια της γης προς τον δορυφόρο γίνεται είτε οριζόντια (V) είτε κάθετα (H). Κάποια ραντάρ επειδή μπορούν να λάβουν και τις δύο πολώσεις είναι πιθανό να δημιουργήσουν 4 συνδυασμούς πόλωσης της ακτινοβολίας.

1. HV - Για οριζόντια μετάδοση και κάθετη λήψη της ακτινοβολίας
2. VH - Για κάθετη μετάδοση και οριζόντια λήψη της ακτινοβολίας
3. HH - Για οριζόντια μετάδοση και λήψη της ακτινοβολίας
4. VV - Για κάθετη μετάδοση και λήψη της ακτινοβολίας

Για το πλήθος των πολώσεων που μπορεί να λάβει, η πόλωση της ληφθείσας και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας αλλά και η δυνατότητα του κάθε ραντάρ παίζουν σημαντικό ρόλο και επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο καταγράφει ένα σύστημα ραντάρ την επιφάνεια (Λέτσιος, 2017).

Οι εικόνες ραντάρ αντιπροσωπεύουν την ανακλώμενη ακτινοβολία από τους στόχους στην επιφάνεια της γης. Οι περιοχές ή οι στόχοι που ανακλούν περισσότερη ακτινοβολία, εμφανίζονται πιο φωτεινοί σε σύγκριση με αυτούς που ανακλούν λιγότερη. Η ανάκλαση της ακτινοβολίας μπορεί να επηρεαστεί από την διηλεκτρική ιδιότητα του στόχου, την περιεκτικότητα σε υγρασία, την τοπογραφία, την γωνία πρόσπτωσης, το μήκος κύματος και την πόλωση. Καθώς για παράδειγμα αποτυπώνεται στο ραντάρ η κορυφή ενός βουνού δημιουργείτε μία σκίαση ανάγλυφου και αυτό συμβαίνει σε συνδυασμό και με την τροχιά του δορυφόρου λόγω της τοπογραφίας. Στην περίπτωση καταγραφής κτηρίων ενός αστικού χώρου παρατηρείται το φαινόμενο «doublebounce» και οφείλεται στο γεγονός πως τα κτήρια ή οι δρόμοι σε μία πόλη στοιβάζονται με τρόπο κατά τον οποίο η ακτινοβολία έχει την δυνατότητα να προσπίπτει σε ένα κτίριο και να μεταπηδάει σε ένα άλλο χαμηλότερο ή ψηλότερο επιστρέφοντας ύστερα στον δέκτη.

Κτήρια ή μεταλλικά αντικείμενα όπως είναι τα πλοία ανακλούν περισσότερη ενέργεια λόγω της διηλεκτρικής σταθεράς των υλικών με αποτέλεσμα να εμφανίζονται πιο φωτεινά σε μία εικόνα ραντάρ. Η υγρασία του εδάφους μπορεί επίσης να αυξήσει την ανάκλαση ακτινοβολίας συγκριτικά με μια περιοχή υπό ξηρές συνθήκες. Αξίζει να σημειωθεί όμως πως ενώ η υγρασία του εδάφους θα αυξήσει την ανάκλαση της ακτινοβολίας, δεν συμβαίνει το ίδιο και στα υδάτινα σώματα καθώς βάση τοπογραφίας αυτά αποτελούν μία επίπεδη επιφάνεια άρα και μικρή ανάκλαση ακτινοβολίας στον δέκτη του δορυφόρου. Το αποτέλεσμα θα είναι το υδάτινο σώμα σε σχέση με άλλες επιφάνειες που ανακλούν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας, να εμφανίζεται σκούρο σε μία εικόνα ραντάρ (Λέτσιος, 2017).

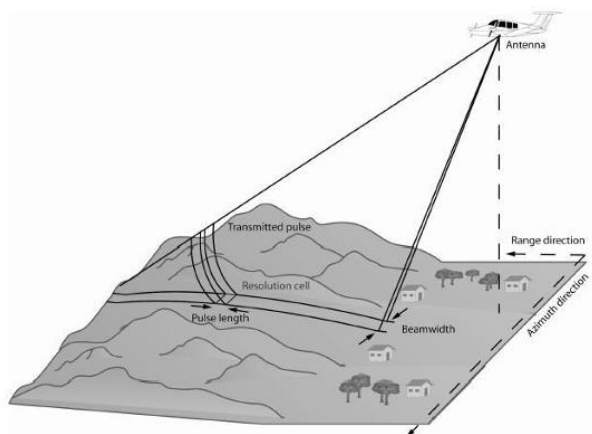
Οι εικόνες ραντάρ αποτελούνται από «pixels», δηλαδή εικονοστοιχεία, που περιέχουν πληροφορία. Όταν υπάρχουν πολλά αντικείμενα που ανακλούν ακτινοβολία, δημιουργούνται «speckles» δηλαδή στίγματα τα οποία αλλοιώνουν την ποιότητα της εικόνας ραντάρ και ενδέχεται να επηρεάσουν την χρησιμότητά τους. Τα στίγματα σε μια εικόνα ραντάρ κατατάσσονται στους θορύβους και μειώνονται στο φιλτράρισμα όταν γίνεται η επεξεργασία της εικόνας ή με την μέθοδο «multilooking» στην οποία όμως

συνεπάγεται και μείωση της χωρικής ανάλυσης της εικόνας. Κοινό φαινόμενο στις εικόνες ραντάρ είναι ασπρόμαυρα στίγματα που απαρτίζουν την εικόνα και ονομάζονται «salt and pepper».

Η χωρική ανάλυση και η γεωμετρική απεικόνιση ενός συστήματος ραντάρ διαφέρει από τα γνωστά οπτικά συστήματα καθώς το ραντάρ αποτυπώνει την επιφάνεια σε λωρίδες (swath), και η ανάλυση της εικόνας, ερμηνεύεται ως

- ανάλυση στο αζιμούθιο (azimuth) και
- ανάλυση στο εύρος (range)

Ο δέκτης εκπέμπει παλμούς ηλεκτρομαγνητικής μικροκυματικής ακτινοβολίας ταξιδεύοντας με βάση την πορεία πτήσης. Στην νοητή λωρίδα καταγραφής της επιφάνειας που σχηματίζεται, η αποτύπωση γίνεται στην διάσταση που είναι μόνιμα παράλληλη στην πτήση (azimuthdirection) και με βάση την διάσταση που είναι μόνιμα κάθετη στην πτήση (rangedirection). Ο συγκεκριμένος μηχανισμός αποτελεί χαρακτηριστικό ενός συστήματος ραντάρ (CanadaCenter for RemoteSensing) (εικόνα 2) (Λέτσιος, 2017).



Εικόνα 2: Απεικόνιση αποτύπωσης και χωρικής ανάλυσης ενός συστήματος ραντάρ (google)

#### 1.2.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COPERNICUS ΚΑΙ SENTINEL 1

Το πρόγραμμα Copernicus είναι το ευρωπαϊκό πρόγραμμα γεωμορφολογίας και γεωσκόπησης που διαχειρίζεται η Ευρωπαϊκή Επιτροπή σε συνεργασία με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (ΕΟΠ), τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) και άλλους φορείς. Υποστηρίζει εφαρμογές σε διάφορους τομείς. Κάποιες από αυτές αφορούν, την υγεία, την περιβαλλοντική παρακολούθηση, παραδείγματος χάριν των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, της μετεωρολογίας, της γεωργίας, τα ύδατα, την κλιματική αλλαγή και το περιβάλλον, παρέχει δείκτες σχετικά με τους παράγοντες της κλιματικής αλλαγής και το λιώσιμο των παγετώνων, την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, την ενέργεια, τους φυσικούς πόρους, την δασοπονία, κλπ. (Παπαδόπουλος, 2023).



Συνδυάζει και συλλέγει δεδομένα από ένα σύνολο συστημάτων πηγών στο διάστημα με τη βοήθεια δορυφόρων παρατήρησης του εδάφους, του αέρα και της θάλασσας, μέσω επιτόπιων, θαλάσσιων και εναέριων αισθητήρων. Τα δεδομένα συλλέγονται, υποβάλλονται σε επεξεργασία και παρέχονται ελεύθερα και ανοικτά σε πρόσβαση σε όλους τους χρήστες ως ένα σύνολο με αξιόπιστες και σχεδόν σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες.

Από την έναρξη λειτουργίας του Copernicus το 2014, με τον πρώτο δορυφόρο να είναι ο Sentinel-1 το πρόγραμμα έγινε ευρέως γνωστό. Τα δεδομένα που συλλέγει, επεξεργάζεται και παρέχει χωρίζονται και αξιοποιούνται από διάφορες υπηρεσίες. Το διαστημικό τμήμα του Copernicus περιλαμβάνει τους δορυφόρους γεωσκόπησης Sentinel-1, 2, 3 και 6 καθώς και τους Sentinel-4 και 5 που είναι μετεωρολογικοί δορυφόροι (Παπαδόπουλος, 2023).

Ο Sentinel-1, αποτελεί τον πρώτο δορυφόρο της αποστολής Sentinel του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA) και συγκροτούσε δύο δορυφόρους τον Sentinel-1A και τον Sentinel-1B. (Λέτσιοις, 2017). Οι δύο δορυφόροι έχουν το ίδιο τροχιακό επίπεδο καθώς καθένας πραγματοποιεί έναν επαναλαμβανόμενο κύκλο κάθε 12 ημέρες που αποτελείται από 175 τροχιές. Παρέχουν εικόνες ίδιου τόπου και ίδιας τροχιάς κάθε 6 ημέρες και βρίσκονται στον ισημερινό πάνω από τον ίδιο τόπο κάθε 3 ημέρες (Μπαλλάς, 2019).

Ο δορυφόρος Sentinel-1B, μέλος της αποστολής Sentinel-1 του προγράμματος Copernicus της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της ESA, τέθηκε εκτός λειτουργίας οριστικά τον Δεκέμβριο του 2021, ύστερα από τεχνική βλάβη στο σύστημα ισχύος του ραντάρ του. Η ESA ανακοίνωσε την οριστική απώλειά του το 2022, μετά από ανεπιτυχείς προσπάθειες αποκατάστασης. Για να διασφαλιστεί η συνέχεια των δεδομένων ραντάρ, η ESA εκτόξευσε τον Sentinel-1C στις 5 Δεκεμβρίου 2024 (με πύραυλο Vega-C). Ο νέος δορυφόρος λειτουργεί πλέον ως αντικαταστάτης του Sentinel-1B, παρέχοντας κρίσιμα δεδομένα για παρακολούθηση γεωλογικών φαινομένων, χαρτογράφηση πλημμυρών και θαλάσσια επιτήρηση (εικόνα 3) (ESA. 2024).



*Εικόνα 3: Sentinel-1C*

Πιο συγκεκριμένα ο Sentinel 1, προσφέρει μία πληθώρα εφαρμογών καλύπτοντας ένα πολύ μεγάλο ερευνητικό πεδίο όπως αυτό του φυσικού περιβάλλοντος, αλλά και του αστικού χώρου. Παραδείγματα είναι η βιώσιμη διαχείριση και ταξινόμηση τυπολογίας των δασών, η παρακολούθηση κατάστασης καλλιεργειών στον αγροτικό χώρο, η χαρτογράφηση καταστροφών από πυρκαγιές, η ταξινόμηση τύπου καλλιεργειών, η παρακολούθηση των εδαφών, των πλημμυρών και των επιφανειακών εδαφικών παραμορφώσεων, η ανάλυση σεισμών, η δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους κλπ. (Λέτσιος, 2017).

Το σύστημα SAR των δορυφόρων της αποστολής Sentinel-1 έχει την δυνατότητα απόκτησης δεδομένων με τέσσερις διαφορετικές λειτουργίες:

Πίνακας 1 Λειτουργίες Λήψης του Sentinel-1 και οι Χρήσεις τους

| Λειτουργία                      | Κύρια Χρήση                                            |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Interferometric Wide Swath (IW) | Παρακολούθηση ξηράς, InSAR                             |
| Extra Wide Swath (EW)           | Παράκτια ζώνη, μεγάλα γεγονότα (πλημμύρες)             |
| StripMap Mode (SM)              | Εξειδικευμένες χρήσεις (χαρτογράφηση ρηγμάτων, κτίρια) |
| Wave Mode (WV)                  | Μελέτη κυματισμού ωκεανών                              |

### 1.3 ΕΙΚΟΝΕΣ PANTAR ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΣΕΙΣΜΩΝ

Η τηλεπισκόπηση χρησιμοποιείται για την έρευνα των σεισμών με την πρώτη εμφάνιση των δορυφορικών εικόνων δηλαδή από τη δεκαετία του '70. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε στη γεωμορφολογική έρευνα και δομική γεωλογία καθώς δομές και ενεργά ρήγματα χαρτογραφήθηκαν με βάση δορυφορικές εικόνες.

Η εφαρμογή της τηλεπισκόπησης για την έρευνα των σεισμών δείχνει φαινόμενα όπως την επιφανειακή υγρασία και θερμοκρασία, την περιεκτικότητα σε αέρια και αερολύματα, την παραμόρφωση της γήινης επιφάνειας, τη θερμοκρασία και την υγρασία της ατμόσφαιρας. Επιπλέον μετά την κρούση γίνεται καταγραφή τόσο της οριζόντιας όσο και κατακόρυφης παραμόρφωσης σε κλίμακα από δεκάδες εκατοστά έως μέτρα. Οι παραμορφώσεις αυτές καταγράφονται με την τεχνική του συμβολομετρικού ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (InSAR). Αναπτύσσονται επίσης μέθοδοι πρόβλεψης σεισμών με την χρήση ερευνών θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας (TIR) και παρατηρούνται ενδείξεις του εδάφους για αλλαγές στην περιεκτικότητα σε αέρια και αερολύματα πριν από σεισμούς.



Μία από τις κύριες εφαρμογές της τηλεπισκόπησης στη σεισμολογία είναι η χαρτογράφηση των παραμορφώσεων. Οι επιφανειακές παραμορφώσεις στους σεισμικούς κύκλους μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

1. προσεισμικές ή μεσοσεισμικές
2. συνσεισμικές και
3. μετασεισμικές

Οι προ-σεισμικές κινήσεις ανέρχονται σε εκατοστά σε αντίθεση με τις συνσεισμικές που ανέρχονται μέχρι μέτρα και δεκάδες μέτρα. Οι μετασεισμικές παραμορφώσεις μετριοούνται επίσης σε εκατοστά, αλλά οι κατολισθήσεις που ακολουθούν μπορούν να τις αυξήσουν σε μέτρα (Tronin, 2009).

Η πρώτη εφαρμογή δορυφορικών εικόνων στη σεισμολογία σχετίζεται με τη δομική γεωλογία και γεωμορφολογία με ερευνητικούς στόχους να είναι τα ενεργά ρήγματα και η νεοτεκτονική. Σύγχρονα οπτικά δορυφορικά συστήματα χαρτογραφούν παραμορφώσεις μετασεισμικές (κατολισθήσεις) και συνσεισμικές.

Η τεχνική InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar ή αλλιώς Ραντάρ συμβολομετρικού συνθετικού διαφράγματος) χρησιμοποιείται για την εξέταση χαρακτηριστικών μικρής κλίμακας στο πεδίο παραμόρφωσης που σχετίζονται με τους σεισμούς και βασίζεται σε πολυχρονικές παρατηρήσεις ραντάρ. Είναι μια μέθοδος κατά την οποία χρησιμοποιούνται οι διαφορές φάσης δύο ή περισσότερων εικόνων SAR για τον υπολογισμό της διαφοράς απόστασης δύο κεραιών SAR. Υπάρχει δυνατότητα μέτρησης σε εύρος εκατοστών και χιλιοστών να μετρηθούν μετατοπίσεις στην επιφάνεια της Γης. Τα αποτελέσματα της τεχνικής αυτής δείχνουν σημαντικές παραμορφώσεις που σχετίζονται με ρήγματα και καθιζήσεις. Με σαφήνεια επίσης δείχνει την επιφανειακή παραμόρφωση και το συμβολογράφημα (Λέτσιος, 2017).

Αναλυτικότερα, η εξαγωγή της πληροφορίας της διαφοράς της φάσης ανάμεσα στις δύο εικόνες πραγματοποιείται από ένα σύστημα ραντάρ (SAR) καθώς έχει την δυνατότητα να παρατηρεί την ίδια περιοχή από ελαφρώς διαφορετική οπτική γωνία.

Η συμβολομετρία (interferometric SAR ή InSAR) είναι μια τεχνική χρησιμοποιούμενη σε δορυφορική και αεροδυναμική τοπογραφία, όπου δύο ή περισσότερα ραντάρ (SAR) καταγράφουν την ίδια περιοχή με χρονική διαφορά· στη συνέχεια, τα σήματα συνδυάζονται για την ανίχνευση μικροσκοπικών μετατοπίσεων του εδάφους. Αυτό επιτυγχάνεται αναλύοντας τις διαφορές φάσης μεταξύ των εικόνων, επιτρέποντας την παρακολούθηση της καθίζησης, μετατόπισης ή παραμόρφωσης της επιφάνειας σε κλίμακα χιλιοστών έως εκατοστών (Παρασκευάς, 2022). Η συμβολομετρία απαιτεί το λιγότερο δύο διαφορετικές εικόνες ραντάρ με την συγχώνευση των pixel της μίας με της άλλης και με αυτόν τον τρόπο η μέθοδος της συμβολομετρίας φανερώνει την πληροφορία της διαφοράς φάσης μεταξύ των δύο εικόνων ραντάρ.

Το βασικό προϊόν της ανάλυσης την συμβολομετρία είναι η δημιουργία συμβολογραφήματος (interferogram) που αναπαριστά τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο εικόνων. Οι ζώνες ίσης φάσης (φασικές γραμμές ή fringes) υποδηλώνουν μετακινήσεις κατά μήκος της γραμμής όρασης του δορυφόρου. Η επεξεργασία και η κατανόηση των συμβολογραφημάτων απαιτεί τεχνικές όπως το ξετύλιγμα φάσης (phase unwrapping), την αφαίρεση της τοπογραφικής συνιστώσας, την εξαγωγή μετατοπίσεων έπειτα από φιλτράρισμα και γεωμετρική διόρθωση (Hanssen, 2001).

Η εφαρμογή των εδαφικών παραμορφώσεων αποτελεί συνέχεια της βασικής συμβολομετρίας καθώς γίνεται αφαίρεση της τοπογραφίας από ένα συμβολογράφημα με σκοπό την εξαγωγή της πληροφορίας των παραμορφώσεων. Αυτό ονομάζεται διαφορική συμβολομετρία, και συναντάται με την συντομογραφία *DinSAR* (Differential SAR Interferometry) (Λέτσιος, 2017).

Η χαρτογράφηση της παραμόρφωσης με οπτικά συστήματα ως τεχνική μέτρησης οριζόντιων κινήσεων αναπτύχθηκε μετά τη μέθοδο *InSAR* και βασίζεται σε μια τεχνική συσχέτισης εικονοστοιχείων. Η παρουσία στερεοσκοπικών εφέ (φαινόμενα που προκύπτουν όταν δύο δορυφορικές εικόνες της ίδιας περιοχής έχουν ληφθεί από διαφορετικές γωνίες ή τροχιές, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται διαφορές στο πώς απεικονίζονται τα αντικείμενα στο έδαφος) προκαλεί σφάλματα στην ευθυγράμμιση των εικόνων, τα οποία όμως διορθώνονται χάρη στις αλλαγές στη στάση του δορυφόρου κατά τη λήψη. Στη συνέχεια οι υπόλοιπες εσφαλμένες καταχωρίσεις αντικατοπτρίζουν την παραμόρφωση του εδάφους. Από την τεχνική αυτή προκύπτει ένα πεδίο μετατόπισης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση των ολισθήσεων στο ρήγμα και για τη χαρτογράφηση συνσεισμικών παραμορφώσεων του εδάφους. Σε αντίθεση με τα οπτικά δεδομένα, η τεχνική *InSAR* δεν καταγράφει καλά τη ζώνη του ρήγματος, επειδή εκεί υπάρχουν απότομες μετακινήσεις και απώλεια σήματος. Αντί γι' αυτό, δίνει πολύ ακριβείς μετρήσεις σε περιοχές πιο μακριά από το ρήγμα, όπου το έδαφος μετακινείται πιο ομαλά. Το μειονέκτημα αυτό μπορεί να συμπληρωθεί από την μέθοδο της οπτικής μετατόπισης (Tronin, 2009).

### *1.3.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ InSAR ΤΕΧΝΙΚΩΝ*

Η χρήση των δεδομένων Sentinel-1 και των τεχνικών *InSAR* έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική στην παρακολούθηση και ανάλυση σεισμικών γεγονότων, τόσο σε διεθνές όσο και σε εθνικό επίπεδο. Παρακάτω θα αναφερθούν μερικά παραδείγματα (από την Ελλάδα αλλά και διεθνώς) που αναδεικνύουν την αξία της δορυφορικής τηλεπισκόπησης στον εντοπισμό μικρό-μετατοπίσεων.

#### *1.3.1.1 Στην ελληνική επικράτεια*

Παρότι δεν σημειώθηκε σεισμικό γεγονός, το 2024 πραγματοποιήθηκε ανάλυση καθιζήσεων και παραμορφώσεων στο νησί της Αίγινας, στο πλαίσιο γεωδυναμικής επιτήρησης της περιοχής του ηφαιστειακού τόξου. Οι παραμορφώσεις που καταγράφηκαν

σχετίζονται με αργές γεωδυναμικές διεργασίες και πιθανές τοπικές καταπονήσεις λόγω γεωτεκτονικής δραστηριότητας. Εντοπίστηκαν καθιζήσεις της τάξης των 0.5–1 cm κυρίως στο κεντρικό τμήμα του νησιού.. Η μελέτη έγινε με χρήση μεθοδολογίας SBAS-InSAR και δεδομένα Sentinel-1A/B, αναδεικνύοντας μικρομεταβολές του φλοιού (Kalavrezou, Melgar, etal, 2024).

Στις 3 Μαρτίου 2021, η περιοχή της Ελασσόνας στη Θεσσαλία επλήγη από ισχυρό σεισμό μεγέθους 6.3 ρίχτερ ακολουθούμενος από δόνηση μεγέθους 6.0 την επόμενη ημέρα και αρκετούς μετασεισμούς, με ισχυρότερο έναν 5.7 ρίχτερ. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από υψηλή σεισμικότητα και ενεργές τεκτονικές δομές. Η σεισμική ακολουθία εξετάστηκε με InSAR τεχνικές, αποτυπώνοντας μετατοπίσεις έως και -40 εκατοστά στην επιφάνεια της περιοχής Ελασσόνας–Τυρνάβου. Η InSAR βοήθησε να αποκαλυφθεί η ύπαρξη κρυφών ρηγμάτων και η χωρική κατανομή της παραμόρφωσης, συνεισφέροντας στην κατανόηση του τεκτονικού μηχανισμού και στην πρόβλεψη πιθανής αλληλεπίδρασης ρηγμάτων (Papadopoulos, Agalos, etal, 2021).

#### *1.3.1.2 Σε διεθνές επίπεδο*

Στις 23 Φεβρουαρίου 2023, το ανατολικό Τατζικιστάν επλήγη από σεισμό μεγέθους 6.8 ρίχτερ. Η περιοχή είναι γνωστή για την έντονη δραστηριότητα και τις πολύπλοκες ρηξιγενείς δομές, πολλές από τις οποίες δεν εμφανίζονται στην επιφάνεια. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα Sentinel-1A για την παραγωγή διαφορικών παρεμβολών (co-seismicInSAR), οι οποίες αποκάλυψαν μετατοπίσεις που υπερέβαιναν τα 25 cm κατά μήκος της γραμμής θέασης. Η τεχνική InSAR ήταν καθοριστική, καθώς η περιοχή είναι δυσπρόσιτη, με περιορισμένες επίγειες μετρήσεις, προσφέροντας έτσι υψηλής ακρίβειας γεωδαιτικά δεδομένα (Shi, Wang, Bian, 2023).

Την ίδια χρονιά, η καταστροφική σεισμική ακολουθία του Φεβρουαρίου 2023 στη νοτιοανατολική Τουρκία περιλάμβανε δύο κύριους σεισμούς με μέγεθος 7.5, ενεργοποιώντας πολλαπλά ρήγματα της Ανατολικής Ανατολίας. Η ανάλυση των δεδομένων Sentinel-1A/B και επίγειων GPS παρείχε έναν συνδυασμό co-seismic και μετασεισμικών μετρήσεων που επέτρεψαν τον ακριβή καθορισμό των μετατοπίσεων σε οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο. Οι συνολικές μετατοπίσεις ξεπέρασαν το 1 μέτρο σε ορισμένες περιοχές. Η InSAR συνέβαλε καθοριστικά στην ανακατασκευή της πολύπλοκης γεωμετρίας ρηγμάτων και στον εντοπισμό νέων επιφανειακών ρηξιγενών διαρρήξεων. Τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν επίσης για εκτιμήσεις ζημιών και επαναχάραξη του ρήγματος (Liet al, 2023).

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

### 2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ

#### 2.1.1 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

Η γεωλογία της Κρήτης χαρακτηρίζεται από πολλά μετά-αλπικά ιζήματα που καλύπτουν τις λεκάνες που χωρίζουν τα ψηλά βουνά και από αλπικά και προαλπικά πετρώματα που συνθέτουν πολύπλοκα γεωτεκτονικά καλύμματα. Αυτά δημιουργούνται από ένα αριθμό τεκτονικών καλυμμάτων τοποθετούμενα το ένα πάνω στο άλλο και ανάλογα με την στρωματογραφική τους θέση και την ιστορία τους, χωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες που αποτελούνται από τα ανώτερα και τα κατώτερα καλύμματα (Μουντράκης, 1985, Φασούλας, 2001). Τα κατώτερα περιλαμβάνουν τρεις επιμέρους κατηγορίες:

- Τους πλακώδεις Ασβεστόλιθους (περιλαμβάνουν τυπικούς πλακώδεις ασβεστόλιθους με πυριτικές ενστρώσεις και κερατόλιθους κονδύλους καθώς και μεγάλους ασβεστόλιθους, ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή, δολομίτες και φυλλιτικές-χαλαζιτικές παρεμβολές.
- την ενότητα Τρυπαλίου που βρίσκεται πάνω στη σειρά των πλακωδών ασβεστόλιθων σε μορφή καλλύματος κροκαλοπαγών-λατυποπαγών ασβεστόλιθων και δολομιτών που ονομάζεται σειρά Τρυπαλίου.
- Τέλος το τεκτονικό κάλυμμα Φυλλιώ-Χαλαζιτών που βρίσκεται πάνω στην ενότητα Πλακωδών Ασβεστόλιθων και στη σειρά Τρυπαλίου και αποτελείται από χαλαζίτες, φυλλίτες, φακοειδείς ανακρυσταλλομένους ασβεστόλιθους, μετακροκαλοπαγή, μεταψαμμίτες, μεταβασίτες και μετα-ανδεσίτες.

Η μεταμόρφωση όλων των κατώτερων καλυμμάτων έγινε σε συνθήκες υψηλής πίεσης/χαμηλής θερμοκρασίας (Μουντράκης, 1985, Φασούλας, 2001).

Τα ανώτερα καλύμματα αποτελούνται από τεκτονικές ενότητες που μπορούν να συσχετισθούν με τις λιθοτεκτονικές ενότητες της κεντρικής Ελλάδας και των Κυκλάδων. Πρώτη είναι η ζώνη Γαβρόβου-Τριπόλεως με τους νηριτικούς ασβεστόλιθους και σε ανώτερη τεκτονική θέση είναι το τεκτονικό κάλυμμα της ζώνης Πίνδου. Πάνω από αυτό και κάτω από τα κρυσταλλικά πετρώματα του καλύμματος των Αστερουσίων υπάρχουν τεκτονικά τοποθετημένες οι ενότητες της Άρβης, του Σπηλίου, του Βάτου, της Μιαμούς, και της Πρέβελης. Στην κορυφή των τεκτονικών καλυμμάτων της Κρήτης βρίσκονται τα πετρώματα των Οφιολίθων και των Αστερουσίων (Μουντράκης 1985, Φασούλας 2001). Όλα τα παραπάνω καλύπτονται από νεογενή ιζήματα, για αυτό και στο σύνολο τους χαρακτηρίζονται ως προ-νεογενές υπόβαθρο.

Οι νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις της λεκάνης του Ηρακλείου ταξινομήθηκαν στις εξής ομάδες (Benda et al., 1974 και Meulenkaamp et al., 1979 και Αλμομάνι, 2006).

Πίνακας 2 Νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις της λεκάνης του Ηρακλείου

| Ονομασία | Τύπος Ιζημάτων | Περιγραφή (Συνοπτικά) | Θέση/Σχόλια |
|----------|----------------|-----------------------|-------------|
|----------|----------------|-----------------------|-------------|

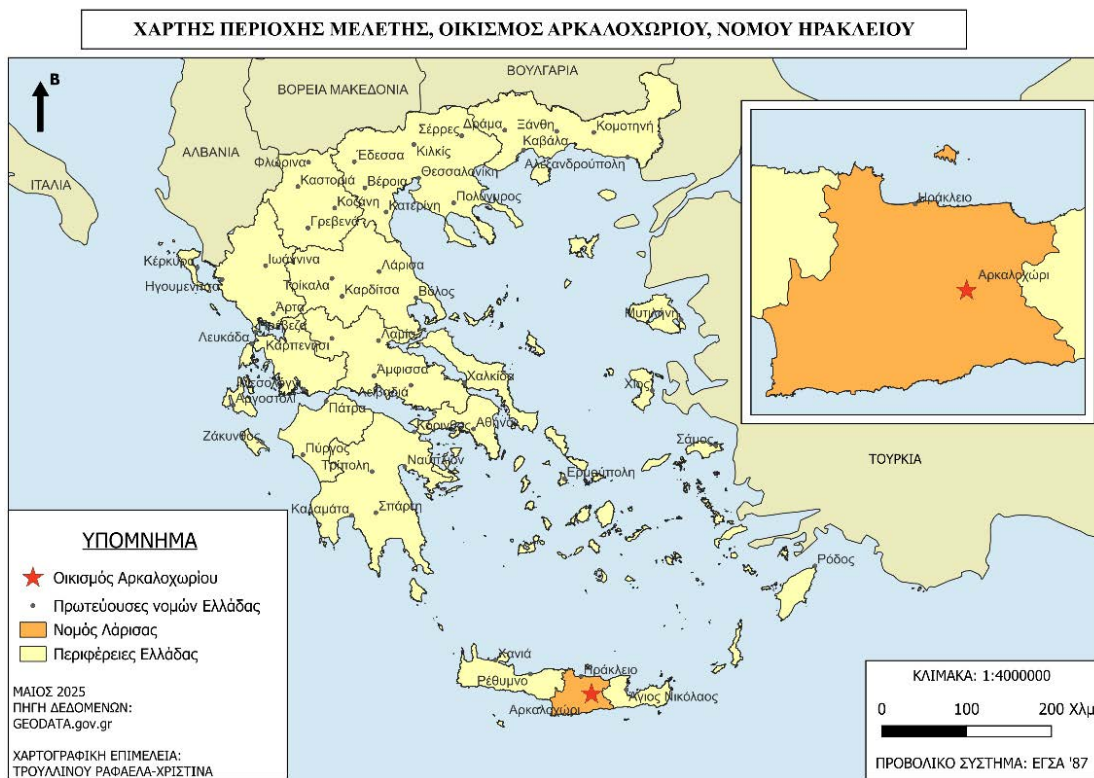
|                 |                                    |                                               |                                  |
|-----------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|
| <b>Πρίνα</b>    | Νεογενή, ασβεστόλιθοι, κροκαλοπαγή | Καλά συγκολλημένα, συχνά με ασβεστούχα μάζα   | Δυτικά Τυλισσού                  |
| <b>Τεφέλι</b>   | Κλαστικά ιζήματα, άργιλοι          | Σχηματίζονται στο νότιο περιθώριο της λεκάνης | Νότια λεκάνη                     |
| <b>Βρύσσες</b>  | Θαλάσσια, ασβεστόλιθοι & μάργες    | Βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι με εναλλαγές μαργών | Θαλάσσια προέλευση               |
| <b>Ελληνικό</b> | Κροκαλοπαγή, γύψος, λιμναία        | Πιο πρόσφατα Μειοκαινικά ιζήματα, ηπειρωτικά  | Από λιμναίες και ποτάμιες φάσεις |
| <b>Φοινίκια</b> | Μάργα, διατομίτης                  | Θαλάσσια λεπτόκοκκα ιζήματα                   | Θαλάσσια προέλευση               |
| <b>Γαλήνη</b>   | Κροκαλοπαγή, άμμοι, μαργαίκα       | Πλειοκαινικές αποθέσεις, μη θαλάσσια          | Κοκκινωπά υλικά λόγω διάβρωσης   |

Το νησί της Κρήτης ανήκει στην εμπροσθοτάφρο του ελληνικού τόξου που χαρακτηρίζεται από τη βόρεια υποβύθιση της Αφρικανικής πλάκας προς το Βορρά, λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητάς της. Το γεωδυναμικό φαινόμενο είναι η κύρια αιτία διαμόρφωσης (π.χ. ορογένεσης, ηφαιστιογένεσης, κλπ) του Ελληνικού χώρου, καθώς και της συγκέντρωσης της υψηλής σεισμικότητας με την εκδήλωση των περισσότερων με μεγάλα μεγέθη σεισμών στην Ελλάδα. Η λεκάνη του Ηρακλείου βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα του Ελληνικού Τόξου και χαρακτηρίζεται από εφελκυστικά ρήγματα, κατά κύριο λόγο κατά μήκος των διευθύνσεων Β-Ν και ΒΔΝΑ (Fassoulas 2001, Ganasetal. 2017).

## ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ, ΗΡΑΚΛΕΙΟ

Το Αρκαλοχώρι βρίσκεται στο δυτικό άκρο της πεδιάδας Μινώα, σε υψόμετρο περίπου 395 m από την επιφάνεια της θάλασσας και απέχει 32–33χλμ από το Ηράκλειο (χάρτης 1). Σύμφωνα με την απογραφή του 2021, η δημοτική ενότητα αριθμεί 8.547 κατοίκους και η κοινότητα (κύριο χωριό) 3.927 κατοίκους. Κύρια οικονομική δραστηριότητα είναι η γεωργία με καλλιέργειες όπως ελαιόδεντρα, σταφίδα, αμπέλια και δημητριακά. Το Αρκαλοχώρι διαθέτει νηπιαγωγεία, σχολεία πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης, δομές υγείας, τραπεζικές και διοικητικές υπηρεσίες. Μετά τον σεισμό του 2021, λειτουργούν προσωρινές δομές εκπαίδευσης.

«Το Αρκαλοχώρι τοποθετείται σε παλαιότερους σχηματισμούς στο όριο μεταξύ των ασβεστόλιθων και μαργών (Ms-Pli) του ανώτερου Μειόκαινου έως κατώτερου Πλειόκαινου και των ηπειρωτικών αποθέσεων του μέσου ως ανώτερου Μειόκαινου (Mm-s), οι οποίες αποτελούνται από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, αργίλους και λιγνίτες» (γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ)



Χάρτης 1: Χάρτης περιοχής μελέτης οικισμού Αρκαλοχωρίου

Το Αρκαλοχώρι το οποίο αποτελεί και μια από τις δύο περιοχές μελέτης, είναι χτισμένο σε μία τοπογραφική ενδολεκανική έξαρση η οποία είναι αποτέλεσμα τόσο του γεγονότος ότι αποτελεί τμήμα του υποκείμενου τεμάχους του ρήγματος με διεύθυνση Β-Ν όσο και της εμφάνισης των ανθεκτικών στη διάβρωση βιοκλαστικών ασβεστόλιθων. Το ρήγμα του Αρκαλοχωρίου ανήκει σε μια σειρά κανονικών ρηγμάτων με διεύθυνση Β-Ν έως ΒΔ-ΝΝΔ. Στο τμήμα ΝΝΔ του ρήγματος Καστελλίου, εντοπίζεται το Ρήγμα Λαγούτα του οποίου η μορφολογική αποτύπωση είναι λιγότερο ευκρινής σε σύγκριση με το ρήγμα Καστελλίου. Αυτά τα δύο διαμορφώνουν τη ρηξιγενή ζώνη του Καστελλίου, με το νότιο τμήμα του ρήγματος Λαγούτα να σχετίζεται με το σεισμό της 27ης Σεπτεμβρίου 2021 (Ganasetal., 2022).

### 2.1.2 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΛΑΡΙΣΑΣ

Η περιοχή της Λάρισας ανήκει στην Πελαγονική Γεωτεκτονική ζώνη και οι γεωλογικοί σχηματισμοί της βρίσκονται πάνω στην αυτόχθονη ενότητα του Ολύμπου και εμφανίζονται στο ΒΑ όριο της περιοχής μελέτης. Το υπόλοιπο τμήμα της περιοχής καλύπτεται από Πλειστοκαινικές λιμναίες-ποταμολιμναίες αποθέσεις και προσχώσεις του Πηνειού και Τιταρήσιου.

Στο γεωλογικό υπόβαθρο της λεκάνης της Λάρισας και κυρίως στις ημιορεινές περιοχές στα βόρεια λεκάνης συναντώνται (Λαζάρου, 2019):

- Το μέσο-Τριαδικό-Ιουρασικό που περιλαμβάνει μάρμαρα και κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους πάχους 300m περίπου
- Το ανώτερο μειόκαινο που περιλαμβάνει επικλυσιογενή πολυγενή και συμπαγή κροκαλοπαγή πάχους 80m περίπου
- Το ποντειόπλειο-πλειστόκαινο που περιλαμβάνει ποταμοχερσαίους σχηματισμούς μέγιστου πάχους 100m περίπου καλύπτοντας το νοτιοδυτικό μέρος της λεκάνης της Λάρισας
- Το πλειστόκαινο που περιλαμβάνει ποταμολιμναίες αποθέσεις που καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση των βορείων παρυφών της λεκάνης της Λάρισας αποτελούμενοι από αργίλους και άμμους σημαντικού πάχους
- Και το ολόκαινο που περιλαμβάνει κυρίως αλλουβιακές αποθέσεις και ποτάμιας αναβαθμίδες

Το δυτικό και ανατολικό τμήμα της Θεσσαλίας χωρίζεται από μια σειρά αντρείσμάτων ημιορεινού ή λοφώδους ανάγλυφου με ιδιαίτερη ανάπτυξη ανθρακικών πετρωμάτων στα βόρεια τμήματα. Το πεδινό τμήμα της ανατολικής Θεσσαλίας αποτελείται από μια σειρά μαργών, μαργαϊκών ασβεστολίθων και κροκαλοπαγών που επικάθονται στα δυτικά όρια της πεδιάδας. Σε αυτά υπάρχουν σειρές ποταμολιμναίων και ποταμοχερσαίων αποθέσεων από ψαμμίτες, μάργες, αργιλοαμμώδη υλικά με κροκαλομιγείς διάσπαρτους ορίζοντες. Το βραχώδες υπόβαθρο είναι μάρμαρα ή γνευσιοσχιστόλιθοι κυρίως στην περιοχή της συμβολής του Πηνειού με τον Τιταρήσιο. Οι αποθέσεις του ποταμού Πηνειού εμφανίζουν στην επιφάνεια σύσταση που αποτελείται από αργιλλώδη ιλύ, αμμοίλυ ή λεπτόκοκκη άμμο και η διαπερατότητά τους είναι χαμηλή. Τα υλικά αυτά είναι πολύ ευαίσθητα στη διάβρωση (Λαζάρου 2019).

Από γεωτεκτονικής άποψης εντάσσεται στην τεκτονική μονάδα της τάφρου της Λάρισας. Πρόκειται για λεκάνη δημιουργημένη από καταβυθίσεις κατά την έναρξη του Πλειόκαινου και πληρώθηκε με πλειστοκαινικές και Τεταρτογενείς αποθέσεις. Οι καταβυθίσεις είναι μετατεκτονικές κινήσεις της παροξυσμικής φάσης της Αλπικής ορογένεσης με συνέχεια ως ανοδικές ή καθοδικές μέχρι και το Κατώτερο Τεταρτογενές. Αποτέλεσμα ήταν μια λεβητοειδής λεκάνη της οποίας το εσωτερικό βυθιζόταν όσο η περίμετρος της Θεσσαλικής πεδιάδας ανυψωνόταν και αυτό αποτέλεσε λίμνη όπου αποτέθηκαν τα νεώτερα ιζήματα. Σύμφωνα με τον Νεοτεκτονικό χάρτη Ελλάδος, οι ρηξιγενείς ζώνες είναι (Λαζάρου, 2019):

- Κανονικά ρήγματα του κατώτερου Πλειόκαινου-Πλειστόκαινου
- Και κανονικά ρήγματα του κατώτερου Πλειστόκαινου-Ολόκαινου

#### ΔΑΜΑΣΙ, ΛΑΡΙΣΑ

Το Δαμάσι(η δεύτερη περιοχή μελέτης) είναι κοινότητα του Δήμου Τυρνάβου, με έκταση περίπου 143,35χλμ<sup>2</sup> και υψόμετρο 111m. Βρίσκεται στην πεδιάδα της Θεσσαλίας, με



εύφορο γεωργικό έδαφος (χάρτης 2). Ο πληθυσμός σύμφωνα με την απογραφή του 2021 ανέρχεται σε 1.215 κατοίκους (Δαμάσι: 1.164, Δαμασούλι: 51). Η οικονομία βασίζεται στη γεωργία (δημητριακά, βαμβάκι, κηπευτικά) και στην κτηνοτροφία. Υπάρχουν επίσης αγροτικές επιχειρήσεις και περιορισμένες εμπορικές δραστηριότητες. Διαθέτει οδική σύνδεση με Λάρισα και το υπόλοιπο θεσσαλικό δίκτυο.



Χάρτης 2: Χάρτης περιοχής μελέτης οικισμού Δαμασίου

### 2.1.3 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ, ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ

Η Κρήτη είναι μια σεισμικά ενεργή περιοχή και βρίσκεται στα όρια σύγκλισης της Αφρικανικής με την Ευρασιατική πλάκα. Η σεισμική της δραστηριότητα οφείλεται στη γεωγραφική της θέση και στο σχηματιζόμενο Ελληνικό τόξο ή αλλιώς γνωστό και ως τόξο του Αιγαίου το οποίο αποτελεί το όριο επαφής της Αφρικανικής πλάκας, τμήμα της οποίας είναι η λιθόσφαιρα της Ανατολικής Μεσογείου και της Ευρασιατικής λιθοσφαιρικής πλάκας, τμήμα της οποίας είναι το Αιγαίο (Λιαδάκη, 2023).

Πολλοί σημαντικοί σεισμοί έχουν συμβεί στην Κρήτη. Ενδιαφέρον έχει ο σεισμός του 365 μ.Χ., και του 1303 μ.Χ. Ο πρώτος εκτιμάται στα 8.0 R., και υπάρχει αναφορά για ανύψωση της Κρήτης κατά περίπου 10 m., ενώ ο δεύτερος ήταν μεγέθους 7.0 R., όπου προκάλεσε σημαντικές ζημιές. Οι πιο πρόσφατοι σεισμοί που αξίζει να αναφερθούν και επηρέασαν την Κρήτη και ιδιαίτερα το Ηράκλειο ήταν ο σεισμός του 1856, το μέγεθος του



οποίου υπολογίστηκε στα 7.7 ρίχτερ με επίκεντρο το Ηράκλειο, ο σεισμός του 1926 που έπληξε την περιοχή του Ηρακλείου στις 15 Ιουλίου 1926, είχε μέγεθος 6.4 Ρίχτερ και προκάλεσε σοβαρές καταστροφές σε πολλά κτίρια και εκκλησίες, καθώς και απώλεια ανθρώπινων ζώων, Ο σεισμός του 1935 στις 25 Φεβρουαρίου του 1935 που σημειώνεται ως σεισμός μεγέθους 7 Ρίχτερ με επίκεντρο την πόλη του Ηρακλείου. Υπήρξαν 8 νεκροί και περισσότεροι από 200 τραυματίες, ενώ ισοπεδώθηκαν και πολλά χωριά. Ο σεισμός του 1953 συνέβη στις 9 Ιουλίου 1953 και είχε μέγεθος 7,2 Ρίχτερ και ενώ το επίκεντρο του ήταν δυτικότερα της Κρήτης στη θαλάσσια περιοχή των Χανίων, προκάλεσε σοβαρές ζημιές στην πόλη του Ηρακλείου.

Ο σεισμός της 27ης Σεπτεμβρίου 2021 είναι ο πρώτος γνωστός ισχυρός σεισμός που διέρρηξε την περιοχή του Αρκαλοχωρίου κατά τη διάρκεια όλης της ιστορικής περιόδου. (Triantafyllouetal., 2022). Το Αρκαλοχώρι είναι μια ημιορεινή κωμόπολη και ιστορική έδρα του Δήμου ΜινώαΠεδιάδος στην Περιφερειακή Ενότητα Ηρακλείου της Κρήτης. Ο σεισμός είχε μέγεθος 5.7 Ρίχτερ με εστιακό βάθος 8χλμ και επίκεντρο 5χλμ νότια του Αρκαλοχωρίου. Ακολούθησε μακρά σεισμική ακολουθία και ο πιο ισχυρός μετασεισμός σημειώθηκε την 28η Σεπτεμβρίου έχοντας μέγεθος 5,3 R. Το επίκεντρο του εντοπίστηκε 5 χλμ. Νότια του Αρκαλοχωρίου, ενώ το εστιακό βάθος ήταν μικρότερο από 10 χλμ.

Οι ζημιές που προκλήθηκαν ήταν εκτεταμένες στο επίκεντρο του σεισμού αλλά και στην ευρύτερη περιοχή του Δήμου ΜινώαΠεδιάδος και την πόλη του Ηρακλείου. Ο απολογισμός ήταν μια ανθρώπινη απώλεια και αρκετοί τραυματίες. Όσον αφορά τις καταστροφές στα κτίρια και τις ανθρώπινες κατασκευές, από ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν, από τα 7015 σπίτια που ελέγχθηκαν τα 3.906 κρίθηκαν μη κατοικήσιμα και αντίστοιχα 180 από τους 345 επαγγελματικούς χώρους, 211 στα 498 δημόσια κτίρια και ναούς και 562 από 682 άλλα κτίρια (Λιαδάκη, 2023).

#### *2.1.4 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΛΑΡΙΣΑ, ΔΑΜΑΣΙ*

Η σεισμική ακολουθία του 2021 στην Κεντρική Ελλάδα, δηλαδή ο σεισμός του Δαμασίου, έλαβε χώρα στις 3 Μαρτίου με σεισμό μεγέθους 6,3 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ. Ο σεισμός αυτός προκάλεσε μόνο σημαντικές καταστροφές πέτρινων σπιτιών σε χωριά της περιοχής του επίκεντρου. Ο δεύτερος σεισμός (Mw 6,0) σημειώθηκε στις 4 Μαρτίου ενώ πολυάριθμοι μετασεισμοί καταγράφηκαν ημέρες αργότερα προκαλώντας περαιτέρω ζημιές στα κτίρια. Το σεισμικό σύμπλεγμα περιορίζεται στην περιοχή των χωριών Δαμάσι και Βλαχογιάννη κατά τη διάρκεια των πρώτων 12 περίπου ωρών μετά το συμβάν της 3ης Μαρτίου και στη συνέχεια μετά το συμβάν της 4ης Μαρτίου επεκτάθηκε βορειοδυτικά για περισσότερα από 25 χιλιόμετρα. Οι μετασεισμοί σχηματίζουν μια περιοχή μήκους 45χλμ. και 18 χλμ. πλάτος, ενώ τα βάθη τους κυμαίνονται μεταξύ 2 και 20 χλμ. (Koukouvelas etal., 2021).

Οι παράμετροι του σεισμού έδειξαν ότι προηγήθηκαν από την ισχυρή σεισμική δραστηριότητα, μια σειρά περίπου 30 προ σεισμών που κυμαίνονταν από 0,9 έως 2,9, και εκδηλώθηκαν σε μια περιοχή ακτίνας περίπου 30χλμ γύρω από το επίκεντρο του πρώτου σεισμού ξεκινώντας στις 28 Φεβρουαρίου και τελειώνοντας στις 3 Μαρτίου (Papadopoulosetal., 2021).

Αξίζει να αναφερθεί πως δεν έχει σημειωθεί κανένας άλλος ισχυρός σεισμός σε ολόκληρη τη Θεσσαλία από το 1980, συνεπώς η ακολουθία αυτή είναι η πρώτη που καταγράφεται από σύγχρονους σειсмоγράφους. Οι σεισμοί του Μαρτίου του 2021 διέσπασαν μια περιοχή που θεωρούνταν ως μακροχρόνιο σεισμικό κενό με βάση την ιστορική σεισμικότητα της περιοχής της Θεσσαλίας.

Η βόρεια πλευρά της Θεσσαλίας, συμπεριλαμβανομένης και της περιοχής του Δαμασίου, δεν είχε επηρεαστεί από ισχυρούς σεισμούς από το 1781 μ.Χ. μέχρι και σήμερα, αντίθετα με την νότια πλευρά όπου , σημειώθηκαν αρκετοί ισχυροί σεισμοί σχετικά πρόσφατα δηλαδή το διάστημα μεταξύ 1954 έως 1980. Το μοναδικό ίχνος επιφανειακού ρήγματος που παρατηρήθηκε σε σχέση με τη δραστηριότητα του Μαρτίου 2021 βρέθηκε στην περιοχή του Μεσοχωρίου. Παρατηρήθηκαν επίσης επιφανειακές εκδηλώσεις ρευστοποίησης του εδάφους σε διάφορα σημεία εντός της οριακής απόστασης του επίκεντρου του πρώτου σεισμού που δεν παρέχουν παράλυτα ενδείξεις για ίχνη επιφανειακού ρήγματος (Papadopoulosetal., 2012).

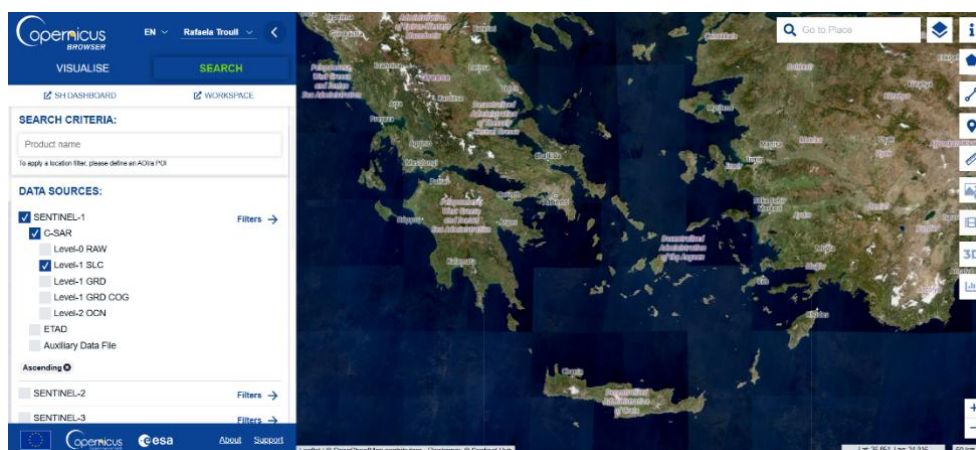
Το περιφερειακό υδρογραφικό δίκτυο και η ποτάμια γεωμορφολογία στη Θεσσαλία επηρεάζονται έντονα από ενεργά ρήγματα. Παραδείγματα είναι ο Πηνειός ποταμός ανατολικά της Λάρισας και ο κεντρικός ρου του Τιταρήσιου ποταμού, του οποίου η κοιλάδα νότια του Δαμασίου εγκαταλείφθηκε εντελώς μερικές φορές κατά τη διάρκεια του Ύστερου Τεταρτογενούς, όταν ο ποταμός συνελήφθη και εκτράπηκε ανατολικά προς την πεδιάδα της Λάρισας. Το φαινόμενο αυτό ήταν συνέπεια της προοδευτικής ανάπτυξης των ρηγμάτων του Τυρνάβου και της Λάρισας. Αυτές οι τεκτονικές δομές είναι δύο ρήγματα υψηλής γωνίας με βόρεια κλίση και κανονική κινηματική. Ειδικότερα, το καλά εκτεθειμένο ρήγμα του Τυρνάβου επηρεάζει τους Τριαδικούς κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους του Πελαγονικού υποβάθρου, αλλά τοπικά και τις Πλειοκαινικές και Τεταρτογενείς αποθέσεις. Το σαφώς καθορισμένο ίχνος του ρήγματος χαρτογραφήθηκε λεπτομερώς για περισσότερα από 12χλμ και με βάση τις τεχνικές τηλεπισκόπησης, μπορεί να ακολουθηθεί ανατολικά κατά μήκος της βόρειας πεδιάδας της Λάρισας με πιθανό μέγιστο μήκος περίπου 15χλμ. Προς τα δυτικά, τα επιφανειακά στοιχεία σταματούν βόρεια του χωριού Δαμάσι (Koukouvelasetal., 2021).

## 2.2 ΥΛΙΚΑ & ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Για την παρούσα μελέτη όπως προ αναφέρθηκε επιλέχθηκαν δύο περιοχές της ελληνικής επικράτειας που επλήγησαν από ισχυρά σεισμικά γεγονότα: το Αρκαλοχώρι Ηρακλείου Κρήτης (σεισμός 27 Σεπτεμβρίου 2021) και το Δαμάσι Τυρνάβου (σεισμός 3

Μαρτίου 2021). Σκοπός είναι η χαρτογράφηση των επιφανειακών παραμορφώσεων που προκλήθηκαν από τους σεισμούς μέσω της τεχνικής DinSAR.

Οι δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από την αποστολή Sentinel-1 του ευρωπαϊκού προγράμματος Copernicus (εικόνα 4). Η πρόσβαση και λήψη των εικόνων έγινε μέσω της επίσημης ιστοσελίδας του προγράμματος (<https://scihub.copernicus.eu>).



Εικόνα 4: Μορφή πλατφόρμας συλλογής δεδομένων

Πιο συγκεκριμένα, για την περιοχή του Αρκαλοχωρίου χρησιμοποιήθηκαν δύο λήψεις Sentinel-1 σε ανιούσα τροχιά (ascending), οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στις 23/09/2021 (πριν τον σεισμό) και στις 29/09/2021 (μετά τον σεισμό). Για την περιοχή του Δαμασίου, επιλέχθηκαν αντίστοιχα οι λήψεις των ημερομηνιών 25/02/2021 (πριν τον σεισμό) και 09/03/2021 (μετά τον σεισμό).

Αφού έχει ολοκληρωθεί η συλλογή των δεδομένων, σειρά έχει η επεξεργασία των εικόνων που πραγματοποιείται στο εξειδικευμένο λογισμικό SNAP (SentinelApplicationPlatform) που έχει αναπτυχθεί από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA). Το SNAP είναι ένα ελεύθερο και ανοιχτού κώδικα εργαλείο που υποστηρίζει την επεξεργασία δεδομένων SAR, οπτικών και υπέρυθρων δορυφορικών αποστολών.

Το κάθε ζεύγος εικόνων αποτελείται από δύο διαφορετικές ημερομηνίες λήψεων και θα μελετηθεί ξεχωριστά. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι χρειάζεται μεγάλος χώρος αποθήκευσης όσον αφορά δεδομένα του δορυφόρου Sentinel-1. Σε συνδυασμό με το μέγεθος ενός παραγόμενου συμβολογραφήματος για δύο εικόνες ραντάρ το μέγεθος χωρητικότητας αγγίζει στα 8.7 GB, με βάση και το υποσύνολο της συνολικής εικόνας που χρησιμοποιήθηκε για την έρευνα που αντιστοιχεί σε 50MB, και όλα αυτά αφορούν δεδομένα παραγόμενα μόνο από την αύξουσα τροχιά του δορυφόρου.

Όσο αφορά την συλλογή των δεδομένων είναι σημαντικό να είναι γνωστά τα δεδομένα που είναι κατάλληλα για την εφαρμογή που πραγματεύεται η εκάστοτε έρευνα.

Στο 1ο κεφάλαιο έγινε μία περιγραφή στις εικόνες ραντάρ και συγκεκριμένα στα τέσσερα διαφορετικά προϊόντα του δορυφόρου Sentinel 1 (Stripmapmode, InterferometricWideSwathmode, Extra-WideSwathmode, Wavemode). Το κατάλληλο προϊόν για τον εντοπισμό των μικρό-μετατοπίσεων είναι το IW γιατί περιέχει ευρύ πεδίο κάλυψης με υψηλή χωρική ανάλυση. Επίσης παράγει μειωμένες παραμορφώσεις στην εικόνα.

Ειδικότερα τα γεωχωρικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των χαρτών στις περιοχές Δαμάσι και Αρκαλοχώρι είναι:

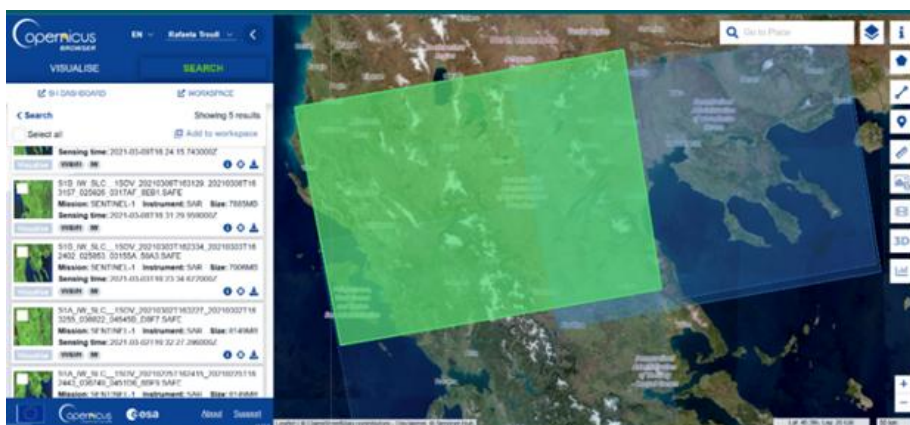
Πίνακας 3 Γεωχωρικά δεδομένα για την δημιουργία των χαρτών του Δαμασίου και του Αρκαλοχωρίου

| A/A | ΌΝΟΜΑ ΑΡΧΕΪΟΥ    | ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ                        |
|-----|------------------|----------------------------------|
| 1   | aktogrammh.shp   | Ακτογραμμή                       |
| 2   | arkaloxwri.shp   | Όρια ή δεδομένα του Αρκαλοχωρίου |
| 3   | europe.shp       | Γεωγραφικά όρια ευρωπαϊκών χωρών |
| 4   | nomoi_okxe.shp   | Νομοί Ελλάδας (ΟΚΧΕ)             |
| 5   | periphereies.shp | Περιφέρειες Ελλάδας              |
| 6   | poleis.shp       | Θέσεις ή όρια πόλεων/οικισμών    |

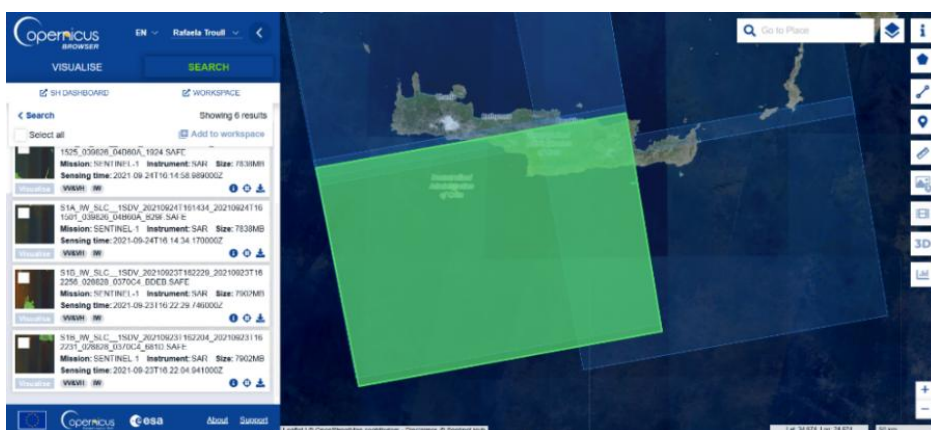
Παρακάτω παρατίθεται ο αναλυτικός πίνακας των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την μεθοδολογία επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων (πίνακας 4), και στιγμιότυπα οθόνης από την διαδικασία δωρεάν λήψης των δεδομένων με την χρήση της διαδικτυακής πλατφόρμας Copernicus (εικόνα 5 και 6).

Πίνακας 4 Εικόνες Radar που χρησιμοποιήθηκαν στις 2 περιοχές μελέτης

| Περιοχή    | Ημερομηνία Λήψης | Πριν/Μετά τον Σεισμό | Ημερομηνία Σεισμού | Δορυφόρος  | Τύπος Εικόνας | Τροχιά  |
|------------|------------------|----------------------|--------------------|------------|---------------|---------|
| Αρκαλοχώρι | 23/09/2021       | Πριν                 | 29/09/2021         | Sentinel-1 | SLC           | Αύξουσα |
| Αρκαλοχώρι | 29/09/2021       | Μετά                 | 29/09/2021         | Sentinel-1 | SLC           | Αύξουσα |
| Δαμάσι     | 25/02/2021       | Πριν                 | 03/03/2021         | Sentinel-1 | SLC           | Αύξουσα |
| Δαμάσι     | 09/03/2021       | Μετά                 | 03/03/2021         | Sentinel-1 | SLC           | Αύξουσα |



Εικόνα 5 Footprint περιοχής Δομασίου



Εικόνα 6 Footprint περιοχής Αρκαλοχωρίου



### 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα ενότητα περιγράφει τη μεθοδολογική προσέγγιση για την εξαγωγή επιφανειακών παραμορφώσεων. Η μέθοδος βασίζεται στη δημιουργία και επεξεργασία συμβολογραφημάτων, με στόχο την ακριβή καταγραφή εδαφικών μετατοπίσεων.

Για την ανάλυση των επιφανειακών παραμορφώσεων αξιοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα Sentinel-1 της πλατφόρμας Copernicus και εφαρμόστηκε η μέθοδος της Διαφορικής Συμβολομετρίας Ραντάρ Συνθετικού Διαφράγματος (DInSAR) μέσω του λογισμικού ESA SNAP (SentinelApplicationPlatform).

Η DInSAR είναι μια δορυφορική τεχνική που επιτρέπει την καταγραφή μικρών εδαφικών μετακινήσεων, συγκρίνοντας δύο εικόνες ραντάρ που έχουν ληφθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Με την αφαίρεση της τοπογραφικής πληροφορίας από τη φάση του σήματος, απομονώνονται οι μεταβολές της επιφάνειας που προέκυψαν στο μεσοδιάστημα. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την παρακολούθηση φαινομένων όπως σεισμοί, καθιζήσεις και κατολισθήσεις (Παρασκευάς, 2022).

Η ακολουθία επεξεργασίας περιλάμβανε τα εξής βήματα (Λέτσιος, 2017):

Πίνακας 5 Συμβολομετρία (SAR Interferometry)

| Βήμα | Διαδικασία                   | Περιγραφή                                                             |
|------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1    | Coregistration               | Δημιουργία ζεύγους των master&slave SAR εικόνων                       |
| 2    | Interferogram                | Δημιουργία ζεύγους από τις δύο εικόνες                                |
| 3    | Removal of Topographic Phase | Αφαίρεση της τοπογραφικής φάσης μέσω DEM                              |
| 4    | Filtering                    | Φιλτράρισμα του συμβολογραφήματος (Goldstein) για απομάκρυνση θορύβου |
| 5    | Phase Unwrapping             | Μετατροπή της κυκλικής φάσης σε συνεχή για εξαγωγή μετατόπισης        |
| 6    | Displacement Calculation     | Υπολογισμός μετατοπίσεων, γεωμετρική διόρθωση                         |
| 7    | Geocoding                    | Γεωμετρική διόρθωση και                                               |

|                        |                            |                             |          |
|------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------|
| γεωαναφορά της εικόνας |                            |                             |          |
| 8                      | Reference Point Correction | Ορισμός<br>σημείου αναφοράς | σταθερού |

Πιο αναλυτικά ξεκινώντας την διαδικασία της επεξεργασίας, το πρώτο βήμα αρχικά είναι να βρεθούν οι πληροφορίες που χαρακτηρίζουν το ζεύγος, με βασικότερη εκείνη της βασικής κάθετης γραμμής (perpendicularbaseline)

Η παρακάτω εικόνα δείχνει της σημαντικότερες πληροφορίες που χρειάζονται για να γίνει χρήση του ζεύγους εικόνων και αυτές είναι η βασική κάθετη γραμμή (perpendicularbaseline) και ένας κατά προσέγγιση υπολογισμός της συνοχής των εικόνων (modeledcoherence) μιας και το τεράστιο footprint που χαρακτηρίζει μία εικόνα SLC-IW του δορυφόρου Sentinel-1 μπορεί να έχει πολύ υψηλή συνοχή, αλλά η περιοχή μελέτης (subset) να μην χαρακτηρίζεται από την ίδια συνοχή. Αξίζει να σημειωθεί, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η βασική κάθετη γραμμή, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η συμμετοχή της τοπογραφίας.

Η εικόνα 7 αφορά την περιοχή του Αρκαλοχωρίου και η εικόνα 8 του Δαμασίου.

| Input stack                    |      |             |       |       |  |  |  |  |            |  |
|--------------------------------|------|-------------|-------|-------|--|--|--|--|------------|--|
| File Name                      | Type | Acquisition | Track | Orbit |  |  |  |  | Add Opened |  |
| S1B_IW_SLC_1SDV_20210923T16... | SLC  | 23Sep2021   | 102   | 28828 |  |  |  |  |            |  |
| S1A_IW_SLC_1SDV_20210929T16... | SLC  | 29Sep2021   | 102   | 39899 |  |  |  |  |            |  |

| Overview        |           |             |       |       |           |              |             |             |              |      |
|-----------------|-----------|-------------|-------|-------|-----------|--------------|-------------|-------------|--------------|------|
| File Name       | Ref/Sec   | Acquisition | Track | Orbit | Bperp [m] | Btemp [d...] | Modeled ... | Height A... | Delta fDC... | Open |
| S1A_IW_SLC_1... | Reference | 29Sep2021   | 102   | 39899 | 0.00      | 0.00         | 1.00        | ∞           | 0.00         |      |
| S1B_IW_SLC_1... | Secondary | 23Sep2021   | 102   | 28828 | 111.36    | 6.00         | 0.90        | -143.18     | 2.73         |      |

Εικόνα 7: Πληροφορίες ζεύγους εικόνων Αρκαλοχωρίου



| Input stack                         |      |             |       |       |     |        |
|-------------------------------------|------|-------------|-------|-------|-----|--------|
| File Name                           | Type | Acquisition | Track | Orbit | Add | Opened |
| S1A_IW_SLC__1SDV_20210225T162415... | SLC  | 25Feb2021   | 102   | 36749 |     |        |
| S1A_IW_SLC__1SDV_20210309T162415... | SLC  | 09Mar2021   | 102   | 36924 |     |        |

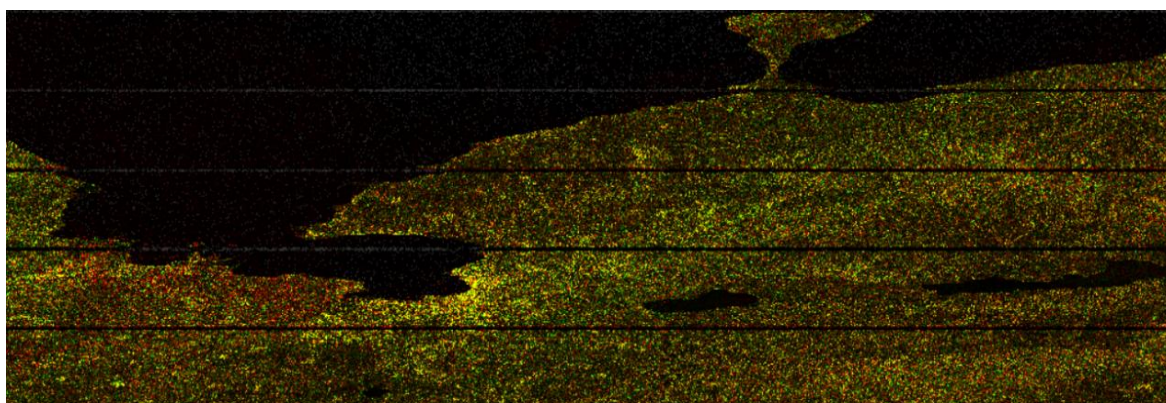
  

| Overview          |           |             |       |       |           |              |              |              |                 |      |
|-------------------|-----------|-------------|-------|-------|-----------|--------------|--------------|--------------|-----------------|------|
| File Name         | Ref/Sec   | Acquisition | Track | Orbit | Bperp [m] | Btemp [days] | Modeled C... | Height Am... | Delta fDC [...] | Open |
| S1A_IW_SLC__1S... | Reference | 25Feb2021   | 102   | 36749 | 0.00      | 0.00         | 1.00         | ∞            | 0.00            |      |
| S1A_IW_SLC__1S... | Secondary | 09Mar2021   | 102   | 36924 | -15.54    | -12.00       | 0.97         | 1023.50      | 3.53            |      |

Εικόνα 8: Πληροφορίες ζεύγους εικόνων Δαμασίου

## ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΖΕΥΓΟΥΣ

Η δημιουργία ζεύγους αποτελεί σημαντικό στάδιο στην συμβολομετρική ανάλυση. Πρόκειται για τη διαδικασία κατά την οποία δύο δορυφορικές εικόνες μία προγενέστερη master και μία μεταγενέστερη slave ευθυγραμμίζονται χωρικά με ακρίβεια. Στόχος είναι να εξασφαλιστεί ότι κάθε pixel της μίας εικόνας αντιστοιχεί γεωγραφικά στο ίδιο σημείο με το αντίστοιχο pixel της άλλης ώστε οι διαφορές φάσης που θα προκύψουν να οφείλονται αποκλειστικά σε φυσικά φαινόμενα (όπως εδαφική παραμόρφωση) και όχι σε γεωμετρικές αποκλίσεις.



Εικόνα 9: RGB εικόνα ζεύγους περιοχής Δαμασίου

Η παραπάνω εικόνα (εικόνα 9) RGB της περιοχής του Δαμασίου αποδεικνύει ότι έχει γίνει καλή δημιουργία ζεύγους και αυτό φαίνεται από το κίτρινο χρώμα που κυριαρχεί στο

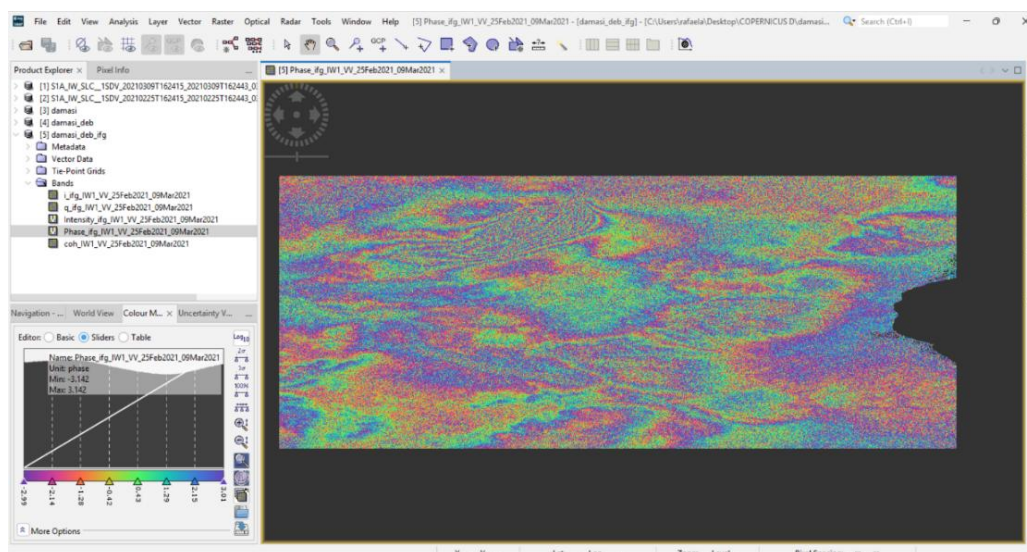
μεγαλύτερο κομμάτι της εικόνας. Παρατηρούμε επίσης ότι η θάλασσά γύρω εμφανίζεται με χρώμα μαύρο καθώς τα υδάτινα σώματα ανακλούν πάρα πολύ μικρά ποσά ακτινοβολίας.

Οι εικόνες Sentinel-1 είναι δομημένες σε μικρότερες λωρίδες (bursts), οι οποίες ενώνονται για να σχηματίσουν την τελική εικόνα και ενδέχεται να περιέχουν μη συνεχείς τιμές λόγω ασυνεχειών στα όρια τους. Το βήμα του deburst εξαλείφει αυτές τις διαχωριστικές γραμμές με σκοπό να εξασφαλιστεί η χωρική συνέχεια της εικόνας και να καταστεί δυνατή η ορθή ερμηνεία και επεξεργασία της φάσης στα επόμενα στάδια.

## ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ

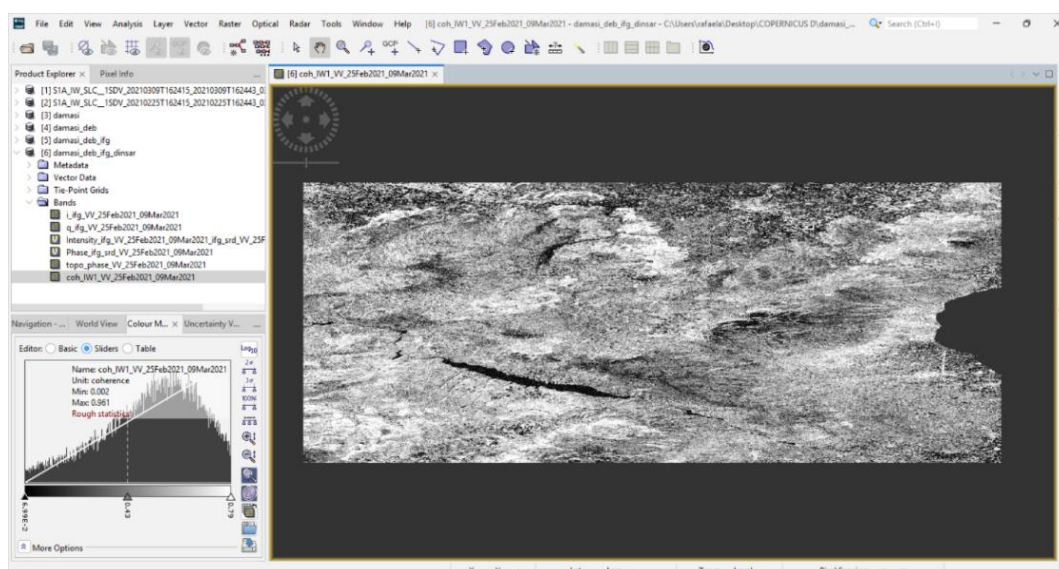
Σε αυτό το στάδιο υπολογίζεται η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο ζευγών εικόνων. Η φάση αντιστοιχεί στην απόσταση που διανύει η ακτινοβολία από τον δορυφόρο στον στόχο και ξανά πίσω στον δορυφόρο. Αν κατά την πρώτη λήψη η ακτινοβολία διανύει  $X_1$  απόσταση και κατά την δεύτερη λήψη  $X_2$ , τότε την δεύτερη φορά ο στόχος στο έδαφος θα έχει μετατοπιστεί προς τα κάτω και αυτή η διαφορά της απόστασης αντιστοιχεί στην διαφορά φάσης. Το αποτέλεσμα είναι ένα συμβολογράφημα (interferogram), στο οποίο οι διαφορές φάσης απεικονίζονται ως χρωματικές ζώνες και επηρεάζονται από την συμμετοχή της τοπογραφίας του εδάφους οπότε όσο μεγαλύτερη είναι η συμμετοχής της τοπογραφίας τόσο πιο έντονη θα είναι η εμφάνιση των χρωματικών κύκλων (εικόνα 10).

Στόχος είναι να αποτυπωθούν μικρές μεταβολές στην απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και της επιφάνειας της Γης, οι οποίες μπορεί να προκύπτουν από παραμόρφωση, καθίζηση ή ανύψωση του εδάφους.



Εικόνα 10: Συμβολογράφημα περιοχής μελέτης Δαμασίου

Επιπλέον κατά τον υπολογισμό του συμβολογραφήματος, υπολογίζεται και η μπάντα με την συνοχή (coherence), του ζεύγους εικόνων. Με αυτήν παρέχονται σημαντικές πληροφορίες για την ποιότητα και για την ένταση του συμβολογραφήματος και των ανακλάσεων της ακτινοβολίας από τους στόχους της επιφάνειας. Μετρά την ομοιότητα μεταξύ των δύο εικόνων. Χαμηλές τιμές υποδηλώνουν αποσυσχέτιση λόγω θορύβου, αλλαγής χρήσης γης ή παρουσίας νερού, ενώ υψηλές τιμές υποδεικνύουν περιοχές όπου το σήμα είναι σταθερό. Στην εικόνα 11 που ακολουθεί τα συμβολογραφήματα αφορούν την περιοχή του Δαμασίου.



Εικόνα 11: Συνοχή ζεύγους εικόνων Δαμασίου

## ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

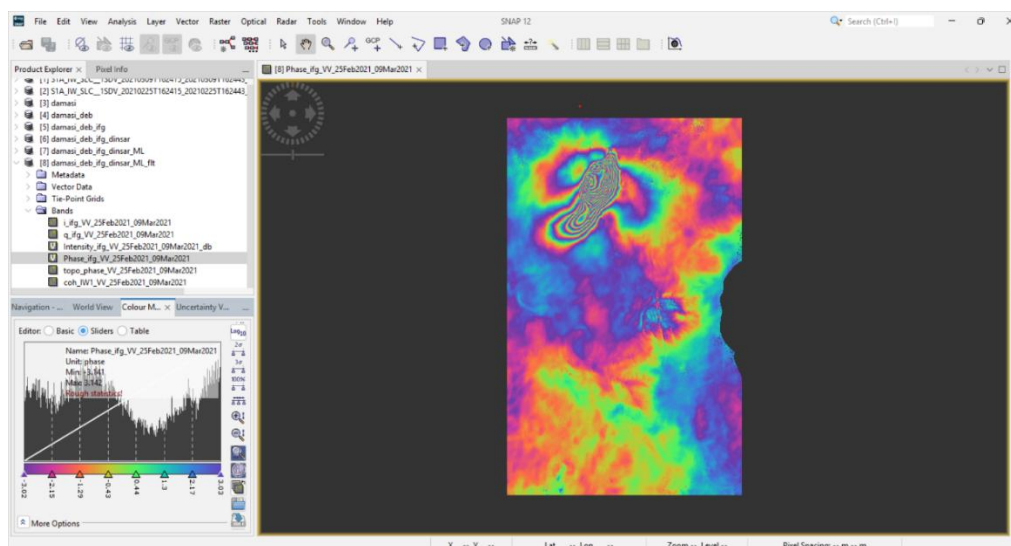
Η τοπογραφία του εδάφους προκαλεί μεταβολές στη φάση ανεξάρτητες από τη μετατόπιση. Η αφαίρεση της τοπογραφίας είναι το βήμα που διαχωρίζει την βασική συμβολομετρία με την διαφορική συμβολομετρία. Η πρώτη χρησιμοποιείται για την δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους ενώ η δεύτερη για τον εντοπισμό των επιφανειακών εδαφικών παραμορφώσεων. Για να πραγματοποιηθεί το βήμα αυτό θα πρέπει να υπάρχει ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής

Η αφαίρεση της τοπογραφίας των συμβολογραφημάτων που παράχθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, έγινε βάση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους SRTM 1Sec HGT. Είναι ένα παγκόσμιο μοντέλο υψομέτρου που δημιουργήθηκε από τη NASA σε συνεργασία με την Εθνική Υπηρεσία Γεωχωρικών Πληροφοριών των ΗΠΑ (NGA). Η συγκεκριμένη έκδοση έχει ανάλυση «1 arc-second» και προσφέρει υψομετρικά δεδομένα με διακριτική ικανότητα περίπου 30 μέτρων στην επιφάνεια της Γης.

## ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΥ ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ

Τα συμβολογραφήματα, διαφορικά ή βασικά χαρακτηρίζονται από κάποιους θορύβους που μπορούν να αλλοιώσουν σε μεγάλο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα. Είναι αναγκαία λοιπόν μία πρακτική που δόθηκε το 1998 από τους Goldstein και Werner. Οι πηγές θορύβου στην φάση ενός συμβολογραφήματος είναι η χρονική ή γεωμετρική αποσυσχέτιση, οι διαβρώσεις, οι αλλαγές στην κάλυψη του εδάφους και οι θερμικοί θόρυβοι.

Η μέθοδος αυτή που ονομάζεται GoldsteinPhaseFilteringMethod, αποτελεί έναν μη γραμμικό αλγόριθμο που αυξάνει την αναλογία σήματος προς θόρυβο καθώς αφαιρεί τους θορύβους με αποτέλεσμα να βελτιώνει την ποιότητα του συμβολογραφήματος και να βοηθάει στην μετέπειτα επεξεργασία. Όσο πιο έντονη είναι η τιμή που θα δοθεί τόσο πιο έντονο θα είναι το φιλτράρισμα (εικόνα 12).



Εικόνα 12: Φιλτραρισμένο διαφορικό συμβολογράφημα

## «ΞΕΤΥΛΙΓΜΑ» ΦΑΣΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ (SNAPHU)

Το φιλτραρισμένο συμβολογράφημα χαρακτηρίζεται από τη φάση του συμβολογραφήματος που παρέχει μία διφορούμενη μέτρηση των σχετικών υψομέτρων του εδάφους και ονομάζεται διφορούμενο υψόμετρο (altitude of ambiguity). Ορίζεται ως η υψομετρική διαφορά, η οποία δημιουργεί μία αλλαγή φάσης  $2\pi$ . Η φάση καταγράφεται με τιμές από  $-\pi$  έως  $+\pi$ . Το συμβολογράφημα εκφράζει τη φάση σε κυκλική μορφή η οποία δημιουργεί ασυνέχειες που καθιστούν αδύνατο τον άμεσο υπολογισμό της απόλυτης μετατόπισης.

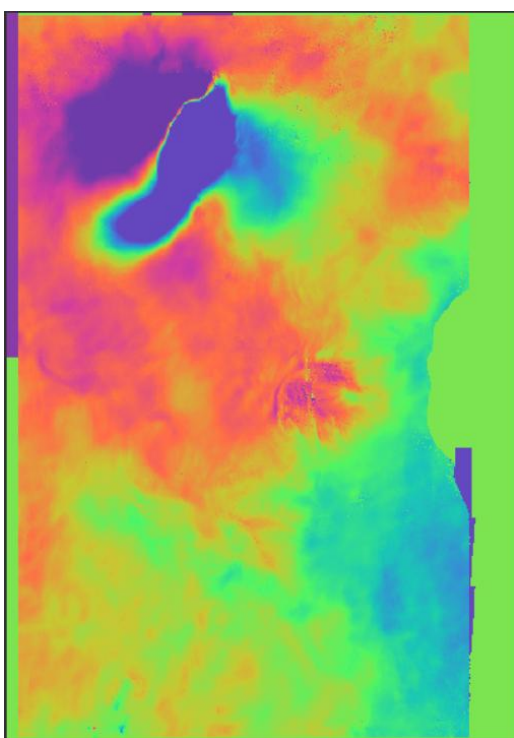
Το «ξετύλιγμα» της φάσης αντιμετωπίζει το πρόβλημα των διφορούμενων μετρήσεων, ενσωματώνοντας την διαφορά φάσης μεταξύ γειτονικών pixels και τα τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας εξαρτώνται από την συνοχή που χαρακτηρίζει το κάθε



συμβολογράφημα. Μία από τις προσεγγίσεις που επικρατούν περισσότερο είναι ο αλγόριθμος «Snaphu» από τους Chen και Zebker.

Ο αλγόριθμος SNAPHU (StatisticalCostNetworkFlowAlgorithm for PhaseUnwrapping) μπορεί να ξεχωρίσει ποιες αλλαγές είναι πραγματικές και ποιες οφείλονται σε θόρυβο και χρησιμοποιείται καθώς βασίζεται σε στατιστικά μοντέλα και λαμβάνει υπόψη τη συνοχή του σήματος, για αξιόπιστα αποτελέσματα ακόμη και σε περιοχές με χαμηλό coherence.

Με τον συγκεκριμένο αλγόριθμο εκτελέστηκαν όλα τα «ξετυλίγματα» φάσεων που παράχθηκαν στα πλαίσια της εργασίας, και ένα παράδειγμα αποτελέσματος μετά το «ξετύλιγμα» της φάσης αποτελεί το παρακάτω της εικόνας 13.



*Εικόνα 13: Φιλτραρισμένο συμβολογράφημα μετά από ξετύλιγμα*

#### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ, ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Το παραγόμενο αποτέλεσμα δεν είναι ακόμα γεωχωρικά αναγνωρίσιμο. Με την τεχνική RangeDopplerTerrainCorrection, η εικόνα μετασχηματίζεται σε σύστημα γεωγραφικών συντεταγμένων με σκοπό να αντιστοιχηθεί κάθε pixel σε πραγματικές γεωγραφικές συντεταγμένες, επιτρέποντας χαρτογράφηση και χρήση σε GIS εφαρμογές (όπως το QGIS).

Σε περιοχές με χαμηλό δείκτη συνοχής (π.χ.  $< 0.3$ ), το σήμα θεωρείται αναξιόπιστο. Δημιουργείται λοιπόν μια μάσκα η οποία αποκλείει τέτοια pixel από το τελικό αποτέλεσμα. Η μάσκα εφαρμόζεται ως φίλτρο στο raster της παραμόρφωσης, θέτοντας τιμές εκτός ορίων (NaN) όπου η συνοχή είναι χαμηλή.

## ΠΡΟΙΟΝ

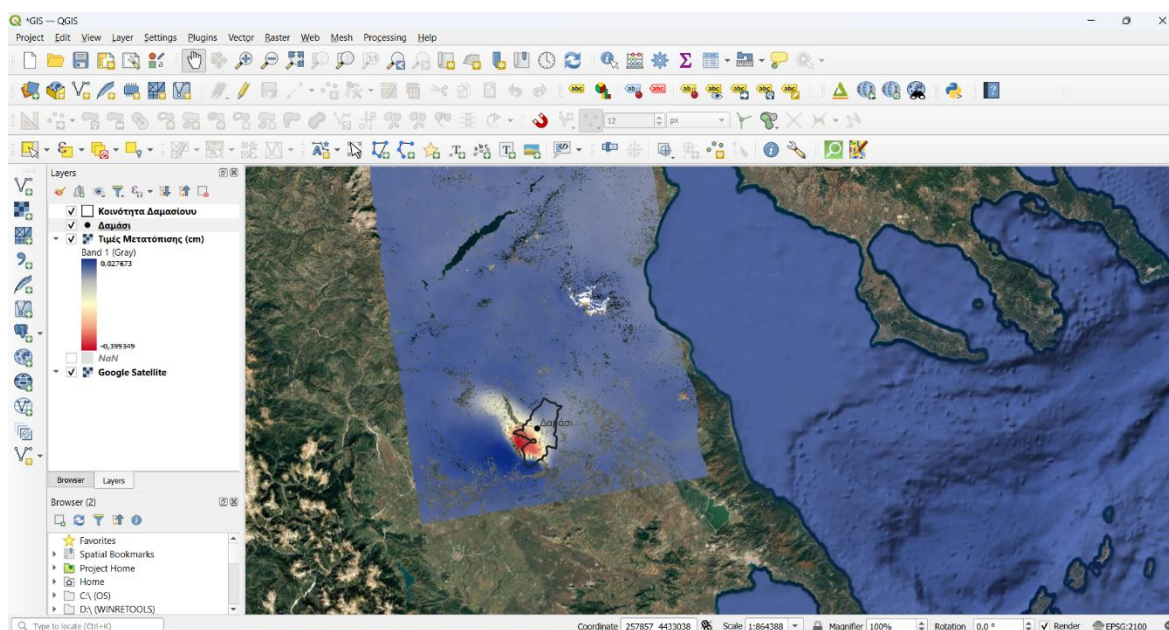
Το τελικό προϊόν (deformationraster) εξάγεται σε μορφή GeoTIFF, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί σε Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών. Γίνεται επιλογή κατάλληλης χρωματικής παλέτας για την απεικόνιση για υψηλή αντίθεση και αναγνωσιμότητα. Ο χρωματικός χάρτης δείχνει τις θέσεις ανύψωσης ή καθίζησης του εδάφους κάνοντας ορατές τις μεταβολές με πολύ μεγάλη ακρίβεια.

## 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης εδαφικών παραμορφώσεων που προέκυψαν από τη χρήση της μεθόδου DInSAR στις περιοχές του Αρκαλοχωρίου και του Δαμασίου. Μέσα από τα δεδομένα που επεξεργάστηκαν, καταγράφονται οι μετατοπίσεις του εδάφους που συνδέονται με τους σεισμούς του 2021. Η ανάλυση περιλαμβάνει ποσοτικά στοιχεία, ερμηνείες των φαινομένων και σύγκριση των δύο περιοχών, με στόχο την καλύτερη κατανόηση των γεωδυναμικών επιπτώσεων που προκάλεσαν τα σεισμικά γεγονότα.

### 4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΔΑΜΑΣΙΟΥ

Πρώτα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την περιοχή του Δαμασίου, μετά την διαδικασία οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων των τιμών μετατόπισης (εικόνα 14), βασισμένα στο ζεύγος εικόνων Sentinel-1 με ημερομηνίες λήψης 25 Φεβρουαρίου 2021 (εικόνα αναφοράς) και 9 Μαρτίου 2021 (δευτερεύουσα εικόνα). Το ζεύγος εικόνων παρουσιάζει μέση μοντελοποιημένη συνοχή 0.97 και βασική κάθετη γραμμή -15.54 m, με χρονική διαφορά 12 ημερών.



Εικόνα 14 Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων των τιμών μετατόπισης για την ευρύτερη περιοχή του Δαμασίου

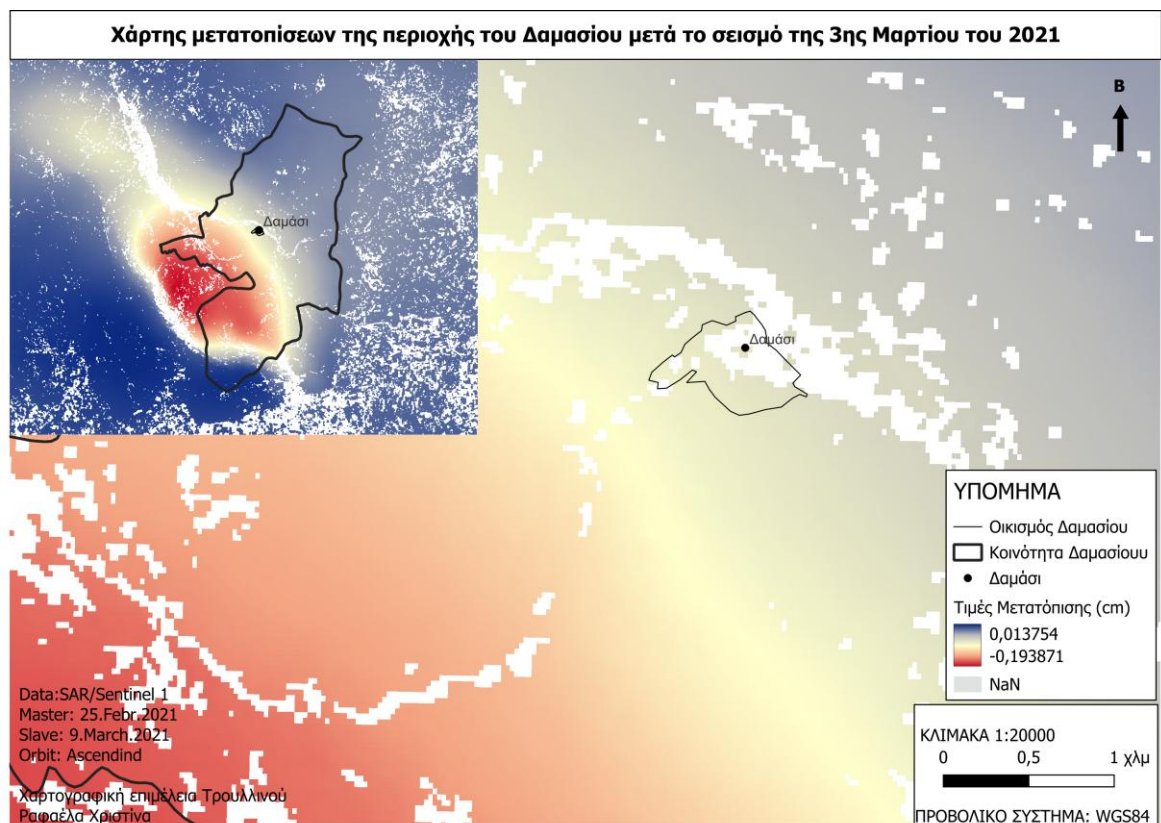
Η περιοχή του Δαμασίου στη Θεσσαλία επηρεάστηκε έντονα από τον σεισμό που σημειώθηκε στις 3 Μαρτίου 2021. Μετά το γεγονός, εφαρμόστηκε η μέθοδος InSAR για να εντοπιστούν και να μετρηθούν οι πιθανές εδαφικές μεταβολές που προκλήθηκαν από τη σεισμική δραστηριότητα στην πληγείσα περιοχή.

Η ανάλυση έδειξε ότι το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής παρουσίασε αρνητικές μετατοπίσεις, δηλαδή καθιζήσεις της επιφάνειας του εδάφους (χάρτης 3).

Τα στατιστικά που εξάχθηκαν από την επεξεργασία των δεδομένων περιλαμβάνουν τα ακόλουθα (εικόνα 15):

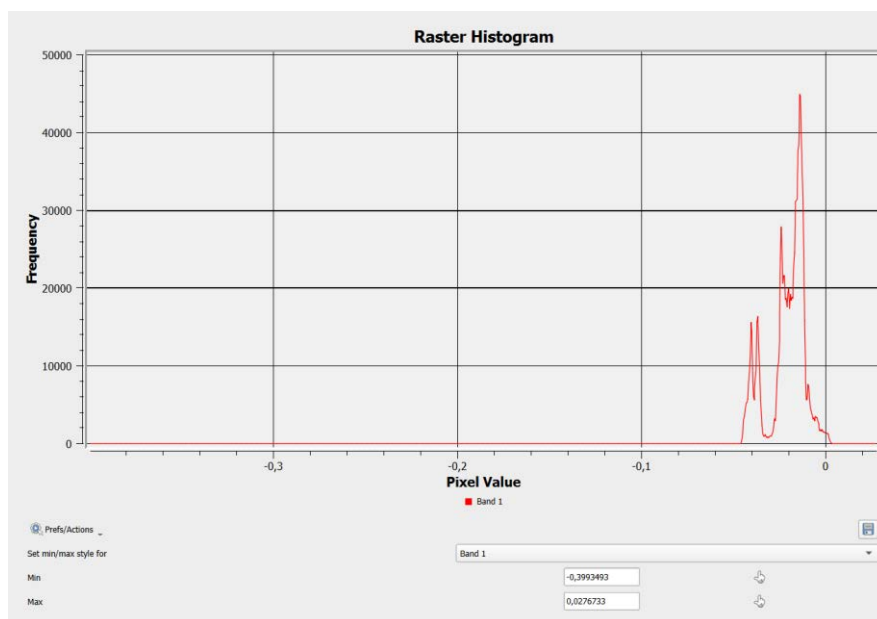
- Μέσοόρο μετακίνησης, όπου η αρνητική τιμή του, δείχνει ότι η καθίζηση ήταν το κυρίαρχο φαινόμενο που υπέστη η πληγείσα περιοχή.
- Τυπική απόκλιση, που δείχνει ότι υπήρχε διακύμανση στις τιμές, με κάποιες περιοχές να παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερες μετατοπίσεις από άλλες.





Χάρτης 3 Χάρτης μετατοπίσεων της περιοχής Δαμασίου

Η ανάλυση της μετασεισμικής παραμόρφωσης στην περιοχή του Δαμασίου όπως αποτυπώνεται στον χάρτη μετατοπίσεων που προέκυψε αποκαλύπτει καθίζηση εντός των ορίων της κοινότητας με μέγιστη τιμή αρνητικής μετατόπισης στα  $-0,399349\text{cm}$ . Μέσα στα όρια του οικισμού οι τιμές κυμαίνονται περίπου από  $-0,135738$  μέχρι και  $-0,162551$  ενώ κυκλικά στα όρια της κοινότητας οι τιμές κυμαίνονται από  $-0,0329467$  μέχρι και  $-0,350248$ . Παρατηρείται ότι ο ίδιος ο οικισμός έχει υποστεί σχετικά μικρότερη επίδραση από το φαινόμενο αντίθετα με την κοινότητα του Δαμασίου που εκεί εντοπίζονται οι μεγαλύτερες τιμές καθιζήσεων και καταγράφονται κυρίως στη νοτιοδυτική πλευρά.



Εικόνα 15 Ιστόγραμμα συχνότητας περιοχής Δαμασίου

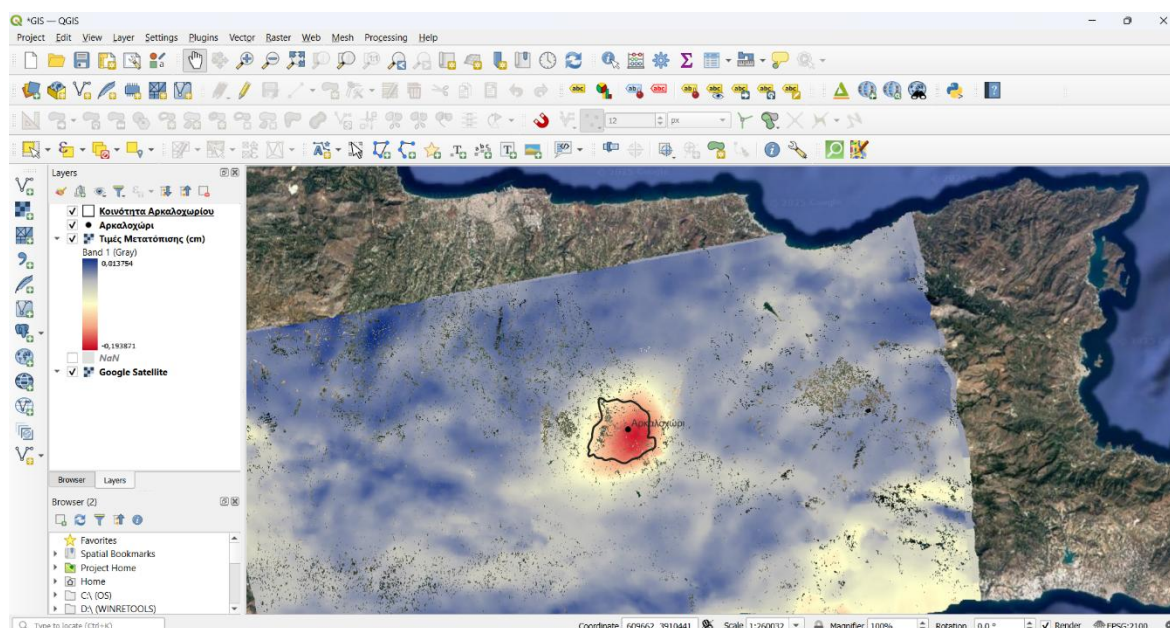
Οι παραμορφώσεις του εδάφους που καταγράφηκαν σχετίζονται άμεσα με το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης και με τη σεισμική διατάραξη των γεωλογικών σχηματισμών που βρίσκονται κάτω από την περιοχή. Το νότιο τμήμα του οικισμού του Δαμασίου φαίνεται να έχει επηρεαστεί περισσότερο, παρουσιάζοντας έντονη καθίζηση, πιθανώς λόγω της ενεργοποίησης τοπικών ρηγμάτων ή των χαλαρών γεωλογικών στρωμάτων που βρίσκονται κάτω από τον οικισμό.

Στην περίπτωση του Δαμασίου, είναι αποδεδειγμένες εκ των υστέρων, κάποιες από τις επιπτώσεις του σεισμού. Άμεσα, με μια απλή επίσκεψη στην πληγείσα περιοχή, παρατηρώντας τις σοβαρές βλάβες στο οικιστικό δίκτυο με ζημιές σε σχολεία, κατοικίες και άλλα κτίρια καθώς και στο ίδιο το περιβάλλον, παρατηρώντας τις μεταβολές στο χώρο και την μορφολογία του εδάφους (διαρρήξεις, ρωγμές, κατολισθήσεις, ρευστοποιήσεις κα). Παράλληλα, εκτός από την επιτόπια παρατήρηση, μπορούμε να εντοπίσουμε μεταβολές στο χώρο και με τη χρήση δορυφορικών μετρήσεων της περιοχής, όπως και έγινε στην συγκεκριμένη περίπτωση, όπου εντοπίσαμε και μελετήσαμε τη καθίζηση του εδάφους, όπου σε αυτήν την κλίμακα, σαφώς και είναι ικανή να προκαλέσει και σοβαρές ζημιές σε κατοικίες, δρόμους και δίκτυα υποδομής.

Η μέθοδος InSAR επιτρέπει την παρακολούθηση τέτοιων φαινομένων με μεγάλη ακρίβεια και ασφάλεια, χωρίς να απαιτείται επιτόπια μέτρηση, κάτι που είναι κρίσιμο ειδικά σε περιοχές που έχουν ήδη υποστεί φυσικές καταστροφές.

#### 4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙΟΥ

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την περιοχή του Αρκαλοχωρίου, μετά την διαδικασία οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων των τιμών μετατόπισης (εικόνα 16), με ζεύγος εικόνων Sentinel-1 περιλαμβάνει τις λήψεις της 23<sup>ης</sup> και της 29<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2021, με την τελευταία να χρησιμοποιείται ως εικόνα αναφοράς. Η χρονική απόσταση μεταξύ των δύο εικόνων είναι 6 ημέρες, γεγονός που συνεισφέρει στον περιορισμό της διαφοράς φάσης λόγω αλλαγών στην επιφάνεια.



Εικόνα 16 Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων των τιμών μετατόπισης για την ευρύτερη περιοχή του Αρκαλοχωρίου

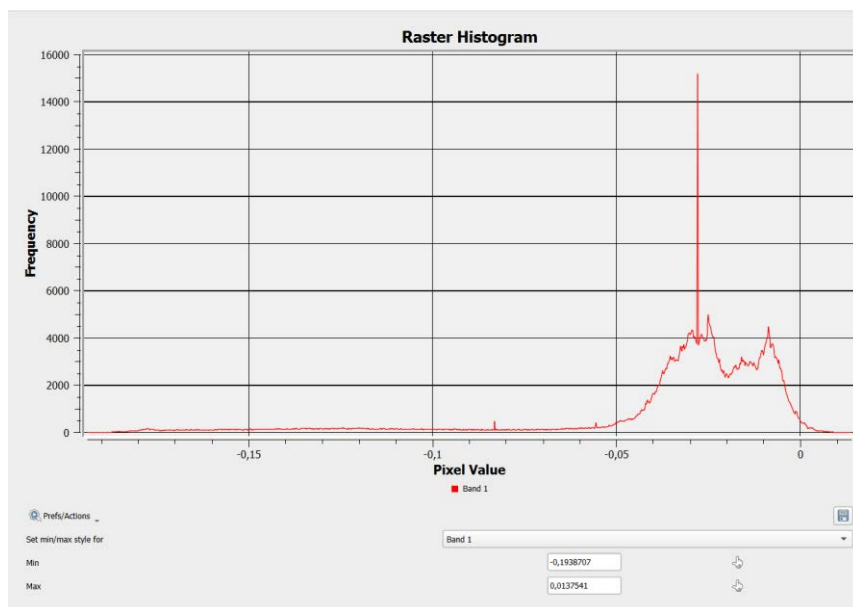
Μετά τον ισχυρό σεισμό της 27ης Σεπτεμβρίου 2021 που έπληξε την περιοχή του Αρκαλοχωρίου στην Κρήτη, η δορυφορική επεξεργασία με τη μέθοδο DInSAR ανέδειξε εκτεταμένες μετατοπίσεις του εδάφους, οι οποίες σχετίζονται άμεσα με το σεισμικό γεγονός. Η τεχνική DInSAR βασίζεται σε διαφορές φάσης μεταξύ δορυφορικών εικόνων πριν και μετά τον σεισμό και επιτρέπει την ποσοτική αποτύπωση των μεταβολών του εδάφους με ακρίβεια χιλιοστών έως εκατοστών.

Τα αποτελέσματα για την περιοχή του Αρκαλοχωρίου αποκάλυψαν έντονες καθιζήσεις, με τιμές μετατόπισης που κυμάνθηκαν από μικρές μεταβολές έως και -17,9cm, ένδειξη σοβαρής παραμόρφωσης του εδάφους (χάρτης 4).

Από τη στατιστική επεξεργασία προκύπτουν τα εξής (εικόνα 17):

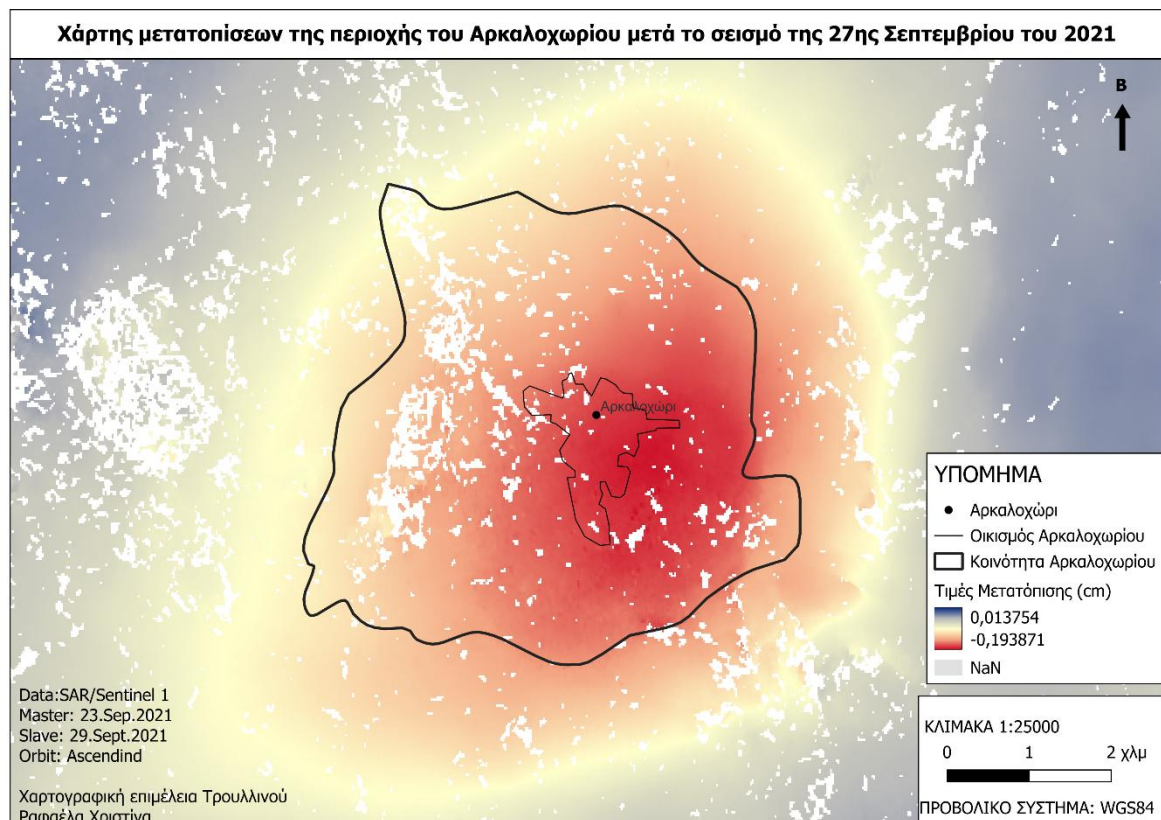
- Ο μέσος όρος μετακίνησης ήταν επίσης αρνητικός, γεγονός που καταδεικνύει ότι η καθίζηση κυριάρχησε σε όλη την περιοχή μελέτης.

- Υπάρχει τυπική απόκλιση που δείχνει σημαντική διακύμανση της καθίζησης από ήπιες μετατοπίσεις μέχρι έντονα φαινόμενα κοντά στο ρήγμα.
- Η μέγιστη καθίζηση καταγράφηκε περίπου στα -17,9cm, σε περιοχές πιθανόν εγγύτερα στο επίκεντρο ή σε ζώνες με χαλαρά εδάφη και έντονη παραμόρφωση.



Εικόνα 17 Ιστόγραμμα συχνότητας περιοχής Αρκαλοχωρίου





Χάρτης 4 Χάρτης μετατοπίσεων της περιοχής Αρκαλοχωρίου

Η ανάλυση της μετασεισμικής παραμόρφωσης στην περιοχή του Αρκαλοχωρίου όπως αποτυπώνεται στον χάρτη μετατοπίσεων που προέκυψε αποκαλύπτει καθίζηση εντός των ορίων της κοινότητας με μέγιστη τιμή αρνητικής μετατόπισης στα  $-0,193871\text{cm}$ . Μέσα στα όρια του οικισμού του Αρκαλοχωρίου οι τιμές κυμαίνονται περίπου από  $-0,158098$  μέχρι και  $-0,186376$  ενώ κυκλικά στα όρια της κοινότητας οι τιμές κυμαίνονται από  $-0,107642$  έως και  $-0,157282$  με το φαινόμενο να καλύπτει σχεδόν το σύνολο του οικιστικού ιστού. Στην περιοχή του Αρκαλοχωρίου, οι μεγαλύτερες τιμές καθιζήσεων εντοπίζονται κυρίως στο κέντρο του οικισμού καθώς και στην ευρύτερη κοινότητα, ενώ σημαντικές καθιζήσεις παρατηρούνται και ανατολικά της κοινότητας. Συνολικά, στο μεγαλύτερο μέρος του χάρτη, οι καθιζήσεις καλύπτουν ολόκληρο το εύρος τόσο του οικισμού όσο και της κοινότητας.

Οι μεταβολές αυτές δηλώνουν μετακίνηση της επιφάνειας μακριά από τον δορυφόρο, γεγονός που υποδηλώνει κάθετες εδαφικές παραμορφώσεις ή/και οριζόντια μετατόπιση με συνιστώσα κατά τη διεύθυνση παρατήρησης. Αυτές αποδίδονται σε σεισμική θραύση του υπεδάφους, σε τοπική υποχώρηση ή συμπίεση του εδαφικού όγκου και σε γεωλογικές συνθήκες που ευνοούν την καθίζησή τους νεογενή ιζήματα, αποσαθρωμένα πετρώματα ή περιοχές με αυξημένο υδροφορτίο.

Οι καθιζήσεις, ειδικά σε κατοικημένες περιοχές και κοντά σε υποδομές, μπορούν να οδηγήσουν σε ρωγμές, παραμορφώσεις ή ακόμα και καταρρεύσεις. Για τον λόγο αυτό, η αποτύπωσή τους μέσω της τεχνικής DInSAR αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για την πρόληψη,

τη μετασεισμική αποκατάσταση και τον αντισεισμικό σχεδιασμό από φορείς πολιτικής προστασίας, μηχανικούς και γεωτεχνικούς επιστήμονες.

#### 4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Συγκριτικά, τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις περιοχές του Δαμασίου και του Αρκαλοχωρίου παρουσιάζουν ορισμένες αξιοσημείωτες διαφοροποιήσεις, τόσο ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ζευγών εικόνων όσο και ως προς τη συνοχή των δεδομένων. Στην περίπτωση του Δαμασίου, το ζεύγος εικόνων της 25ης Φεβρουαρίου και 9ης Μαρτίου 2021 παρουσίασε εξαιρετικά χαμηλή βασική κάθετη γραμμή ( $B_{\text{ref}} = -15.54$  m) και πολύ υψηλή μοντελοποιημένη συνοχή (0.97), γεγονός που ενισχύει την ακρίβεια στην εξαγωγή εδαφικών μετακινήσεων. Αντίθετα, στο Αρκαλοχώρι, το ζεύγος της 23ης και 29ης Σεπτεμβρίου 2021 εμφάνισε μεγαλύτερη βασική γραμμή ( $B_{\text{ref}} = 111.36$  m) και ελαφρώς μειωμένη συνοχή (0.90), χωρίς ωστόσο να υποβαθμίζεται η αξιοπιστία του αποτελέσματος. Επιπλέον, το Δαμάσι αξιοποιεί μεγαλύτερη χρονική διαφορά (12 ημέρες) συγκριτικά με το Αρκαλοχώρι (6 ημέρες), κάτι που ενδέχεται να επιτρέπει την αποτύπωση μεγαλύτερων μεταβολών, εφόσον η συνοχή παραμένει επαρκής.

Το Αρκαλοχώρι της Κρήτης επλήγη από σεισμό μεγέθους 6,0 Ρίχτερ στις 27 Σεπτεμβρίου 2021. Ο σεισμός αυτός είχε ρηχό εστιακό βάθος (~10χλμ) και τοπικό χαρακτήρα, με επίκεντρο πολύ κοντά στον οικισμό. Αντίστοιχα, το Δαμάσι, στον θεσσαλικό κάμπο, επηρεάστηκε από τον σεισμό των 6,3 Ρίχτερ στις 3 Μαρτίου 2021, με μεγαλύτερη διάρκεια και ευρύτερο πεδίο επιρροής, καθώς ενεργοποιήθηκε μεγαλύτερο μήκος ρήγματος. Και οι δύο περιοχές βρίσκονται πάνω σε ενεργά τεκτονικά ρήγματα και παρουσιάζουν ιστορικό έντονης σεισμικότητας.

Οι εδαφικές μετατοπίσεις στην περιοχή του Αρκαλοχωρίου κυμαίνονται από ήπιες έως έντονες καθιζήσεις, φτάνοντας έως και περίπου -19,4cm. Ο μέσος όρος μετακίνησης εκτιμάται γύρω στα -5,0cm, υποδηλώνοντας μια γενικευμένη καθίζηση στην περιοχή. Η τυπική απόκλιση, που φτάνει τα 3,7cm, δείχνει σημαντική χωρική μεταβλητότητα, με τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις να εντοπίζονται πιθανώς κοντά σε ενεργές ρηξιγενείς ζώνες ή σε γεωλογικά ευαίσθητα πεδία.

Από γεωμορφολογική σκοπιά, οι καθιζήσεις εμφανίζονται περιμετρικά του σεισμικού επίκεντρου, κυρίως σε αγροτικές και ημι-αστικές περιοχές, και είναι πιθανό να συνδέονται με φαινόμενα τοπικής συμπίεσης των εδαφικών στρωμάτων ή και με ανθρωπογενείς παρεμβάσεις (π.χ. επιχωματώσεις, υπόγειες κατασκευές).

Στην περιοχή του Δαμασίου, οι μετατοπίσεις είναι εντονότερες και εντοπισμένες, φτάνοντας έως και περίπου -39,9cm. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την ύπαρξη σημαντικής καθίζησης, κυρίως στο νότιο τμήμα της περιοχής. Η αυξημένη τυπική απόκλιση μαρτυρά την παρουσία τοπικών παραμορφώσεων, ιδιαίτερα σε γεωλογικά ευάλωτα περιβάλλοντα, όπως χαλαρά ιζήματα ή παλιές ποτάμιες αποθέσεις.



Η καθίζηση στο Δαμάσι είναι πιο συγκεντρωμένη, σε πεδινές εκτάσεις με ιστορική ιζηματογένεση και υδρογεωλογικές ιδιαιτερότητες, που υποχωρούν πιο εύκολα έπειτα από σεισμική καταπόνηση

Οι καταστροφές ήταν ανάλογες των μετακινήσεων. Στο Αρκαλοχώρι, υπέστησαν σοβαρές βλάβες παλαιά κτίρια και ναοί, ενώ στο Δαμάσι καταγράφηκαν καθιζήσεις σε θεμέλια κτιρίων και σοβαρές ζημιές σε σχολικές μονάδες, με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα το δημοτικό σχολείο του χωριού.

Η χρήση της τεχνικής DInSAR αποδείχθηκε πολύτιμη για την αποτύπωση αυτών των μετατοπίσεων, καθώς επιτρέπει την ταχεία και αξιόπιστη χαρτογράφηση της σεισμικής επίδρασης χωρίς ανάγκη επιτόπιων μετρήσεων. Η περιοχή του Δαμασίου εμφάνισε εντονότερη καθίζηση και μεγαλύτερη γεωδυναμική αστάθεια, σε σύγκριση με το Αρκαλοχώρι, όπου οι μετατοπίσεις ήταν πιο ήπιες και γεωγραφικά διασκορπισμένες. Αυτή η διαφορά πιθανότατα οφείλεται τόσο στη διαφορετική γεωλογική σύσταση (π.χ. ιζήματα στον θεσσαλικό κάμπο), όσο και στα χαρακτηριστικά του σεισμικού επεισοδίου (διάρκεια, βάθος, επιφάνεια ρήγματος).

Η τεχνική InSAR αποδείχθηκε εξαιρετικά χρήσιμη και στις δύο περιπτώσεις, προσφέροντας πλήρη και λεπτομερή εικόνα των εδαφικών μεταβολών, απαραίτητη για επιστημονική έρευνα, πολιτική προστασία και αποκατάσταση μετά από σεισμούς.

## 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 5.1 ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Τα συστήματα ραντάρ, σε αντίθεση με τα παθητικά δορυφορικά συστήματα έχουν ένα βασικό πλεονέκτημα: έχουν αυτόνομο σύστημα εκπομπής της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας σε σχετικά μεγάλα μήκη κύματος. Αυτό σημαίνει ότι δεν εξαρτώνται από το φως του ήλιου ή τις καιρικές συνθήκες για να καταγράψουν δεδομένα. Εκπέμποντας ηλεκτρομαγνητικά κύματα (μικροκύματα) και καταγράφοντας την ακτινοβολία που επιστρέφει πίσω στην κεραία, αλληλοεπιδρά με την επιφάνεια της Γης με αποτέλεσμα οι καταγραφές να μπορούν να γίνονται οποιαδήποτε ώρα της ημέρας ή της νύχτας, ακόμα και σε συνθήκες συννεφιάς, βροχής ή καπνού, όπου τα οπτικά συστήματα δεν μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά.

Οι εικόνες ραντάρ παρουσιάζουν ένα πολύ μεγάλο πλεονέκτημα στη συνεχή παρακολούθηση της επιφάνειας του εδάφους. Αυτό συμβαίνει γιατί η ανάλυση των δεδομένων ραντάρ βασίζεται στη φάση της ακτινοβολίας που επιστρέφει οπότε ακόμη και μικρές αλλαγές στην απόσταση μεταξύ δορυφόρου και επιφάνειας της Γης μπορούν να εντοπιστούν με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια.

Μια από τις πιο προηγμένες εφαρμογές των δεδομένων ραντάρ είναι η διαφορική συμβολομετρία SAR. Η τεχνική αυτή συγκρίνει δύο ή περισσότερες δορυφορικές εικόνες που έχουν ληφθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, περίπου από το ίδιο σημείο, και υπολογίζει τις αλλαγές στη φάση του σήματος. Αυτές αποτυπώνουν παραμορφώσεις του εδάφους, όπως βυθίσεις, ανυψώσεις ή πλευρικές μετακινήσεις, που μπορεί να οφείλονται σε φυσικά φαινόμενα όπως σεισμοί, κατολισθήσεις, ηφαιστειακή δραστηριότητα ή ανθρώπινες παρεμβάσεις.

Η διαφορική συμβολομετρία είναι μια πολύπλοκη τεχνική που απαιτεί βαθιά γνώση πολλών παραμέτρων. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από παράγοντες όπως η επιλογή των δορυφορικών εικόνων, η ποιότητα της συμβολομετρικής συμβατότητας, η γεωμετρία λήψης, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιείται για τη διόρθωση τοπογραφικής φάσης, και άλλες τεχνικές λεπτομέρειες. Σημαντική είναι και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων καθώς χρειάζεται εμπειρία για να κατανοηθεί το γεωδυναμικό πλαίσιο της περιοχής.

Στην παρούσα εργασία αναδείχθηκαν οι δυνατότητες και οι προκλήσεις της διαφορικής συμβολομετρίας. Μέσα από την εφαρμογή της σε πραγματικά παραδείγματα, όπως η σεισμική δραστηριότητα στο Αρκαλοχώρι ή το Δαμάσι, φάνηκε ότι μπορεί να παραγάγει πολύτιμες πληροφορίες για την κατανόηση της μετασεισμικής συμπεριφοράς του εδάφους, συμβάλλοντας σημαντικά στην επιστημονική έρευνα.

Η ακρίβεια και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή της διαφορικής συμβολομετρίας SAR (DInSAR) εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από δύο βασικές παραμέτρους:

- Τη συνοχή (coherence) μεταξύ των εικόνων
- Τη βασική κάθετη γραμμή (perpendicularbaseline) που διαμορφώνεται μεταξύ των δύο λήψεων του δορυφόρου

## 1. Συνοχή (Coherence)

Η συνοχή αναφέρεται στο πόσο “όμοιες” είναι οι πληροφορίες που καταγράφονται από δύο διαφορετικές λήψεις του ίδιου σημείου της Γης. Δείχνει δηλαδή το βαθμό σταθερότητας της ηλεκτρομαγνητικής ανάκλασης ενός στόχου στο έδαφος ανάμεσα σε δύο χρονικές στιγμές. Όταν η συνοχή είναι υψηλή, σημαίνει ότι το σήμα που λαμβάνεται από την ίδια περιοχή δεν έχει αλλάξει πολύ στον χρόνο και επομένως η συμβολομετρική ανάλυση μπορεί να δώσει ακριβή αποτελέσματα για τις μεταβολές του εδάφους.

Η συνοχή επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Για παράδειγμα:

- Αστικά στοιχεία, όπως κτίρια, κατασκευές από σκυρόδεμα ή μεταλλικά αντικείμενα, παρουσιάζουν υψηλή συνοχή, επειδή ανακλούν σταθερά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
- Φυσικές επιφάνειες όπως λιβάδια, χωράφια, δάση ή υδάτινα σώματα παρουσιάζουν χαμηλή συνοχή, καθώς η επιφάνειά τους μεταβάλλεται με τον χρόνο (π.χ. λόγω βλάστησης, ανέμου, υγρασίας ή κυματισμού).
- Επιπλέον, η τοπογραφία της περιοχής, τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά των υλικών (π.χ. υγρασία εδάφους), καθώς και η κάλυψη γης (φυσική ή ανθρωπογενής) επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα της συνοχής.

## 2. Βασικήκάθετηγραμμή (Perpendicular Baseline)

Η βασική γραμμή είναι η γεωμετρική απόσταση ανάμεσα στις θέσεις του δορυφόρου κατά τις δύο λήψεις. Η κάθετη συνιστώσα αυτής της απόστασης (δηλαδή το πόσο ψηλότερα ή χαμηλότερα “βλέπει” ο δορυφόρος στη δεύτερη λήψη σε σχέση με την πρώτη) ονομάζεται βασική κάθετη γραμμή.

Αυτή η παράμετρος παίζει καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα της συμβολομετρικής μέτρησης. Αν η απόσταση αυτή είναι πολύ μικρή, μπορεί να μειωθεί η ευαισθησία στην καταγραφή τοπογραφικών μεταβολών. Αν είναι πολύ μεγάλη, μπορεί να υπάρξει απώλεια συνοχής (decorrelation) και να καταστούν τα δεδομένα άχρηστα για ακριβή υπολογισμό της μετατόπισης.

Επομένως, για να είναι επιτυχής η τεχνική της διαφορικής συμβολομετρίας, απαιτείται μία ισορροπημένη γεωμετρία δορυφορικών λήψεων, με κατάλληλη βασική γραμμή και υψηλή συνοχή των περιοχών ενδιαφέροντος.

Στο πλαίσιο της διαφορικής συμβολομετρίας, η απόσταση μεταξύ των δύο λήψεων του δορυφόρου επηρεάζει άμεσα τη φύση και την ακρίβεια των μετρήσεων. Συγκεκριμένα:

- Μεγάλες βασικές κάθετες γραμμές είναι χρήσιμες όταν ο στόχος είναι η χαρτογράφηση της τοπογραφίας μέσω της δημιουργίας ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM). Σε αυτή την περίπτωση, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά θέσης του δορυφόρου στις δύο λήψεις, τόσο πιο έντονη είναι η τοπογραφική "υπογραφή" στο συμβολομετρικό σήμα, και επομένως τόσο ακριβέστερη είναι η απεικόνιση του αναγλύφου.
- Αντιθέτως, μικρές βασικές κάθετες γραμμές προτιμώνται για την ανάλυση εδαφικών παραμορφώσεων (όπως καθιζήσεις ή μετασεισμικές κινήσεις), αφού σε αυτή την περίπτωση απαιτείται να έχει αφαιρεθεί η τοπογραφική συνιστώσα από την παρεμβολή. Η αφαίρεση αυτή γίνεται με τη χρήση ενός διαθέσιμου μοντέλου εδάφους, και όσο πιο ακριβές είναι το DEM, τόσο λιγότερο επηρεάζονται τα αποτελέσματα της τελικής ανάλυσης. Η επιλογή της κατάλληλης βασικής γραμμής, λοιπόν, αποτελεί κρίσιμο στάδιο στον σχεδιασμό της συμβολομετρικής προσέγγισης.

Παρόλα αυτά, υπάρχουν και ορισμένοι παράγοντες που επιδρούν αρνητικά στη συνοχή των εικόνων και μπορούν να προκαλέσουν σφάλματα ή μείωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Οι σημαντικότεροι είναι οι εξής:

- Η χρονική αποσυσχέτιση (temporaldecorrelation): Όσο μεγαλύτερο είναι το χρονικό διάστημα ανάμεσα στις δύο λήψεις, τόσο πιο πιθανό είναι να έχουν σημειωθεί αλλαγές στην επιφάνεια του εδάφους, επηρεάζοντας τη σταθερότητα του σήματος. Για παράδειγμα, η σύγκριση μιας εικόνας του Ιανουαρίου με μια εικόνα του Μαΐου συχνά παρουσιάζει χαμηλή συνοχή, εξαιτίας των εποχιακών μεταβολών στη βλάστηση, την υγρασία ή την κάλυψη του εδάφους.
- Οι φυσικές μεταβολές του περιβάλλοντος: Φαινόμενα όπως έντονες βροχοπτώσεις, χιονοκάλυψη ή παγετός μπορούν να αλλάξουν δραστικά τα χαρακτηριστικά ανάκλασης της επιφάνειας και να μειώσουν τη συνοχή ανάμεσα στις εικόνες. Αυτές οι αλλαγές επηρεάζουν κυρίως τις περιοχές με φυσική κάλυψη, σε αντίθεση με αστικές ή σταθερές κατασκευές, που παραμένουν πιο "συνεπείς" στο χρόνο.

## 5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ RANDAR

Ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών μπορεί να υλοποιηθεί αξιοποιώντας τα δεδομένα ραντάρ, καθιστώντας τα ένα από τα πιο ισχυρά εργαλεία της δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Ενδεικτικά, κάποιες από τις σημαντικότερες εφαρμογές περιλαμβάνουν:

| Κατηγορία                                 | Εφαρμογές                                                                                                                            |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Γεωμορφολογία / Τοπογραφία</b>         | - Δημιουργία υψηλής ανάλυσης ψηφιακού μοντέλου εδάφους                                                                               |
| <b>Γεωδυναμικά φαινόμενα</b>              | - Εντοπισμός εδαφικών παραμορφώσεων- Ανάλυση σεισμών- Ανάλυση πλημμύρων                                                              |
| <b>Υδρολογία / Περιβάλλον</b>             | - Εκτίμηση υγρασίας εδάφους- Χαρτογράφηση & παρακολούθηση υδάτινων σωμάτων                                                           |
| <b>Δασικά / Φυσικές καταστροφές</b>       | - Χαρτογράφηση πυρκαγιών- Παρακολούθηση δασών- Εκτίμηση βιομάζας                                                                     |
| <b>Γεωργία / Αγροτική ανάπτυξη</b>        | - Παρακολούθηση αγροτικού τομέα- Ταξινόμηση καλλιεργειών                                                                             |
| <b>Αστικός χώρος</b>                      | - Παρακολούθηση και ανάπτυξη αστικού ιστού                                                                                           |
| <b>Αλλαγές χρήσεων γης</b>                | - Εντοπισμός αλλαγών κάλυψης/χρήσεων γης                                                                                             |
| <b>Θαλάσσιο περιβάλλον / Ωκεανογραφία</b> | - Παρακολούθηση ωκεανών- Εντοπισμός και παρακολούθηση πετρελαιοκηλίδων- Εντοπισμός πλοίων- Παρακολούθηση ανέμων- Παρακολούθηση πάγων |

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω εφαρμογές δεν προκύπτουν αποκλειστικά από τη χρήση της συμβολομετρίας (InSAR ή DInSAR), αλλά από ένα ευρύτερο σύνολο τεχνικών επεξεργασίας δεδομένων ραντάρ.

Συνοψίζοντας, η ραντάρ τηλεπισκόπηση αναδεικνύεται ως ένας τομέας συνεχούς επιστημονικής και τεχνολογικής εξέλιξης, με επίκεντρο την παρακολούθηση, καταγραφή και κατανόηση της γήινης επιφάνειας. Οι τεχνολογικές δυνατότητες που προσφέρονται σήμερα μέσω δωρεάν δορυφορικών δεδομένων, καθώς και τα συνεχώς εξελισσόμενα αναλυτικά εργαλεία, δημιουργούν ένα νέο πεδίο ευκαιριών για επιστήμονες, ερευνητές και φορείς λήψης αποφάσεων, ειδικά σε χώρες όπως η Ελλάδα που καλούνται να αντιμετωπίσουν ποικίλους γεωφυσικούς κινδύνους και περιβαλλοντικές προκλήσεις.

Στην Ελλάδα, η επιστήμη της τηλεπισκόπησης δεν έχει ακόμη εδραιωθεί στον βαθμό που παρατηρείται σε ανεπτυγμένες χώρες του εξωτερικού, ούτε χαρακτηρίζεται από την ίδια δυναμική εξέλιξη. Ένας από τους κύριους λόγους για αυτή τη στασιμότητα ενδέχεται να είναι η μέχρι πρότινος περιορισμένη προσβασιμότητα σε δορυφορικά δεδομένα υψηλής ποιότητας, τα οποία συχνά συνοδεύονται από υψηλό κόστος απόκτησης και ανάγκη εξειδικευμένης τεχνογνωσίας.

### 5.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Οι σύγχρονες εξελίξεις στον τομέα των ανοικτών δεδομένων και ιδιαίτερα η πρωτοβουλία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA), μέσω του προγράμματος Copernicus και της σειράς αποστολών Sentinel, έχουν φέρει μεγάλες αλλαγές στον τομέα

αυτό. Η δωρεάν και απεριόριστη διάθεση δεδομένων υψηλής ανάλυσης, σε συνδυασμό με την πληθώρα εργαλείων ανοιχτού λογισμικού, δημιουργεί ένα νέο περιβάλλον ευκαιριών για επιστημονική και τεχνολογική πρόοδο στον ελληνικό χώρο.

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, τα πανεπιστημιακά και ερευνητικά ιδρύματα της χώρας μπορούν να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στην προώθηση και διάδοση της τηλεπισκόπησης, τόσο στον ακαδημαϊκό χώρο όσο και σε κρατικούς φορείς και την αγορά εργασίας. Μέσα από την ανάπτυξη προγραμμάτων σπουδών, ερευνητικών έργων και τη συνεργασία με διεθνή κέντρα, η Ελλάδα μπορεί να επιτύχει συγκρίσιμη πρόοδο με χώρες που έχουν ήδη ενσωματώσει τις δορυφορικές τεχνολογίες στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία συμβάλει και στην ανάδειξη της δορυφορικής τηλεπισκόπησης, και ιδιαίτερα των τεχνικών ραντάρ (SAR, InSAR, DInSAR), ως πολύτιμου εργαλείου για την παρακολούθηση γεωδυναμικών φαινομένων και κρίσιμων τεχνικών έργων υποδομής, όπως φράγματα, οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα. Η δυνατότητα συνδυασμού των δορυφορικών δεδομένων με επίγειες μετρήσεις (π.χ. GNSS, γεωδαιτικά δίκτυα, αισθητήρες παρακολούθησης) ενισχύει τη συνολική ακρίβεια και λειτουργικότητα της παρακολούθησης.

Η ελεύθερη πρόσβαση σε δεδομένα Sentinel-1 μέσω του Copernicus, σε συνδυασμό με το ανοιχτό λογισμικό (π.χ. SNAP) δίνει πλέον τη δυνατότητα υλοποίησης τέτοιων αναλύσεων ακόμη και σε ακαδημαϊκά και ερευνητικά περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους. Η μελέτη αυτή, μέσα από θεωρητική τεκμηρίωση και εφαρμογή σε ελληνικές συνθήκες, επιδιώκει να ενισχύσει τη σύνδεση μεταξύ της επιστημονικής γνώσης και της ανάγκης για βιώσιμη και αξιόπιστη τεχνική παρακολούθηση, συμβάλλοντας στη μετάβαση προς μια ψηφιακά υποστηριζόμενη διαχείριση έργων υποδομής στην Ελλάδα.



## ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αρτινού Μαρία Ελένη. (2011). Οι Επιπτώσεις Υγείας των Μεγάλων Σεισμών στον Ελλαδικό Χώρο την Τελευταία Πενητακονταετία,, Επιβλέπων καθηγητής Παπαϊωάννου Κωνσταντίνος, Τμήμα Πολιτικής Προστασίας, Εθνική Σχολή Τοπικής Αυτοδιοίκησης Εθνικό Κέντρο Δημόσιας διοίκησης και Αυτοδιοίκησης, Αθήνα.
- Ατζαράκη Άννα. (2019). 3D Χαρτογράφηση μεταβολών οικισμού Βρίσας με μεθόδους γεωπληροφορική, Επιβλέπουσα Καθηγήτρια Ρούσσου Όλγα, Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Αιγαίου Σχολή Κοινωνικών Επιστημών Τμήμα Γεωγραφίας, Μυτιλήνη.
- Βασιλείου Δημήτριος. (2011). Η επίδραση της παρουσίας σήραγγας στην σεισμική απόκριση υπερκείμενων κατασκευών, Επιβλέπων Καθηγητής Σπυράκος Κ., Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Δομοστατικός Τομέας Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Αθήνα.
- Γαρυφαλλίδης Σ., & Ρουμελιώτης Θ., Σύγχρονες Μέθοδοι Πρόγνωσης Σεισμών, Επιβλέπων Καθηγητής Κλείδης Κ., Πτυχιακή Εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Σερρών Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Μηχανολογίας.
- Δούτσος, Θ. (2000). Γεωλογία: Αρχές και Εφαρμογές. Αθήνα: Εκδόσεις Liberal Books.
- Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών – Γεωδυναμικό Ινστιτούτο. (<https://www.noa.gr/>)
- Θανάση Ευσταθία. (2020). Σεισμοί και επιπτώσεις στις δομικές κατασκευές στην περιοχή του Λουτρακίου του νομού Κορινθίας, Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Στρατηγικές Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Καταστροφών & Κρίσεων, Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών Σχολή Θετικών Επιστημών Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος, Αθήνα.
- Κάβουρας Μ., Δάρρα Α., Κόκλα Μ., Κονταξάκη Σ., Πανόπουλος Γ., Τομαή Ε., Επιστήμη Γεωγραφικής Πληροφορικής, Ολοκληρωμένη Προσέγγιση και Ειδικά Θέματα, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κανακάκη Σταυρούλα. (2012). Μελέτη του σεισμού της 12<sup>ης</sup> Ιανουαρίου στην Αϊτή (Ισπανιόλα) και των επιπτώσεων αυτού στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον, Επιβλέπων καθηγητής Παρχαρίδης Ισαάκ, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών - Τμήμα Γεωγραφίας Πρόγραμμα Προπτυχιακών Σπουδών, Αθήνα.
- Κασκαρά Μαρία Β. (2015). Διαχρονική Συμβολομετρία Ραντάρ για την εκτίμηση ρυθμών παραμόρφωσης στην περιοχή της Δυτικής Κρήτης για την χρονική περίοδο 1992-2001. Σύγκριση με δεδομένα GPS., Διπλωματική εργασία, Επιβλέπων καθηγητής Παραδείσης Δημήτρης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Τομέας Τοπογραφίας – Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας, Αθήνα.

- Κουρουζίδης Μωυσής, (2003), Μελέτη των σεισμικών ακολουθιών στην Ελλάδα και η συμβολή της στην πρόγνωση των σεισμών, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωφυσικής, Θεσσαλονίκη.
- Λαζάρου Εμμανουήλ. (2019). Εκτίμηση υδατικού αποτυπώματος των καλλιεργειών στην δημοτική ενότητα της Λάρισας, επιβλέπων καθηγητής Τσιχριτζής Βασίλειος καθηγητής Ε.Μ.Π, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Τομέας έργων υποδομής και Αγροτικής ανάπτυξης.
- Λέκκας Ευθύμιος Α. (2000). Φυσικές και τεχνολογικές καταστροφές, Κεφάλαιο 10 Σεισμοί, Αθήνα.
- Λέτσιος Βασίλης. (2017). Δεδομένα Ραντάρ: ανάλυση επιφανειακών εδαφικών παραμορφώσεων μέσω συμβολομετρίας στην ευρύτερη περιοχή της λίμνης Κάρλας, Επιβλέπων καθηγητής Περάκης Κων/νος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Πολυτεχνική Σχολή Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας & Περιφερειακής Ανάπτυξης, ΠΜΣ: Χωρική Ανάλυση Και Διαχείριση Περιβάλλοντος, Βόλος.
- Λέτσιος Βασίλης Γ., (2023), Η αστική Εξάπλωση Μέσω Συμβολομετρίας, Διδακτορική Διατριβή, Επιβλέπων Καθηγητής Δημήτρης Σταθάκης Καθηγητής ΤΜΧΠΠΑ, Π.Θ., Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης, Δεκέμβριος Βόλος.
- Λιαδάκη Χριστίνα. (2023). Αποτίμηση σεισμικής συμπεριφοράς σεισμόπληκτου κτιρίου μετά τον σεισμό στο Αρκαλοχώρι, Κρήτη (27/09/21), Επιβλέπων καθηγητής Ρέπαλης Κωνσταντίνος, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής Σχολή Μηχανικών Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα.
- Λουμάνη Ευγενία. (2017). Αρχαιοσεισμολογία και τοπογραφία: Η περίπτωση του αρχαίου θεάτρου Πατρών και της Αρχαίας Κορίνθου, Επιβλέπων Καθηγητής Λυκουργιώτης Σ., Πτυχιακή εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε., Πάτρα.
- Μακρόπουλος Κώστας. (2006). Φυσικές Καταστροφές: Σεισμοί και μέτρα προστασίας, 15<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 25-27 Οκτωβρίου, Αλεξανδρούπολη.
- Μαργαρίτης Παρασκευάς, Αλ. (2022). Διαχρονική Παρακολούθηση Εδαφικής Τρωτότητας με την Χρήση Συμβολομετρίας από δορυφόρους RADAR: Η περίπτωση της Παλαιάς Πόλης Ναυπλίου. Πτυχιακή εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.
- Μπαλλάς Γεώργιος. (2019). Μελέτη παραμορφώσεων με χρήση διαχρονικής συμβολομετρίας SAR στην περιοχή των Κυθήρων, Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτρης Παραδείσης Καθηγητής Ε.Μ.Π, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων Και Τοπογράφων Μηχανικών Τομέας Τοπογραφίας Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας, Αθήνα.

- Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.), (2017). Περί Σεισμών, Υπουργείο Κλιματικής Κρίσης και Πολιτικής Προστασίας, Αθήνα.
- Παπαδόπουλος Γεώργιος. (2023). Χρήσεις του Copernicus API στην Επιχειρηματική Αναλυτική, επιβλέπον καθηγητής Ταραμπάνης Κωσταντίνος, Τμήμα Οργάνωσης και Διοίκησης Επιχειρήσεων, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Αναλυτική των Επιχειρήσεων και Επιστήμη των Δεδομένων
- Παπαζάχος, Β., & Παπαζάχου, Κ. (1999). Οι σεισμοί της Ελλάδας. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.
- Περάκης Κωνσταντίνος Γ., Ιωάννης Ν. Φαρασλής, Αθανάσιος Κ. Μουσιαδής. (2015). Η Τηλεπισκόπηση σε 13 Ενότητες, Θεωρία, Μέθοδοι και Εφαρμογές, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα.
- Τζωρτζάκης Ιωάννης. (2016). Εφαρμογές Γεωπληροφορικής Στα Τεχνικά Έργα, Ηράκλειο.

## ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bamler, R., & Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. Inverse problems, 14(4), R1.
- Chen, C.W., & Zebker, H.A. (2001). Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization. JOSA A, 18(2), 338–351
- ESA (2023). Sentinel Application Platform (SNAP) – User Manual. European Space Agency. (<https://step.esa.int/>)
- European Space Agency (ESA). 'Sentinel-1 Overview'. ([https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-1](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1))
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. Transactions on Geoscience and Remote Sensing.
- Hanssen, R. F. (2001). Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis.
- Kalavrezou Ioanna-Efstathia, Ignacio Castro-Melgar, Spyros Lalechos and Issaak Parcharidis, Dimitra Nika, Theodoros Gatsios. (2024). Application of Time Series InSAR (SBAS) Method Using Sentinel-1 for Monitoring Ground Deformation of the Aegina Island.
- Kassaras Ioannis, Vasilis Kapetanidis, Athanassios Ganas, Andreas Karakonstantis, Panayotis Papadimitriou, George Kaviris, Vasiliki Kouskouna, Nicholas Voulgaris. (2021). Seismotectonic analysis of the 2021 Damasi-Tyrnavos (Thessaly, Central Greece) earthquake sequence and implications on the stress field rotations.
- Koukouvelas Ioannis K., Konstantinos G. Nikolakopoulos, Aggeliki Kyriou 1ORCID, Riccardo, Alexandros Belesis, Vasiliki Zygouri, Sotirios Verroios, Dionysios Apostolopoulos and Ioannis Tsentzos. (2021). The March 2021 Damasi

Earthquake Sequence, Central Greece: Reactivation Evidence across the Westward Propagating Tyrnavos Graben.

- Makropoulos, K., Kaviris, G., & Kouskouna, V. (2012). An updated and extended earthquake catalogue for Greece and adjacent areas since 1900. *Natural Hazards and Earth System Sciences*.
- Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*.
- Papadopoulos Gerassimos A., Apostolos Agalos, Andreas Karavias, Ioanna Triantafyllou, Issaak Parcharidis and Efthymios Lekkas. (2021). Seismic and Geodetic Imaging (DInSAR) Investigation of the March 2021 Strong Earthquake Sequence in Thessaly, Central Greece. *Geosciences*.
- Papazachos, B. C., & Papazachou, C. B. (2003). The earthquakes of Greece.
- Rosen, P.A., et al. (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3), 333–382.
- Shuiping Li, Xin Wang, Tingye Tao, YongchaoZhu, Xiaochuan Qu, Zhenxuan Li, Jianwei Huang and Shunyue Song. (2023). Source Model of the 2023 Turkey Earthquake Sequence Imaged by Sentinel-1 and GPS Measurements. *Remote Sensing*.
- Triantafyllou Ioanna, Andreas Karavias, Ioannis Koukouvelas, Gerassimos A. Papadopoulos and Issaak Parcharidis. (2022). The Crete Isl. (Greece) Mw6.0 Earthquake of 27 September 2021: Expecting the Unexpected.
- Tronin Andrew A. (2009). *Satellite Remote Sensing in Seismology. A Review*, Scientific Research Centre for Ecological Safety, Russian Academy of Sciences.
- Ying Shi, Yongzhe Wang and Yinju Bian. (2023). Coseismic Source Model of the February 2023 Mw 6.8 Tajikistan Earthquake from Sentinel-1A InSAR Observations. *Remote Sensing*.