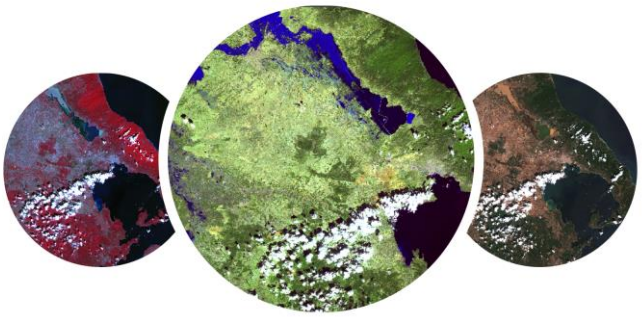
ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
Σχολή Μηχανικών
Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών

- ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ -

«ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΟΛΛΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ ΤΟΥ 2023 ΣΤΟ ΚΑΜΠΟ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ»

"Multisensor Satellite Data Processing for the Mapping of the 2023 Floods in the Thessaly Plain"



Καρεφυλάκης Ευάγγελος

«ΤΛ20137»

<u>Επιβλέπουσα Καθηγήτρια</u>:

Δρ Κούλη Μαρία

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Χανιά, 2025

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

- ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ -

«ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΟΛΛΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ ΤΟΥ 2023 ΣΤΟ ΚΑΜΠΟ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ»

"Multisensor Satellite Data Processing for the Mapping of the 2023 Floods in the Thessaly Plain"

Καρεφυλάκης Ευάγγελος

«ΤΛ20137»

<u>Επιβλέπουσα Καθηγήτρια</u>:

Δρ Κούλη Μαρία

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Χανιά, 2025

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τη συμβολή και την υποστήριξη ορισμένων ανθρώπων, στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου, Δρ Μαρία Κούλη, για την καθοδήγηση της, την πολύτιμη επιστημονική της συμβολή και τις χρήσιμες παρατηρήσεις της καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Η υποστήριξή της και οι συμβουλές της συνέβαλαν καθοριστικά στη διαμόρφωση και ολοκλήρωση της μελέτης μου. Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζω στους συναδέλφους και συμφοιτητές μου, για την υποστήριξη, τη συνεργασία και την ανταλλαγή γνώσεων και εμπειριών κατά τη διάρκεια των σπουδών μας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και του φίλους μου για την αμέριστη υποστήριξη, την ενθάρρυνση και την κατανόηση που μου έδειξαν καθ΄ όλη τη διάρκεια της φοίτησης μου. Η στήριξη τους υπήρξε καθοριστική για την επίτευξη αυτού του στόχου.

Π ε ρ ί λ η ψ η

Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη και χαρτογράφηση των πλημμυρών που έπληξαν τον Θεσσαλικό κάμπο τον Σεπτέμβριο του 2023, μέσω αξιοποίησης δορυφορικών δεδομένων πολλαπλών αισθητήρων και τεχνικών Τηλεπισκόπησης. Στόχος της είναι η ακριβής αποτύπωση των πλημμυρισμένων εκτάσεων, καθώς και η αξιολόγηση των επιπτώσεων στο φυσικό και αγροτικό περιβάλλον.

Αρχικά, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της Τηλεπισκόπησης, με έμφαση στις φασματικές ιδιότητες των υλικών και τη σημασία της φασματικής υπογραφής. Στη συνέχεια, αναλύονται οι δορυφορικοί αισθητήρες (Sentinel-1, Sentinel-2), τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, καθώς και η συμβολή του προγράμματος Copernicus στη διαχείριση φυσικών κινδύνων.

Ειδική αναφορά γίνεται στη χρήση δορυφορικών δεδομένων για την ανίχνευση πλημμυρών, μέσω εικόνων Sentinel-1 (SAR) και Sentinel-2 (οπτικές ζώνες), καθώς και στη συμβολή υπηρεσιών όπως το GLOFAS. Επιπλέον, εξετάζεται η κακοκαιρία Daniel, που προκάλεσε πρωτοφανείς επιπτώσεις στον Θεσσαλικό κάμπο.

Στο τελευταίο μέρος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση των πλημμυρισμένων περιοχών μέσω δορυφορικών εικόνων, με χρήση του λογισμικού SNAP για την επεξεργασία δεδομένων SAR και του λογισμικού LEOWorks για RGB σύνθεση και υπολογισμό του δείκτη NDVI. Μέσω του NDVI έγινε δυνατός ο εντοπισμός των εκτάσεων που επηρεάστηκαν, και πραγματοποιήθηκε διασταύρωση με δεδομένα χρήσεων γης (CORINE) για την αποτίμηση των επιπτώσεων.

Η χαρτογράφηση αποκάλυψε ότι κυρίαρχη κατηγορία γης που επλήγη ήταν οι μόνιμα αρδευόμενες εκτάσεις, ακολουθούμενες από αρόσιμες εκτάσεις, βοσκοτόπια και οικιστικές περιοχές. Επίσης, διαπιστώθηκε σημαντική περιβαλλοντική υποβάθμιση σε φυσικά οικοσυστήματα, όπως έλη, λιβάδια και εκτάσεις φυσικής βλάστησης.

Τα ευρήματα αναδεικνύουν τη σημασία της Τηλεπισκόπησης για την παρακολούθηση και αξιολόγηση φυσικών καταστροφών. Τέλος, προτείνονται μελλοντικές κατευθύνσεις, όπως η ενσωμάτωση υπερφασματικών δεδομένων, η χρήση τεχνητής νοημοσύνης και η διασύνδεση με επιτόπια δεδομένα για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης κρίσεων.

A B S T R A C T

This thesis focuses on the study and mapping of the floods that affected the Thessalian Plain in September 2023, utilizing multi-sensor satellite data and Remote Sensing techniques. Its aim is the accurate delineation of the flooded areas and the assessment of the impact on both the natural and agricultural environment.

Initially, the fundamental principles of Remote Sensing are presented, with an emphasis on the spectral properties of materials and the significance of spectral signatures. Subsequently, the satellite sensors (Sentinel-1, Sentinel-2), their technical specifications, and the contribution of the Copernicus program to natural hazard management are analyzed.

Special emphasis is placed on the use of satellite data for flood detection, through Sentinel-1 (SAR) and Sentinel-2 (optical bands) imagery, as well as on the role of services such as GLOFAS. Additionally, the study examines the storm system Daniel, which caused unprecedented impacts in the Thessalian Plain.

In the final section, an analysis of the flooded areas was conducted using satellite imagery, with SAR data processed via SNAP software and RGB compositions and NDVI index calculations carried out using LEOWorks. NDVI enabled the identification of affected areas, which were then cross-referenced with land use data (CORINE) to assess the extent of the impacts.

The mapping revealed that the most affected land category was permanently irrigated land, followed by arable land, pastures, and urban areas. Significant environmental degradation was also observed in natural ecosystems such as wetlands, meadows, and areas of natural vegetation.

The findings highlight the importance of Remote Sensing for monitoring and assessing natural disasters. Finally, future directions are proposed, including the integration of hyperspectral data, the use of artificial intelligence, and the combination with in-situ data to optimize crisis management.

Π ε ρ ι ε χ ό μ ε ν α

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗ 13

1.1 Εισαγωγή 13

1.2 Δορυφορική Τηλεπισκόπηση 13

1.3 Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία και η Αλληλεπίδρασή της με την Επιφάνεια της Γης. 14

1.3.1 Ανάκλαση Ακτινοβολίας ____ 16
1.3.2 Απορρόφηση Ακτινοβολίας ____ 17

1.4 Αλληλεπίδραση της Ακτινοβολίας σε Υδάτινες Επιφάνειες 17

1.4.1 Ανάκλαση - Σκέδαση στο νερό ____ 18
1.4.2 Απορρόφηση - Διαπερατότητα στο Νερό ____ 19

1.5 Φασματική Υπογραφή και Φασματικές Ιδιότητες Υλικών 20

ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΗΣ 22

2.1 Τύποι και Χαρακτηριστικά Δορυφορικών Αισθητήρων 22

2.1.1 Χωρική Διακριτική Ικανότητα ____ 23
2.1.2 Φασματική Διακριτική Ικανότητα ____ 24
2.1.3 Ραδιομετρική Διακριτική Ικανότητα ____ 24
2.1.4 Χρονική Διακριτική Ικανότητα ____ 24

2.2 Ραντάρ Παρατήρησης της Γης (Δορυφορικά Ραντάρ) 25

2.2.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Εικονοληψίας Ραντάρ ____ 25
2.2.2 Διακριτικές Ικανότητες Συστημάτων Ραντάρ ____ 26
2.2.3 Είδη Ραντάρ και Εφαρμογές ____ 27

ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COPERNICUS 28

3.1 Το Πρόγραμμα Copernicus: Στόχοι και Υπηρεσίες 28

3.2 Δορυφόροι του Copernicus 31

3.3 Η Αποστολή Sentinel-1 33

3.3.1 Περιγραφή του Δορυφόρου ____ 34
3.3.2 Τροχιά – Γεωγραφική κάλυψη δορυφόρου ____ 35
3.3.3 Το Όργανο C-SAR ____ 37

3.4 Η Αποστολή Sentinel-2 40

3.4.1 Περιγραφή Δορυφόρου ____ 41
3.4.2 Τροχιά- Γεωγραφική Κάλυψη ____ 42
3.4.3 Όργανο MSI ____ 43

ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ & ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ 46

4.1 Φυσικές Καταστροφές 46

4.2 Η Δορυφορική Τηλεπισκόπηση ως Εργαλείο Διαχείρισης Καταστροφών 48

4.2.1 Sentinel-1 και Ραντάρ για Ανίχνευση Πλημμυρών ____ 49
4.2.2 Sentinel-2 και Χαρτογράφηση Πλημμυρών ____ 51

ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: Μελέτη Περίπτωσης της Κακοκαιρίας Daniel. 52

5.1 Ιστορικές Πλημμύρες της Ελλάδας 53

5.2 Ανάλυση της Κακοκαιρία DANIEL 54

5.3 Επιπτώσεις της κακοκαιρίας Daniel στην Θεσσαλία 56

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΣΤΗΝ ΘΕΣΣΑΛΙΑ. 58

6.1 Συλλογή και Απόκτηση Δεδομένων 58

6.2 Παρουσίαση των Λογισμικών Επεξεργασίας SNAP & LEOWorks 61

6.3 Ανάλυση Πλημμύρας στον Θεσσαλικό Κάμπο με Χρήση Sentinel-1 και SNAP 63

6.3.1 Εισαγωγή και Προετοιμασία Δεδομένων Sentinel-1 64
6.3.2 Προ-επεξεργασία Εικόνων 65
6.3.3 Εντοπισμός και Ταξινόμηση Πλημμυρισμένων Περιοχών 72

6.1 Οπτικοποίηση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων 78

6.2 Διαδικασία Δημιουργίας RGB Εικόνων στο LEOWorks 80

6.2.1 Διαδικασία Υπολογισμού του NDVI στο LEOWorks 84
6.2.1 Οπτικοποίηση και Ερμηνεία των Εικόνων 85

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΕΚΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ. 92

7.1 Ανάλυση Χωρικής κατανομής των Χρήσεων Γης 92

7.2 Ποσοτική Αποτίμηση των Επιπτώσεων 95

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ. 98

8.1 Συμπεράσματα 98

8.2 Προοπτικές και Προτάσεις για το Μέλλον 99

Βιβλιογραφία – Αναφορές 100

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: «Στιγμιότυπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος, όπου άξονας 'x' (η απόσταση και κατεύθυνση του κύματος), άξονας 'y' (ηλεκτρικό πεδίο του κύματος), άξονας 'z' (μαγνητικό πεδίο του κύματος)», (Πηγή: www.researchgate.net, ιδία επεξεργασία). 14
Εικόνα 2: «Οι περιοχές του ΗΜ φάσματος», (Πηγή: Στέφανος Ελευθερίου, 2020). 15
Εικόνα 3: «Ανάκλαση της ΗΜ ακτινοβολίας σε διάφορες επιφάνειες, (a)διάχυση σε επιφάνεια μεγάλης τραχύτητας, (b)κατοπτρική ανάλυση,(c) γωνιακή ανάκλαση». (Πηγή: www.researchgate.net). 17
Εικόνα 4: «Παράγοντες που επηρεάζουν την ακτινοβολία μιας υδάτινης περιοχής»(Πηγή: Καρτάλης & Φειδάς, 2023). 18
Εικόνα 5: «Απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στα διαφορά βάθη μέσα στο νερό» (Πηγή: www.geo.auth.gr/courses). 19
Εικόνα 6: «Φασματικές υπογραφές των τριών βασικών επιφανειών της γης (έδαφος, βλάστηση, ύδατα) » (Πηγή : (Καρτάλης & Φειδάς, 2023). 21
Εικόνα 7: «Υποθετικό παράδειγμα για το πώς ο δορυφόρος Landsat μπορεί να καταγράψει νερό, πράσινη βλάστηση και γυμνό έδαφος» (Πηγή: www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_GR) 21
Εικόνα 8: «Σύγκριση των δύο διαφορετικών αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στην Τηλεπισκόπηση» (Πηγή: ursaspace.com). 23
Εικόνα 9 : «Τρόπος λειτουργίας ραντάρ : Α) Παλμοί (σήμα) που εκπέμπονται από το σύστημα, Β) ζώνη αλληλεπίδρασης σήματος, C) Οπισθοσκεδαζόμενο σήμα (ηχώ)» (Πηγή: www.researchgate.net). . 25
Εικόνα 10: «Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εικονοληψίας ραντάρ» (Πηγή: Καρτάλης & Φειδάς, 2013). 26
Εικόνα 11: «Συντονισμός και διαχείριση του προγράμματος Copernicus» (Πηγή: www.researchgate.net). 29
Εικόνα 12: «Διάγραμμα των βασικών υπηρεσιών του προγράμματος Copernicus» (Πηγή: copernicus.eu). 30
Εικόνα 13: «Αναπαράσταση της οικογένειας δορυφόρων Sentinel του προγράμματος Copernicus. Δίπλα από κάθε δορυφόρο, εμφανίζονται ενδεικτικά δεδομένα και οι κύριες εφαρμογές τους: (Sentinel-1 με ραντάρ παρακολούθησης (Radar Vision), το Sentinel-2 με πολυφασματική παρατήρηση (Color Vision), το Sentinel-3 για ευρύτερη παρακολούθηση της γης και των ωκεανών (A Bigger Picture), το Sentinel-4 για την παρακολούθηση της ατμόσφαιρας στην Ευρώπη (European Air Monitoring), το Sentinel-5P και Sentinel-5 για την παγκόσμια παρακολούθηση της ατμόσφαιρας (Global Air Monitoring), και το Sentinel-6 για την παρακολούθηση των ωκεανών (Surfing the Seas)»,(Πηγή εικόνας: www.researchgate.net). 32
Εικόνα 14: «Απεικόνισή του Sentinel-1 υπό τροχιά» (Πηγή: www.esa.int). 34
Εικόνα 15: «Ο δορυφόρος Sentinel-1 με το ραντάρ του σε πλήρη ανάπτυξη κατά τη διάρκεια δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας στις εγκαταστάσεις της Thales Alenia Space στις Κάννες της Ιταλίας» (Πηγή: futura-sciences.com). 35
Εικόνα 16:«Σχηματική όψη του τροχιακού σωλήνα», (πηγή: ESA). 36
Εικόνα 17: «Χρόνος επανα-επίσκεψης για S-1A και S-1B σε Ημέρες ανά Επανάληψη» (Πηγή εικόνας: sentiwiki.copernicus.eu) 36
Εικόνα 18: «Λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα οργάνου CSAR» (Πηγή: Torres et al.,2012). 38
Εικόνα 19: «Πλακίδιο SAS, εμπρόσθια όψη με ζεύγη κυματοδηγών με σχισμές H/V», (πηγή: (Torres, et al.,2012)). 39
Εικόνα 20: «Τρόποι λειτουργίας του συστήματος C-SAR του δορυφόρου Sentinel-1».(Πηγή: Torres, et al.,2012). 40

Εικόνα 21: «Απεικόνιση του Sentinel-2 υπό τροχιά» (Πηγή: www.esa.int). 41
Εικόνα 22: «Τελευταίες δοκιμές του δορυφόρου Sentinel-2B στην τοποθεσία της ESA στην Ολλανδία». (Πηγή: www.esa.int) 42
Εικόνα 23: «Χρόνος κάλυψης και επανα-επίσκεψης που προβλέπεται από την αποστολή Sentinel-2 MSI» (Πηγή: sentiwiki.copernicus.eu). 43
Εικόνα 24: «Εσωτερική διαμόρφωση MSI» (πηγή: Sentiwiki.copernicus.eu, s2-mission n.d). 44
Εικόνα 25: «VNIR PFM FPA μετά από ενσωμάτωση και ευθυγράμμιση ανιχνευτών και φίλτρων [Μονάδες: Astrium SAS (Γαλλία) και e2v Technologies (Ηνωμένο Βασίλειο)]» (Πηγή: earth.esa.int). 45
Εικόνα 26: «Διαμόρφωση κλιμακωτών ανιχνευτών και γωνίες παράλλαξης μεταξύ ανιχνευτών/ζωνών» (Πηγή: centreborelli.github.io). 45
Εικόνα 27: «Απεικόνιση φυσικών καταστροφών». 46
Εικόνα 28: «Κατάταξη φυσικών καταστροφών βάση της EM-DATA » (Πηγή: emdat.be). 47
Εικόνα 29: « Ο ετήσιος αναφερόμενος αριθμός φυσικών καταστροφών, κατηγοριοποιημένος ανά είδος από το 1970 - 2024». (πηγή: EM-DAT, CRED/UCLouvain (2024)). 47
Εικόνα 30: «Το ποσοστό των ανθρώπων που ζουν σε ζώνες υψηλού κινδύνου πλημμύρας».(πηγή: Rentschler, et al.,2022). 49
Εικόνα 31: « Εικόνες από drone αποκαλύπτουν την καταστροφή από δυο σοβαρές πλημμύρες που έπληξαν την Ελλάδα, στον θεσσαλικό Κάμπο(2023), και στην Μάνδρα Αττικής (2017)» (Πηγή: simerini.gr, newsit.gr). 52
Εικόνα 32: «Προγνωστικό γράφημα αναμενόμενου αθροιστικού υετού κακοκαιρίας»(Πηγή: meteo.gr). 54
Εικόνα 33: «Πρώτη εικόνα: χάρτης με την ατμοσφαιρική κυκλοφορία πάνω από την Ευρώπη (5/09/23), Δεύτερη εικόνα: χάρτης μεταφοράς υδρατμών (05/09/2023)» »(Πηγή: meteo.gr). 55
Εικόνα 34: «Χάρτης με τα 8 μεγαλύτερα ύψη βροχής σε χιλιοστά μέχρι τις 20:45 στις 5/9/2023» (πηγή: meteo.gr). 56
Εικόνα 35: «Ο χάρτης της Θεσσαλίας » (πηγή: Eudaric et al., 2024). 57
Εικόνα 36: «Copernicus Data Space Ecosystem». 58
Εικόνα 37: «Copernicus Brower». 58
Εικόνα 38: «Οριοθέτηση περιοχής ενδιαφέροντος και εισαγωγή κριτηρίων για αναζήτηση εικόνων Sentinel-1 και Sentinel-2». 60
Εικόνα 39: «Δορυφορικές εικόνες που προέκυψαν από τη διαδικασία αναζήτησης». 61
Εικόνα 40: «Εκκίνηση λογισμικού SNAP». 62
Εικόνα 41: «Εκκίνηση λογισμικού LEOWorks». 63
Εικόνα 42: «Εισαγωγή δεδομένων στο SNAP». 64
Εικόνα 43: «Δημιουργία υποσυνόλου για περιοχή ενδιαφέροντος». 65
Εικόνα 44: «Αφαίρεση θερμικού θορύβου: Ορισμός ονόματος νέου προϊόντος». 66
Εικόνα 45: «Οπτικοποίηση του νέου προϊόντος, μετά την αφαίρεση θορύβου». 66
Εικόνα 46: «Ρυθμίσεις βαθμονόμησης: επιλογή προϊόντος εισόδου και πόλωσης VV». 67
Εικόνα 47: «Οπτικοποίηση του νέου προϊόντος, μετά την ραδιομετρική διόρθωση». 67
Εικόνα 48: «Πίνακας πληροφοριών εικονοστοιχείων εικόνας». 68
Εικόνα 49: «Εφαρμογή φίλτρου Lee 5×5 για μείωση του θορύβου στην εικόνα ραντάρ». 69
Εικόνα 50: «Οπτικοποίηση του νέου προϊόντος, μετά την εφαρμογή φίλτρου». 69
Εικόνα 51: «Διόρθωση εδάφους Range Doppler». 71
Εικόνα 52: «Οπτικοποίηση του νέου προϊόντος, μετά την εφαρμογή διόρθωσης ανάγλυφού». 71
Εικόνα 53: «Οπτικοποιηση του νέου προϊόντος, μετά την μετατροπή σε λογαριθμική κλίμακα». 72
Εικόνα 54: «Ιστόγραμμα της ζώνης Sigma0_VV_db». 73
Εικόνα 55: «Σχεδίαση ορθογωνίων στις σκοτεινές περιοχές που αντιστοιχούν στις πλημμυρισμένες ζώνες». 74
Εικόνα 56: «Στατιστικά στοιχεία εικονοστοιχείων στην περιοχή ενδιαφέροντος». 74

Εικόνα 57: «Εφαρμογή Band Maths για τον εντοπισμό των πλημμυρισμένων περιοχών με κατώφλι -16 dB»..... 75
Εικόνα 58: «Οπτικοποίηση της δυαδικής εικόνας πλημμυρισμένων περιοχών μετά την εφαρμογή του κατωφλίου -16db ». 75
Εικόνα 59: «Εισαγωγή των δύο δυαδικών εικόνων στο αναδυόμενο παράθυρο Coregistration»..... 76
Εικόνα 60: «Εισαγωγή κατάλληλων παραμέτρων για τον διαχωρισμό των πλημμυρισμένων περιοχών από τα μόνιμα υδάτινα σώματα». 77
Εικόνα 61: «Οπτικοποίηση τελικού προϊόντος πλημμυρισμένων περιοχών από τα μόνιμα υδάτινα σώματα». 78
Εικόνα 62: «Τελική οπτικοποίηση των πλημμυρισμένων περιοχών στη Θεσσαλία μέσω Google Earth». 79
Εικόνα 63: «Πλημμυρισμένες περιοχές στον κάμπο της Λάρισας, με έντονα επηρεασμένες τις περιοχές Φαλάνη, Ελευθέριο, Πλατύκαμπο, Κιλελέρ και Αρμένιο». 79
Εικόνα 64: «Πλημμυρισμένες εκτάσεις στις περιοχές Φρακαδόνα, Παλαμά και των γύρω αγροτικών περιοχών»..... 80
Εικόνα 65: «Διαδικασία επιλογής και εισαγωγής των κατάλληλων «Bands» δορυφορικής εικόνας». 82
Εικόνα 66: «Παράθυρο (Specify Product Subset) για τον ορισμό της περιοχής ενδιαφέροντος». 82
Εικόνα 67: «Διαδικασία δημιουργίας RGB εικόνας (true color)»..... 83
Εικόνα 68: «Διαδικασία ρύθμισης ιστογραμμάτων για την βέλτιστη απεικόνιση του RGB». 83
Εικόνα 69: «Διαδικασία υπολογισμού NDVI στο λογισμικό LEO»..... 85
Εικόνα 70: «Συγκριτική δορυφορική απεικόνιση της Θεσσαλίας πριν και μετά την κακοκαιρία Daniel (Σύνθετο RGB (4,3,2))». 86
Εικόνα 71: «Έκταση πλημμυρισμένων περιοχών (Σύνθετο RGB (4,3,2))». 87
Εικόνα 72: MSI «Δορυφορική απεικόνιση Θεσσαλίας (15/10/2023) με εστίαση στη λίμνη Κάρλα (Σύνθετο RGB (4,3,2))». 88
Εικόνα 73: «Συγκριτική δορυφορική απεικόνιση της λίμνης Κάρλας πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τις πλημμύρες (21/08/2023, 10/09/2023, 15/10/2023),(Σύνθετο RGB (4,3,2))»..... 89
Εικόνα 74: «Δορυφορική απεικόνιση της Θεσσαλίας με εστίαση στις πλημμυρισμένες περιοχές (15/09/2023) (σύνθετο RGB (12,11,4))». 89
Εικόνα 75: «Δορυφορική απεικόνιση του νομού Λάρισας πριν και μετά την κακοκαιρία Daniel,(σύνθετο RGB (8, 4, 3)) »..... 90
Εικόνα 76: «Χάρτης NDVI για Λάρισα, Τρίκαλα και Καρδίτσας (15/09/2023) – Απεικόνιση μεταβολών βλάστησης μετά τις πλημμύρες»..... 90
Εικόνα 77: «Χρονική εξέλιξη του δείκτη NDVI στον νομό Λάρισας και στην περιοχή της λίμνης Κάρλας, πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την κακοκαιρία Daniel». 91
Εικόνα 78: «Χάρτης με την έκταση πλημμύρας (γκρι περιοχές), όπως εντοπίστηκε από δορυφορικές εικόνες Sentinel-1 (SAR). Ως υπόβαθρο, φαίνονται οι χρήσεις γης (γεωργικές, αστικές κ.λπ.) που επλήγησαν από το φαινόμενο.» 93
Εικόνα 79: «Χάρτης με την έκταση πλημμύρας (γκρι περιοχές), όπως εντοπίστηκε από δορυφορικές εικόνες Sentinel-1 (SAR). Ως υπόβαθρο, απεικονίζονται αναλυτικά οι χρήσεις γης βάσει του χάρτη Corine (π.χ. μόνιμα αρδευόμενες καλλιέργειες, φυσικές και αστικές εκτάσεις), επιτρέποντας την εκτίμηση των επιπτώσεων του φαινομένου ανά κατηγορία γης.» 93
Εικόνα 80: «Χάρτης με την κατανομή των μόνιμα αρδευόμενων εκτάσεων (ανοιχτό πράσινο), βάσει των δεδομένων χρήσεων γης Corine. Φαίνεται η συσχέτισή τους με άλλες γεωργικές και φυσικές καλύψεις γης στην ευρύτερη περιοχή.»..... 94
Εικόνα 81: :«Πλημμυρισμένες περιοχές βάσει δορυφορικών δεδομένων NDVI, σε διαχωρισμό ανά κατηγορία χρήσης γης (CORINE). Απεικονίζονται οι κυριότερες επηρεαζόμενες εκτάσεις, όπως γεωργικές, βοσκοτόπια και αστικός ιστός.»..... 94
Εικόνα 82: «Η συνολική χωρική κάλυψη του πλημμυρικού φαινομένου στον Θεσσαλικό κάμπο, όπως αποτυπώνεται στο τελικό, ενοποιημένο γεωγραφικό πολύγωνο που προέκυψε από την ανάλυση.» 95

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: «Κυρίες ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος». 15
Πίνακας 2: «Πληροφορίες Τροχιάς για Sentinel-1A και 1B». 37
Πίνακας 3: «Σημαντικές τροχιακές πληροφορίες για Sentinel-2A και το Sentinel-2B». 43
Πίνακας 4: «Βήματα απόκτησης δεδομένων από το Copernicus Data Space». 59
Πίνακας 5: «Ημερομηνίες και ώρες λήψης δορυφορικών εικόνων Sentinel-1&2». 60
Πίνακας 6: «Σύνθετα RGB και Ερμηνεία τους» 85
Πίνακας 7: «Πλημμυρισμένες εκτάσεις ανά κατηγορία γης (σε στρέμματα).» 96

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας, η παρατήρηση της Γης από το διάστημα μέσω δορυφόρων αποτελεί ένα σπουδαίο εργαλείο για την κατανόηση και παρακολούθηση του περιβάλλοντος, του κλίματος και της ανάπτυξης των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Η Τηλεπισκόπηση (ή Τηλεανίχνευση) επιτρέπει τη συλλογή πληροφορίων σε πραγματικό χρόνο από εναέρια ή διαστημικά μέσα, χωρίς να απαιτείται άμεση επαφή με το υπό παρατήρηση αντικείμενο. Αυτό προσφέρει τη δυνατότητα ανάλυσης φυσικών φαινομένων, παρακολούθησης της κλιματικής αλλαγής και αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, παρέχοντας ταυτόχρονα εργαλεία για την προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης.

Η ταχεία εξέλιξη της τεχνολογίας και η ανάπτυξη καινοτόμων δορυφορικών συστημάτων, έχουν εκσυγχρονίσει τον τρόπο με τον οποίο παρακολουθούμε και διαχειριζόμαστε τους φυσικούς πόρους και τα περιβαλλοντικά δεδομένα. Οι προηγμένοι αισθητήρες πολλαπλών φασμάτων και οι εξελιγμένες τεχνικές ανάλυσης εικόνας, που είναι ενσωματωμένες στα σύγχρονα δορυφορικά συστήματα, προσφέρουν δεδομένα υψηλής ακρίβειας, τα οποία είναι χρήσιμα για την καταγραφή και μελέτη ποικίλων φυσικών δεδομένων. Ως εκ τούτου, τα περισσότερα παγκόσμια περιβαλλοντικά ζητήματα μελετώνται και παρακολουθούνται αποτελεσματικά μέσω της δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, υποστηρίζοντας τις παγκόσμιες προσπάθειες για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προκλήσεων..

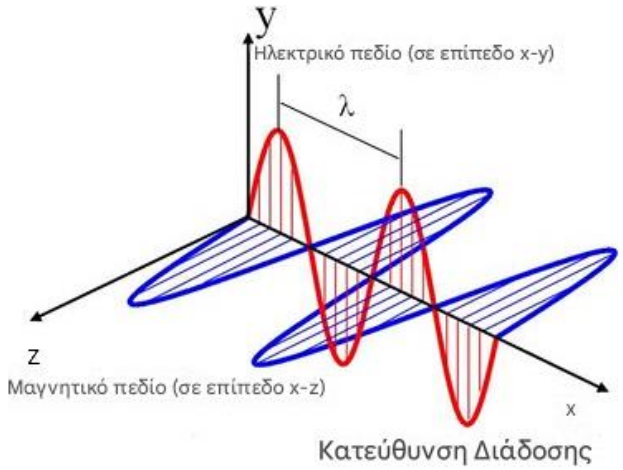
1.2 Δορυφορική Τηλεπισκόπηση

Ο όρος Τηλεπισκόπηση ή Τηλεανίχνευση (Remote Sensing) αναφέρεται στην διαδικασία συλλογής πληροφοριών για ένα αντικείμενο, μια περιοχή ή φαινόμενο, μέσω της χρήσης ανιχνευτικών συσκευών που δεν βρίσκονται σε άμεση επαφή με το αντικείμενο παρατήρησης (Καρτάλης & Φειδάς, 2013). Για την επιστημονική κοινότητα που μελετά την Γήινη επιφάνεια, η Τηλεπισκόπηση αποτελεί ένα βασικό εργαλείο για την παρατήρηση και μελέτη της Γης από το διάστημα. Μέσω αυτής, οι επιστήμονες μπορούν να εξετάζουν την γήινη επιφάνεια, τους ωκεανούς, την ατμόσφαιρα και τις δυναμικές διεργασίες που συμβαίνουν σε αυτά τα περιβάλλοντα (European Space Agency, n.d).

Τα κύρια μέσα που χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση της Γης από το διάστημα είναι οι δορυφόροι παρατήρησης της Γης (Earth Observation-EO satellites). Ανάλογα με τους τύπους αισθητήρων που φέρουν οι δορυφόροι αυτοί, έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα δορυφορικής Τηλεπισκόπησης. Γενικά, οι αισθητήρες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: (σε παθητικούς και ενεργητικούς). Οι παθητικοί αισθητήρες ανιχνεύουν την ακτινοβολία που εκπέμπεται ή ανακλάται από την επιφάνεια της Γης, ενώ οι ενεργητικοί αισθητήρες παράγουν τα δικά τους σήματα ακτινοβολίας τα οποία στέλνουν στην επιφάνεια της Γης και τα ανιχνεύουν καθώς αυτά ανακλώνται, «Περισσότερη ανάλυση βλέπε: 2.1 Τύποι και Χαρακτηριστικά Δορυφορικών Αισθητήρων». (Jensen,2009; Καρτάλης & Φειδάς, 2013).

1.3 Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία και η Αλληλεπίδρασή της με την Επιφάνεια της Γης.

Η κύρια πηγή ενέργειας της Γης και της ατμόσφαιρας είναι ο ήλιος (ηλιακή ενέργεια), ο οποίος διαδίδει μέσω του διαστήματος την ηλεκτρομαγνητική (ΗΜ) ακτινοβολία. Η ΗΜ ακτινοβολία αποτελείται από εγκάρσια κύματα (ΗΜ κύματα) που δημιουργούνται από περιοδικές κινήσεις φορτισμένων σωματιδίων (ταλαντώσεις), οι οποίες δημιουργούν περιοδικές διαταραχές στο ηλεκτρικό τους πεδίο, δημιουργώντας έτσι ένα μαγνητικό πεδίου που είναι κάθετο στο ηλεκτρικό (βλ. Εικόνα 1). Τα δύο αυτά πεδία είναι αλληλένδετα και κάθετα μεταξύ τους και διαδίδονται στον χώρο με την μορφή κύματος, μεταφέροντας ηλεκτρική και μαγνητική ενέργεια με την ταχύτητα του φωτός.



Εικόνα 1: «Στιγμιότυπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος, όπου άξονας 'x' (η απόσταση και κατεύθυνση του κύματος), άξονας 'y' (ηλεκτρικό πεδίο του κύματος), άξονας 'z' (μαγνητικό πεδίο του κύματος)», (Πηγή: www.researchgate.net, ιδία επεξεργασία).

Η ΗΜ ακτινοβολία κατηγοριοποιείται σε διαφορετικές περιοχές του ΗΜ φάσματος, βάσει του μήκους κύματος (λ) και της συχνότητας της (f) (βλ. Εικόνα 2). Το φάσμα αυτό εκτείνεται από την

περιοχή των ακτίνων-γ, οι οποίες διαθέτουν την υψηλότερη ενέργεια, και συνεχίζεται με τις ακτίνες-Χ, την υπεριώδη ακτινοβολία, το ορατό φως και το υπέρυθρο (Mignone& Barnes, 2012).

Η ΗΜ ακτινοβολία με μήκη κύματος μεγαλύτερα από εκείνα του ορατού φωτός περιλαμβάνει τα ραδιοκύματα, τα οποία χρησιμοποιούνται σε τηλεπικοινωνίες, ραντάρ και δορυφορικά συστήματα (Griffiths, 2013).



Εικόνα 2: «Οι περιοχές του ΗΜ φάσματος», (Πηγή: Στέφανος Ελευθερίου, 2020).

Στον (Πίνακας 1) παρουσιάζονται οι κύριες ζώνες του ΗΜ φάσματος με τα όρια τους.

Πίνακας 1: «Κυρίες ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος».

Μήκος Κύματος (μm)	Φασματική Περιοχή
$> 10^{-5}$	Ακτίνες Υ
$10^{-5} - 10^{-2}$	Ακτίνες Χ
$0.01 - 0,38$	Υπεριώδες
$0.38 - 0.72$	Ορατό
$0.72 - 1.5$	Εγγύς υπέρυθρο
$1.5 - 5.6$	Μέσο υπέρυθρό
$5.6 - 1000$	Υπέρυθρό
$10^3 - 10^6$	Μικροκύματα
$10^6 - 10^7$	VHF
$10^7 - 10^8$	HF

Η ΗΜ ακτινοβολία, μεταφέρει ενέργεια μέσω μηχανισμών όπως η ανάκλαση, η διάχυση και η απορρόφηση, επιτρέποντας τη διάδοση της σε διαφορετικά μέσα και μήκη κύματος.

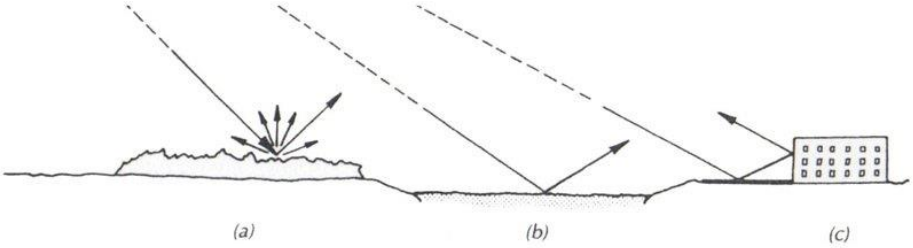
Όταν η ΗΜ ακτινοβολία προσπίπτει σε μια επιφάνεια, μέρος της ανακλάται, άλλο απορροφάται και το υπόλοιπο μεταδίδεται σε γειτονικά μέσα, όπως η ατμόσφαιρα ή η επιφάνεια της Γης. Η συμπεριφορά της εξαρτάται από τις φυσικοχημικές ιδιότητες των υλικών, όπως η σύσταση, η υφή και η περιεκτικότητα σε υγρασία (Lillesand, Kiefer & Chipman, 2015). Η αλληλεπίδραση αυτή, παρέχει κρίσιμες πληροφορίες για τη σύσταση και τα χαρακτηριστικά των επιφανειών που παρατηρούνται (Jensen, J. R. (2009)).

Οι δορυφόροι παρατήρησης της Γης, ανιχνεύουν την ΗΜ ενέργεια που έχει αλληλοεπιδράσει με διάφορα υλικά, και όχι αυτή που προέρχεται κατευθείαν από την πηγή της (π.χ. Ήλιος).

1.3.1 Ανάκλαση Ακτινοβολίας

Η ανάκλαση (reflection), είναι η φυσική διαδικασία κατά την οποία η ΗΜ ακτινοβολία επιστρέφει από μια επιφάνεια χωρίς να απορροφάτε πλήρως από αυτήν. Η ανάκλαση επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η γωνία πρόσπτωσης και παρατήρησης, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και οι φυσικοχημικές ιδιότητες της επιφάνειας (Lillesand, Kiefer & Chipman, 2015).

Η φύση της ανάκλασης της ΗΜ ακτινοβολίας εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας σε σχέση με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Αν η επιφάνεια είναι λεία, η ανάκλαση είναι κατοπτρική (specular) (βλ. Εικόνα 3(b)), και η ένταση της ανακλώμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης, την γωνία παρατήρησης και την απόσταση του παρατηρητή. Σε ανώμαλες επιφάνειες, η ανάκλαση είναι διάχυτη (diffusion) (βλ. Εικόνα 3(a)), με την ακτινοβολία να διασκορπίζεται σε όλες τις κατευθύνσεις. Παραδείγματα διάχυσης παρατηρούνται στα νέφη και στις χορτολιβαδικές εκτάσεις. Όταν οι επιφάνειες βρίσκονται υπό γωνία, μπορεί να δημιουργηθεί μεταξύ αυτών η γωνιακή ανάκλαση ή η διπλής αναπήδησης ανάκλαση (corner reflection or double-bounce reflection) (βλ. Εικόνα 3(c)). Τέλος, μια θεωρητικά ιδανική ισότροπη επιφάνεια (Λαμπερτιανή), διαχέει την ακτινοβολία ομοιόμορφα, ανεξάρτητα από την γωνία παρατήρησης. Ωστόσο στην πράξη, η ανάκλαση είναι πιο σύνθετη και επηρεάζεται από παράγοντες όπως η γεωμετρία, το σχήμα και ο προσανατολισμός της επιφάνειας (Καρτάλης & Φειδάς, 2013).



Εικόνα 3: «Ανάκλαση της ΗΜ ακτινοβολίας σε διάφορες επιφάνειες, (a)διάχυση σε επιφάνεια μεγάλης τραχύτητας, (b)κατοπτρική ανάλυση,(c) γωνιακή ανάκλαση».
(Πηγή: www.researchgate.net**).**

1.3.2 Απορρόφηση Ακτινοβολίας

Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από την επιφάνεια της Γης, παίζει καθοριστικό ρόλο στη ρύθμιση της θερμικής ισορροπίας του πλανήτη. Αέρια όπως το όζον, το διοξείδιο του άνθρακα και οι υδρατμοί απορροφούν επιλεκτικά την ΗΜ ακτινοβολία σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, επηρεάζοντας την ενεργειακή κατανομή στην ατμόσφαιρα (Goody & Yung, 1995).

Η Γη απορροφά κυρίως την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (ορατό, εγγύς και μέσο υπέρυθρο), η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε Θερμική ενέργεια και επανεκπέμπεται ως υπέρυθρη ακτινοβολία (3μm -1000μm), η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται θερμική ή εκπεμπόμενη υπέρυθρη (Thermal or Emitted Infrared Radiance). Η ένταση της εξαρτάται από την θερμοκρασία και τον συντελεστή εκπομπής των επιφανειών (Liang, 2005).

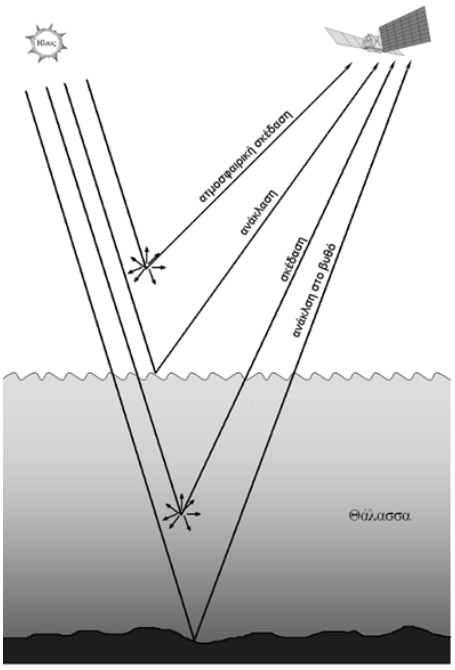
Η θερμοκρασία ενός σώματος επηρεάζεται από την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία, η οποία εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης του ηλιακού φωτός, την τοπογραφία και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Επιπλέον, κάθε υλικό παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά στη θερμική ακτινοβολία. Οι δορυφορικοί αισθητήρες καταγράφουν την θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία των επιφανειών, παρέχοντας δεδομένα που επιτρέπουν τη χαρτογράφηση θερμικών διαφορών. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της υγρασίας, του τύπου βλάστησης και των υλικών που συνθέτουν τις επιφάνειες (Καρτάλης & Φειδάς, 2013).

1.4 Αλληλεπίδραση της Ακτινοβολίας σε Υδάτινες Επιφάνειες

Οι υδάτινες επιφάνειες έχουν έναν διαφορετικό τρόπο ανάκλασης και απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, από τις υπόλοιπες Γήινες επιφάνειες. Οι δορυφορικοί αισθητήρες καταγράφουν μια ακτινοβολία μικρού μήκους από τις υδάτινες επιφάνειες, η οποία επηρεάζεται από:

- Την ανακλαστικότητα του νερού,
- Την απορρόφηση από τα μόρια του νερού και το φυτοπλαγκτόν,
- Τη σκέδαση από τα μόρια του νερού και τα αιωρούμενα σωματίδια,
- Την ατμοσφαιρική σκέδαση.

Στην (Εικόνα 4) απεικονίζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν το σήμα που καταγράφει ένας δορυφόρος παρατήρησης της Γης.



Εικόνα 4: «Παράγοντες που επηρεάζουν την ακτινοβολία μιας υδάτινης περιοχής»(Πηγή: Καρτάλης & Φειδάς, 2023).

1.4.1 Ανάκλαση - Σκέδαση στο νερό

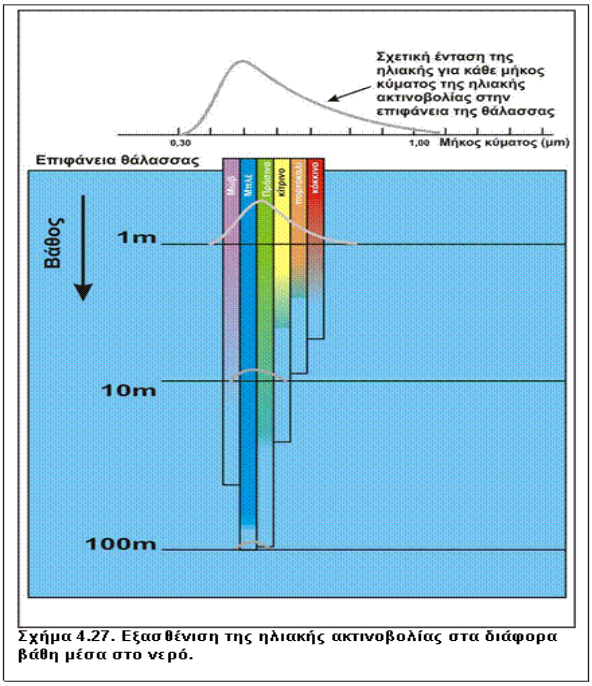
Η ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας σε υδάτινες επιφάνειες εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης, το μήκος της ακτινοβολίας και τη φύση της επιφάνειας. Γενικά, η ανακλαστικότητα των υδάτων είναι χαμηλή (κάτω του 9%), γεγονός που περιορίζει τις πληροφορίες που μπορούν να συλλεχθούν από δορυφορικούς αισθητήρες (Καρτάλης & Φειδάς 2013). Ωστόσο, σε κυματώδεις επιφάνειες και όταν η γωνία του ηλίου είναι χαμηλή, η ανακλαστικότητα μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, φτάνοντας έως και 65% ή περισσότερο, επηρεάζοντας έτσι την ποσότητα της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας (Vardiampasi, 2024).

Η σκέδαση (scattering) συμβαίνει όταν η ηλιακή ακτινοβολία αλλάζει κατεύθυνση λόγω σύγκρουσης με μόρια νερού ή αιωρούμενα σωματίδια, όπως ιζήματα και φυτοπλαγκτόν (Mobley,

1994). Η σκέδαση μπορεί να είναι μοριακή (Rayleigh scattering) ή από μεγαλύτερα σωματίδια (Mie scattering)(Kirk, 2011). Στις δορυφορικές εικόνες, οι υδάτινες επιφάνειες εμφανίζονται συνήθως σκοτεινές, καθώς η απορρόφηση της ακτινοβολίας είναι έντονη (Jerlov, 1979). Ωστόσο, η σκέδαση αποκαλύπτει πληροφορίες για τη σύνθεση του νερού, όπως η συγκέντρωση φυτοπλαγκτόν και αιωρούμενων ιζημάτων.

1.4.2 Απορρόφηση - Διαπερατότητα στο Νερό

Οι υδάτινες μάζες απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία με δύο βασικούς τρόπους: από τα μόρια του νερού, γεγονός που αυξάνει τη θερμοκρασία του, και από το φυτοπλαγκτόν κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Τα ορατά μήκη κύματος, όπως το μπλε φως, διαπερνούν μεγαλύτερα βάθη στο νερό, ενώ τα κόκκινα και τα υπέρυθρα μήκη κύματος απορροφούνται έντονα στα πρώτα μέτρα από την επιφάνεια (βλ. **Εικόνα 5**) (jerlov, 1976; Mobley,1994). Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας επηρεάζεται από το μήκος κύματος και την κατάσταση του νερού. Ως αποτέλεσμα, οι υδάτινες επιφάνειες παρουσιάζουν διαφορετική διεισδυτικότητα και ανακλαστικότητα, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για τη θερμική και φωτοχημική τους συμπεριφορά (Kirk, 2011). Αυτή η διαδικασία επηρεάζει τη θερμοκρασία του νερού, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει την οικολογία και τις φυσικές διεργασίες στο υδάτινο περιβάλλον.



Σχήμα 4.27. Εξασθένιση της ηλιακής ακτινοβολίας στα διάφορα βάθη μέσα στο νερό.

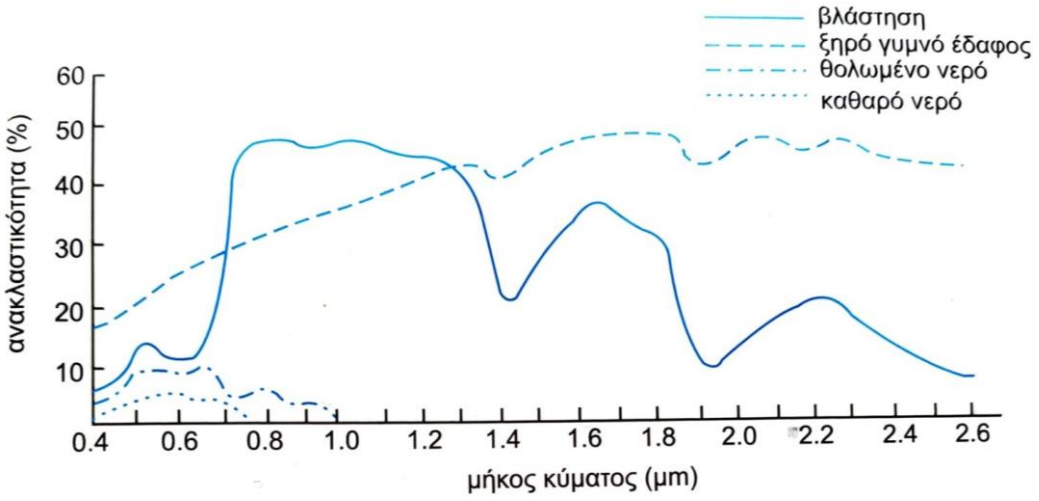
Εικόνα 5: «Απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στα διαφορά βάθη μέσα στο νερό» (Πηγή: www.geo.auth.gr/courses).

1.5 Φασματική Υπογραφή και Φασματικές Ιδιότητες Υλικών

Στη δορυφορική Τηλεπισκόπηση, οι φασματικοί αισθητήρες, όπως τα φασματόμετρα, επιτρέπουν τη μελέτη της φασματικής απόκρισης των επιφανειών στα διάφορα μήκη κύματος (Goetz et al., 1985). Η φασματική απόκριση αναφέρεται στην κατανομή της ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από μια επιφάνεια σε σχέση με το μήκος κύματος (λ) (Καρτάλης & Φειδάς, 2013). Κάθε υλικό διαθέτει μοναδική φασματική υπογραφή (spectral signature), η οποία επιτρέπει τη διακριτή αναγνώριση του και την εξαγωγή πληροφοριών για τις φυσικοχημικές του ιδιότητες (Jensen, 2015). Μέσω της φασματικής ανάλυσης, πραγματοποιείται η ταυτοποίηση διαφορετικών τύπων επιφανειών, όπως η βλάστηση, τα ύδατα, το έδαφος και οι ανθρωπογενείς κατασκευές. Στην (Εικόνα 6), παρουσιάζονται οι φασματικές υπογραφές για τις τρείς βασικές θεματικές τάξεις (έδαφος, βλάστηση, ύδατα).

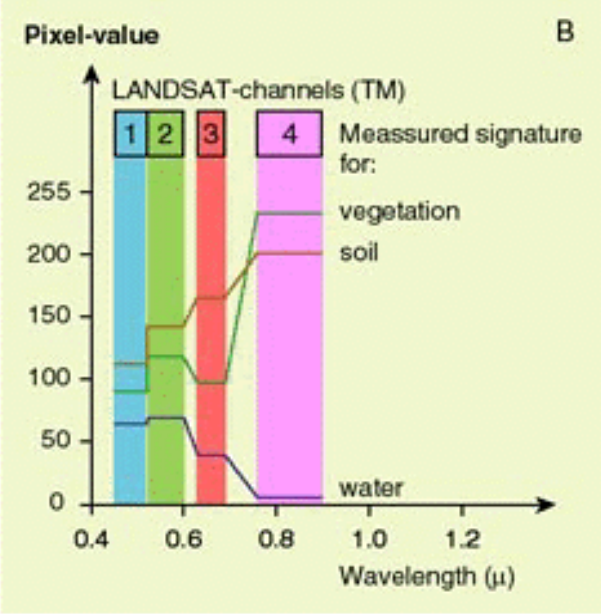
Στις υδάτινες επιφάνειες, η ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη στο ορατό φάσμα (0,4-0,7μm), ενώ στο εγγύς υπέρυθρο (0,76-0,90μm) η ανάκλαση είναι σχεδόν μηδενική. Αυτό καθιστά τις υδάτινες μάζες ευδιάκριτες στις υπέρυθρες δορυφορικές εικόνες καθώς, εμφανίζονται σκοτεινές (Mobley, 1994). Αντίθετα, η βλάστηση εμφανίζει ισχυρή απορρόφηση στο ορατό φάσμα λόγω της χλωροφύλλης, ενώ στο εγγύς υπέρυθρο ανακλά την ακτινοβολία σε μεγάλο ποσοστό, γεγονός που αποτελεί βασικό δείκτη της υγείας των φυτών (Jensen, 2009).

Το έδαφος από την άλλη, παρουσιάζει διαφοροποιημένη φασματική υπογραφή ανάλογα με τη σύσταση, την περιεκτικότητα σε υγρασία και την οργανική ύλη που διαθέτει. Τα ξηρά εδάφη, παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανακλαστικότητα από τα υγρά ή πλούσια σε οργανική ύλη εδάφη (Kirk, 2011). Η φασματική ανάλυση μέσω δορυφορικών αισθητήρων επιτρέπει τη χαρτογράφηση των εδαφών, τη μελέτη της βλάστησης και την παρακολούθηση περιβαλλοντικών μεταβολών, καθώς οι φασματικές υπογραφές καταγράφονται ως ψηφιακές τιμές και αναλύονται για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών (European Space Agency, n.d.).



Εικόνα 6: «Φασματικές υπογραφές των τριών βασικών επιφανειών της γης (έδαφος, βλάστηση, ύδατα) » (Πηγή : (Καρτάλης & Φειδάς, 2023).

Στην (Εικόνα 7), απεικονίζεται ένα υποθετικό παράδειγμα που παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο καταγράφονται οι τρεις βασικές φασματικές υπογραφές στους αισθητήρες του δορυφόρου Landsat. Οι φασματικές αυτές υπογραφές αφορούν διαφορετικούς τύπους επιφανειών, όπως βλάστηση, έδαφος και νερό, αποτυπώνοντας τις διαφοροποιήσεις στην ανάκλαση και εκπομπή της ακτινοβολίας στα διάφορα φασματικά κανάλια του δορυφόρου.



Εικόνα 7: «Υποθετικό παράδειγμα για το πώς ο δορυφόρος Landsat μπορεί να καταγράψει νερό, πράσινη βλάστηση και γυμνό έδαφος» (Πηγή: www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_GR**)**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΗΣ

Ως δορυφόρος παρατήρησης της Γης (Earth Observation– EO satellites), καλείται η υπό τροχιά πλατφόρμα που φέρει πάνω της καταγραφικά συστήματα, όπως αισθητήρες, τα οποία είναι σχεδιασμένα για την παρακολούθηση της Γης. Οι δορυφόροι αυτοί χρησιμοποιούνται για περιβαλλοντική παρακολούθηση, για μετεωρολογία και χαρτογράφηση, καθώς και για στρατιωτικές και μη εφαρμογές. Η δορυφορική απεικόνιση ξεκίνησε το 1972 με τις πρώτες εικόνες του δορυφόρου Landsat και του σαρωτή Multispectral Scanner, οι οποίες, παρότι πρωτόγονες, άλλαξαν τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε τον πλανήτη μας. Τα τελευταία 50 χρόνια, οι δορυφόροι ΕΟ έχουν προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για την Γήινη επιφάνεια, τους ωκεανούς, τον πάγο και την ατμόσφαιρα της Γης, ενώ οι τελευταίες τεχνολογίες της Τηλεπισκόπησης, προσφέρουν καινοτόμες δυνατότητες παρακολούθησης, για ακόμη πιο εξελιγμένα όργανα στο μέλλον. Αυτά τα όργανα συνεχώς βελτιώνονται, διευκολύνοντας την αντιμετώπιση των ζητημάτων περιβαλλοντικής διαχείρισης και προσφέροντας νέα κοινωνικά οφέλη μέσω της γρήγορης εξέλιξης της τεχνολογίας και της επιστήμης της Γης ((Ustin & Middleton, 2024).

2.1 Τύποι και Χαρακτηριστικά Δορυφορικών Αισθητήρων

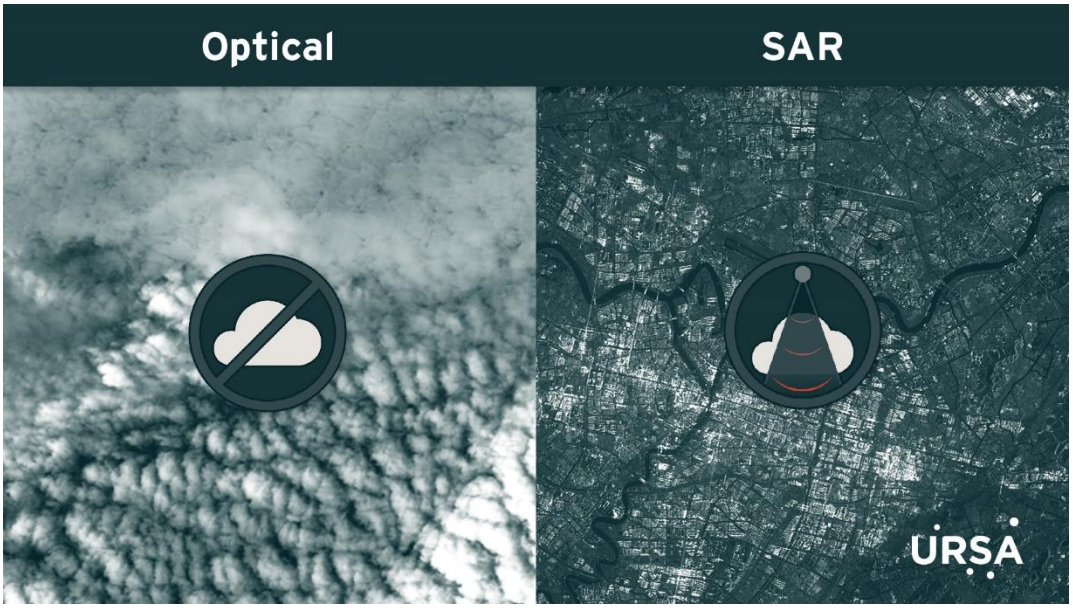
Οι δορυφορικοί αισθητήρες είναι εξειδικευμένα όργανα μέτρησης ΗΜ ακτινοβολίας που φέρονται πάνω στους δορυφόρους ΕΟ. Οι αισθητήρες αυτοί κατηγοριοποιούνται σε δύο βασικούς τύπους, ανάλογα με τη φύση της ακτινοβολίας που καταγράφουν: Παθητικούς και Ενεργητικούς.

Παθητικοί Αισθητήρες: οι παθητικοί αισθητήρες καταγράφουν την ακτινοβολία που εκπέμπεται ή ανακλάται από τα αντικείμενα της επιφάνειας χωρίς να παράγουν τη δική τους πηγή ακτινοβολίας. Οι περισσότεροι δορυφόροι Τηλεπισκόπησης, όπως οι Landsat και Sentinel-2, είναι εξοπλισμένοι με πολυφασματικούς σαρωτές, που καταγράφουν την ακτινοβολία σε διάφορα μήκη κύματος του φάσματος. Αυτό επιτρέπει την καταγραφή και ανάλυση της σύνθεσης και των συνθηκών των επιφανειών της Γης (Περάκης, Μωυσιάδης & Φαρασλής, 2015).

Ενεργητικοί Αισθητήρες: Αντίθετα, οι ενεργητικοί αισθητήρες φέρουν τη δική τους πηγή ακτινοβολίας την οποία κατευθύνουν προς το υπό-έρευνα αντικείμενο. Η ακτινοβολία αυτή ανακλάται από τον στόχο και επιστρέφει στο καταγραφικό σύστημα του αισθητήρα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτών των συστημάτων είναι τα δορυφορικά Ραντάρ, τα οποία εκπέμπουν ακτινοβολία στην περιοχή των μικροκυμάτων «Περισσότερη ανάλυση βλέπε: 2.2 Ραντάρ Παρατήρησης της Γης (Δορυφορικά Ραντάρ)». Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων

ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών ή ώρας της ημέρας, κάτι που τη καθιστά χρήσιμη για την παρακολούθηση της Γήινης επιφάνειας (Καρτάλης & Φειδάς, 2013; Περάκης, Μωυσιάδης & Φαρασλής, 2015).

Στην (Εικόνα 8) παρουσιάζονται δύο δορυφορικές εικόνες από τις δύο κατηγορίες αισθητήρων. Στην αριστερή πλευρά, η εικόνα έχει ληφθεί από έναν οπτικό αισθητήρα («Παθητικό σύστημα»), ενώ στην δεξιά πλευρά από ένα σύστημα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar - SAR) («Ενεργητικό σύστημα»). Στην οπτική εικόνα παρατηρείται η κάλυψη από σύννεφα, η οποία εμποδίζει την παρατήρηση της επιφάνειας της Γης. Αντίθετα, η ύπαρξη της νεφοκάλυψης δεν επηρεάζει την εικόνα SAR η οποία παρέχει καθαρή απεικόνιση της περιοχής, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες ή τον φωτισμό.



Εικόνα 8: «Σύγκριση των δύο διαφορετικών αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στην Τηλεπισκόπηση» (Πηγή: ursaspace.com).

2.1.1 Χωρική Διακριτική Ικανότητα

Η Χωρική διακριτική ικανότητα (Spatial Resolution), ενός αισθητήρα αναφέρεται στην ικανότητα του να διακρίνει δύο αντικείμενα που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους ή να ανιχνεύει το μικρότερο δυνατό αντικείμενο στην επιφάνεια της Γης. Εκφράζεται συνήθως σε μέτρα ή χιλιόμετρα και εξαρτάται από τη στιγμιαία γωνία κατόπτευσης (Instantaneous Field of View, IFOV), η οποία καθορίζει το μέγεθος της περιοχής που παρατηρεί ο αισθητήρας σε κάθε χρονική στιγμή (Καρτάλης & Φειδάς 2013). Οι δορυφόροι που βρίσκονται σε υψηλότερες τροχιές καταγράφουν μεγαλύτερες περιοχές, αλλά με χαμηλότερη χωρική διακριτική ικανότητα, ενώ εκείνοι σε χαμηλότερες τροχιές επιτυγχάνουν μεγαλύτερη λεπτομέρεια στις εικόνες τους. Ωστόσο, η αυξημένη απόσταση λήψης μπορεί να οδηγήσει σε γεωμετρικές αλλοιώσεις, όπως η πανοραμική

παραμόρφωση, που επηρεάζει την ακριβή απεικόνιση της επιφάνειας. Η χωρική διακριτική ικανότητα ενός αισθητήρα είναι κρίσιμη για εφαρμογές όπως η χαρτογράφηση αστικών περιοχών, η περιβαλλοντική παρακολούθηση και η γεωργική διαχείριση (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015; Campbell & Wynne, 2011).

2.1.2 Φασματική Διακριτική Ικανότητα

Η Φασματική διακριτική ικανότητα (Spectral Resolution), αναφέρεται στο εύρος των περιοχών του ΗΜ φάσματος στο καταγράφει ένας πολυφασματικός αισθητήρας, καθώς και στον αριθμό των φασματικών καναλιών που χρησιμοποιεί. Όσο περισσότερα και στενότερα είναι τα φασματικά κανάλια, τόσο υψηλότερη είναι η φασματική διακριτική ικανότητα, επιτρέποντας λεπτομερέστερη ανάλυση των φασματικών χαρακτηριστικών των επιφανειών. Η υψηλή Φασματική διακριτική ικανότητα είναι κρίσιμη στην Τηλεπισκόπηση, καθώς επιτρέπει τον ακριβή διαχωρισμό διαφορετικών υλικών και επιφανειών, όπως βλάστηση, έδαφος και υδάτινες μάζες. Αυτό συμβάλει στη βελτίωση της χαρτογράφησης γεωργικών, δασικών και αστικών περιοχών, καθώς και στην ανίχνευση περιβαλλοντικών μεταβολών (Καρτάλης & Φειδάς, 2013; Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015).

2.1.3 Ραδιομετρική Διακριτική Ικανότητα

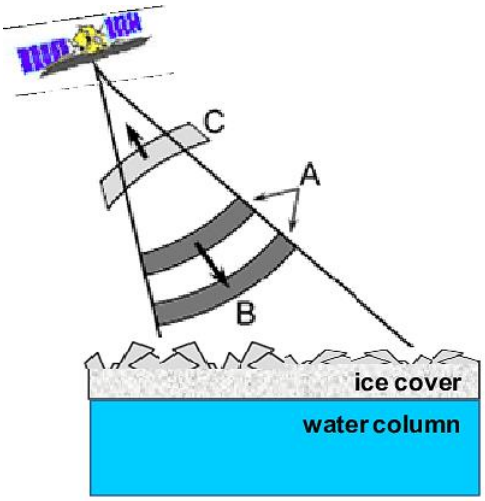
Η Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα (Radiometric Resolution), αναφέρεται στην ικανότητα του αισθητήρα να ανιχνεύει μικρές διαφορές στην ένταση της ανακλώμενης από την επιφάνεια της Γης ακτινοβολίας. Αυτή η ικανότητα είναι σημαντική για την ακριβή ανάλυση των φυσικών χαρακτηριστικών, καθώς επηρεάζει την ευκρίνεια της καταγραφής των μεταβολών στη φωτεινότητα των επιφανειών. Όσο υψηλότερη είναι η Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα, τόσο μεγαλύτερη η ικανότητα ανίχνευσης λεπτών διάφορων στο σήμα, ενισχύοντας τις εφαρμογές στην παρακολούθηση περιβαλλοντικών και γεωλογικών φαινομένων (Καρτάλης & Φειδάς, 2013; Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015).

2.1.4 Χρονική Διακριτική Ικανότητα

Η χρονική διακριτική ικανότητα (Temporal Resolution), αναφέρεται στη συχνότητα λήψης εικόνων από έναν δορυφόρο και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της τροχιάς του. Αυτή η συχνότητα μπορεί να κυμαίνεται από λίγα λεπτά όπως συμβαίνει στους γεωστατικούς δορυφόρους, έως και μερικές εβδομάδες για δορυφόρους πολικής τροχιάς. Η δυνατότητα συνεχούς καταγραφή εικόνας είναι κρίσιμη για την παρακολούθηση αλλαγών στη γήινη επιφάνεια, όπως στη μετεωρολογία και σε φυσικές καταστροφές, όπου η ταχύτητα αντίδρασης είναι σημαντική (Περάκης, Μωυσιάδης, & Φαρασλής, 2015).

2.2 Ραντάρ Παρατήρησης της Γης (Δορυφορικά Ραντάρ)

Το Ραντάρ (Radio Detection and Ranging, RADAR), είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο ενεργητικό σύστημα Τηλεπισκόπησης που βασίζεται στη χρήση μικροκυμάτων για την ανίχνευση αντικειμένων στην επιφάνεια της Γης. Αποτελείται από έναν πομπό που εκπέμπει παλμούς ακτινοβολίας και έναν δέκτη που καταγραφεί το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα («ηχώ»). Μετρώντας τον χρόνο επιστροφής του σήματος, υπολογίζεται η απόσταση των αντικειμένων και δημιουργείται μια δισδιάστατη εικόνα της επιφάνειας. Ο τρόπος λειτουργίας των δορυφορικών ραντάρ απεικονίζεται στην (Εικόνα 9) (Περάκης, Μωυσιάδης, & Φαρασλής, 2015; Campbell & Wynne, 2011).



Εικόνα 9 : «Τρόπος λειτουργίας ραντάρ : Α) Παλμοί (σήμα) που εκπέμπονται από το σύστημα, Β) ζώνη αλληλεπίδρασης σήματος, C) Οπισθοσκεδαζόμενο σήμα (ηχώ)» (Πηγή: www.researchgate.net).

2.2.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Εικονοληψίας Ραντάρ

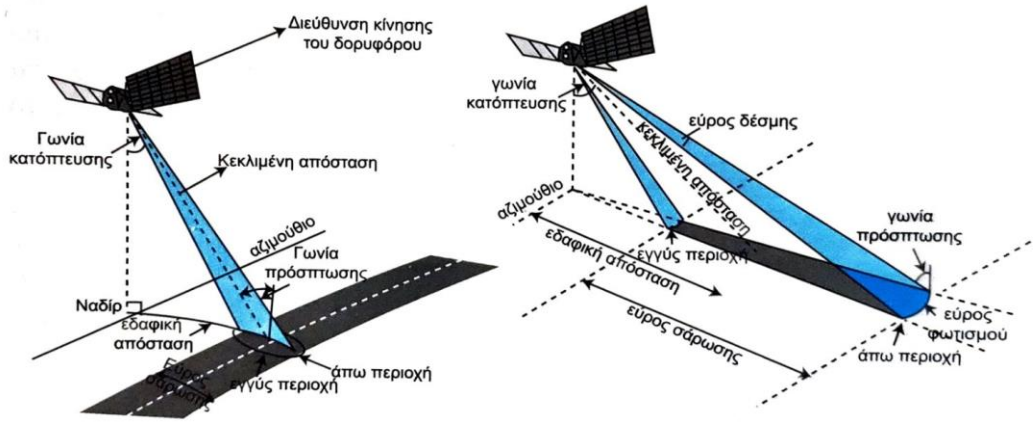
Η δέσμη μικροκυμματικής ακτινοβολίας (radar beam) που εκπέμπεται από τον πομπό του δορυφόρου, σαρώνει μια ζώνη συγκεκριμένου πλάτους στην επιφάνεια της Γης, η οποία βρίσκεται εκτός του ίχνους του δορυφόρου. Αυτή η ζώνη ονομάζεται ναδίρ (nadir). Ο κάθετος άξονας προς τη διεύθυνση της τροχιάς του δορυφόρου καλείται εύρος (range), ενώ ο παράλληλος σε αυτήν άξονας ονομάζεται αζιμούθιο (azimuth). Η περιοχή της εικόνας κοντά στο ναδίρ ονομάζεται εγγύς περιοχή (near range), ενώ η πιο απομακρυσμένη περιοχή ονομάζεται άπω περιοχή (far range).

Η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της δέσμης μικροκυμματικής ακτινοβολίας και μιας κάθετης στο έδαφος διεύθυνσης, και αυξάνεται από την εγγύς (Near) προς την άπω (Far) περιοχή. Η γωνία κατοπτεύσεως (look angle), είναι η γωνία με την οποία το Ραντάρ «βλέπει» την επιφάνεια της Γης. Το εύρος φωτισμού (illumination range), αντιστοιχεί στο γωνιακό εύρος της ζώνης σάρωσης, το οποίο μετριέται σε μέτρα στο έδαφος. Λόγω του μεγάλου ύψους της τροχιάς των δορυφορικών Ραντάρ, οι γωνίες πρόσπτωσης των δεσμών

ακτινοβολίας που εκπέμπονται είναι μικρές (συνήθως 5°-25°), γεγονός που συμβάλει σε πιο ομοιόμορφο φωτισμό και μειώνει τις γεωμετρικές παραμορφώσεις σε σχέση με τα αερομεταφερόμενα ραντάρ.

Η κεκλιμένη απόσταση (slant range), είναι η απόσταση από την πλατφόρμα του Ραντάρ μέχρι το αντικείμενο – στόχο στην επιφάνεια της Γης, ενώ η εδαφική απόσταση (ground range distance) είναι η πραγματική οριζόντια απόσταση κατά μήκος του εδάφους, μεταξύ του ίχνους του δορυφόρου (ναδίρ) και του αντικειμένου – στόχου (Καρτάλης & Φειδάς, 2023).

Η (Εικόνα 10) παρουσιάζει όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά της εικονοληψίας με δορυφορικά Ραντάρ



Εικόνα 10: «Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εικονοληψίας ραντάρ» (Πηγή: Καρτάλης & Φειδάς, 2013).

2.2.2 Διακριτικές Ικανότητες Συστημάτων Ραντάρ

Η χωρική διακριτική ικανότητα των συστημάτων Ραντάρ εξαρτάται από την μικροκυμματική ακτινοβολία και την γεωμετρία εικονοληψίας. Η μικροκυμματική ακτινοβολία εκπέμπεται σε παλμούς κατά μήκος της κεκλιμένης απόστασης (range or across-track resolution). Για να διαχωριστούν δύο αντικείμενα σε κάθετη διεύθυνση προς την πορεία του δορυφόρου, πρέπει η απόσταση τους να είναι μεγαλύτερη από το μισό μήκος του παλμού (Xu et al., 2022; Moreira et al. 2013).

Η διακριτική ικανότητα αζιμούθιου (azimuth resolution) καθορίζεται από το εύρος φωτισμού της δέσμης στο έδαφος, το οποίο είναι αντιστρόφως ανάλογο με το μήκος της κεραίας του Ραντάρ. Μεγαλύτερη κεραία οδηγεί σε στενότερη δέσμη και καλύτερη διακριτική ικανότητα. Καθώς η δέσμη σαρώνει σε μεγαλύτερες αποστάσεις από το ναδίρ του δορυφόρου, η διακριτική ικανότητα μειώνεται, καθώς οι στόχοι πρέπει να απέχουν μεγαλύτερη απόσταση παράλληλα με την πορεία του δορυφόρου για να διακριθούν. Ωστόσο, το μήκος της κεραίας περιορίζεται από τεχνικά

όρια και δεν μπορεί να υπερβεί τα 15 μέτρα στους δορυφόρους (Καρτάλης & Φειδάς, 2013; Wang, Ruan, & Zhang 2023).

2.2.3 Είδη Ραντάρ και Εφαρμογές

Στην δορυφορική Τηλεπισκόπηση χρησιμοποιούνται δύο είδη Ραντάρ: τα πραγματικού ανοίγματος κεραίας (Real Aperture Radar, RAR) και τα πιο «σύγχρονα», τα συνθετικού ανοίγματος κεραίας (Synthetic Aperture Radar, SAR). Το εύρος της δέσμης μικροκυμματικής ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογο με το μήκος κεραίας (Aperture) του Ραντάρ. Δηλαδή, όσο μεγαλύτερη είναι η κεραία, τόσο μικρότερο είναι το εύρος της δέσμης και τόσο μεγαλύτερη είναι η χωρική διακριτική ικανότητα του Ραντάρ στο άξονα του αζιμούθιου (πλευρική ανάλυση). Τα RAR συστήματα, που χρησιμοποιούν κεραίες μεγάλου μήκους, έχουν μικρό εύρος φωτισμού και κατά συνέπεια, υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα. Ωστόσο, η μεταφορά και η λειτουργεία μια τόσο μεγάλης κεραίας είναι ιδιαίτερα δύσκολη και περιορίζει την χρήση του RAR για την μελέτη μικρών περιοχών (Καρτάλης & Φειδάς, 2013). Το πρόβλημα αυτό, ξεπεράστηκε με την ανάπτυξη των Ραντάρ συνθετικού ανοίγματος κεραίας (SAR). Το SAR συνθέτει μια εικονική κεραία πολύ μεγαλύτερου μήκους από την πραγματική κεραία, αξιοποιώντας την κίνηση της δορυφορικής πλατφόρμας και το φαινόμενο Doppler (μετατόπιση του μήκους κύματος λόγω της σχετικής κίνησης παρατήρησης και πηγής). Μέσω ειδικών διαδικασιών καταγραφής του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος, ένα σύστημα SAR με κεραία 10 μέτρων μπορεί να προσομοιώσει τη λειτουργία μια κεραίας 60 μέτρων, επιτυγχάνοντας έτσι εξαιρετική χωρική διακριτική ικανότητα. Οι κεραίες SAR εκπέμπουν σήματα μεγάλου γωνιακού εύρους κατά την εγκάρσια διεύθυνση της τροχιάς του δορυφόρου, σε τακτά χρονικά διαστήματα. Λόγω του μεγάλου γωνιακού εύρους της εκπεμπόμενης δέσμης, οι στόχοι στην επιφάνεια της Γης κινούνται εντός του πεδίου φωτισμού και στην συνέχεια εξέρχονται από αυτό. Μόλις ο στόχος εισέλθει στη δέσμη της ακτινοβολίας, ξεκινά η καταγραφή του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος. Καθώς ο δορυφόρος συνεχίζει την κίνηση του, το σύστημα του Ραντάρ συνεχίζει να καταγράφει το σήμα του στόχου, όσο αυτός παραμένει εντός της δέσμης (Adhikari et al., 2021; L'Abbate et al., 2015).

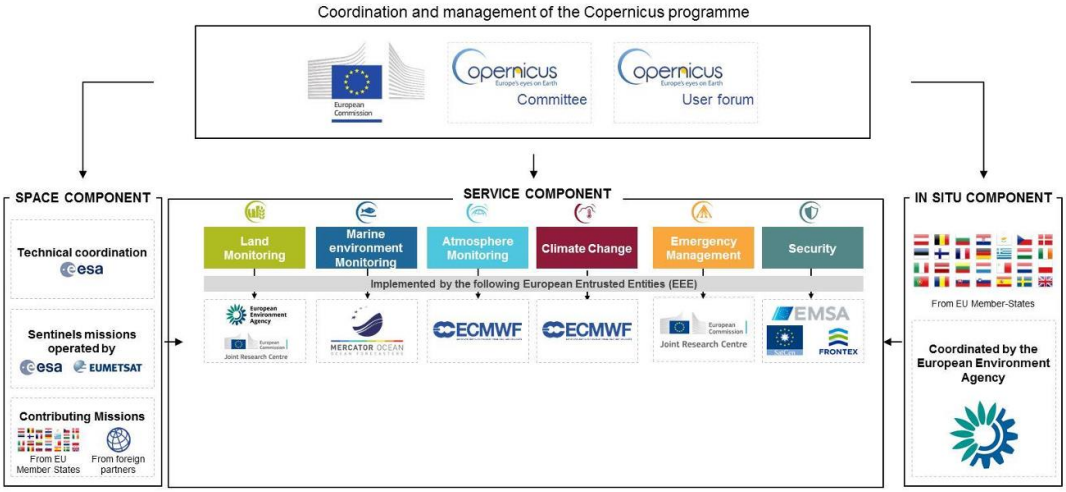
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COPERNICUS

3.1 Το Πρόγραμμα Copernicus: Στόχοι και Υπηρεσίες

Το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα Copernicus, παλαιότερα γνωστό και ως GMES (Global Monitoring for Environment and Security), αποτελεί ένα από τα πιο φιλόδοξα και αξιόπιστα συστήματα παρατήρησης της Γης. Το πρόγραμμα αυτό παρέχει προϊόντα και υπηρεσίες, που στοχεύουν στην βελτίωση της διαχείρισης του περιβάλλοντος και στην αντιμετώπιση των παγκόσμιων προκλήσεων. Προσφέρει ακριβή δεδομένα σε σύντομο χρονικό διάστημα για ένα ευρύ φάσμα πρακτικών εφαρμογών, συμβάλλοντας έτσι στην βελτίωση της καθημερινής ζωής, στην ασφάλεια και στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Το πρόγραμμα αυτό, διευθύνεται συνολικά από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (EC), που ενεργεί για λογαριασμό της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ). Οι υπηρεσίες Copernicus λειτουργούν από οργανισμούς του δημόσιου και ιδιωτικού τομέα, που επιλέγονται από την EC. Το European Environment Agency (EEA) ή το EU Joint Research Centre (JRC), είναι μερικά από αυτά. Η European Space Agency (ESA), είναι ο κύριος εταίρος της ΕΕ για τις διαστημικές υπηρεσίες του προγράμματος. Το τμήμα της ESA περιλαμβάνει δορυφόρους που αναπτύχθηκαν ειδικά για το Copernicus, όπως η οικογένεια των δορυφόρων Sentinel, καθώς και αποστολές από άλλες διαστημικές υπηρεσίες που, αν και δεν σχεδιάστηκαν για το πρόγραμμα Copernicus, συνεισφέρουν στο πρόγραμμα αυτό. Επίσης η ESA, συνεργάζεται στενά με τον European Organization for the Meteorological Satellites (EUMETSAT), ο οποίος αναπτύσσει μέρος της υποδομής και λειτουργεί συγκεκριμένες αποστολές Sentinel. Εκτός από τα διαστημικά δεδομένα, το Copernicus συλλέγει και δεδομένα, γνωστά ως (in situ), από επίγειους σταθμούς και αισθητήρες που είναι εγκαταστημένοι σε πλωτές κατασκευές, σε ερευνητικά σκάφη, αερόστατα ή αεροσκάφη και βασίζεται σε δίκτυα και προγράμματα σε Ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο (Jutz & Milagro-Perez, 2018).

Η δομή, δηλαδή οι οργανισμοί και οι φορείς, που συμμετέχουν στον συντονισμό και την διαχείριση του προγράμματος Copernicus συνοψίζεται στο διάγραμμα της (Εικόνα 11).



Εικόνα 11: «Συντονισμός και διαχείριση του προγράμματος Copernicus» (Πηγή: www.researchgate.net).

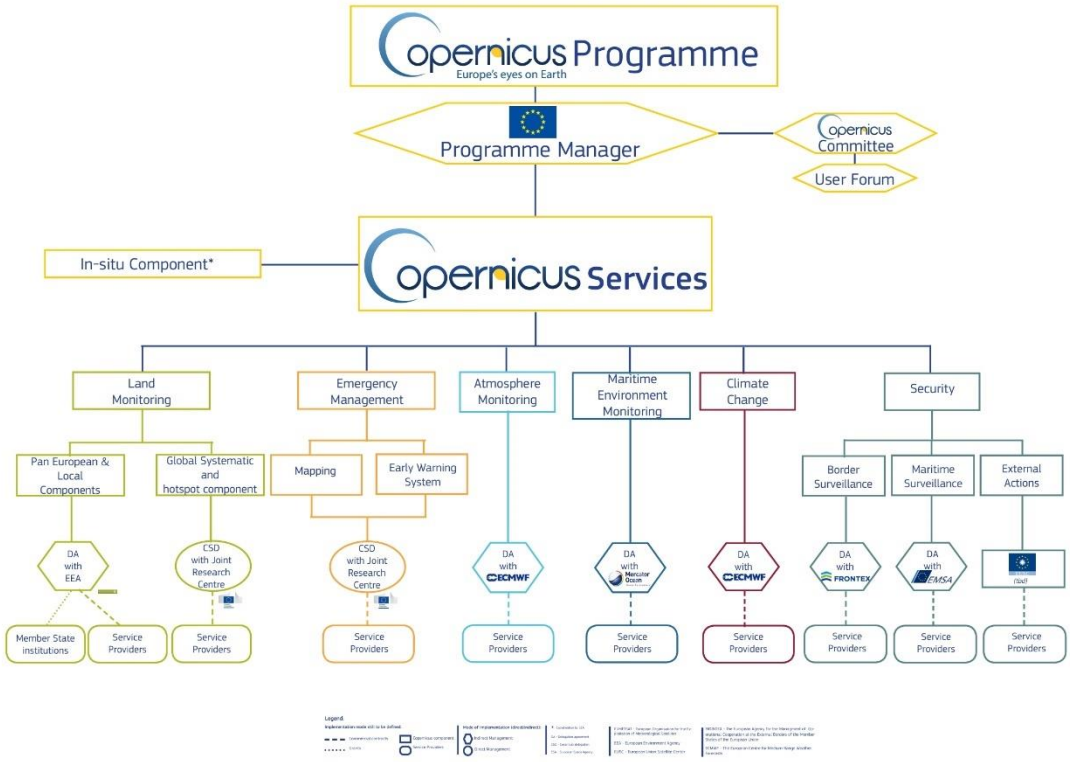
Το πρόγραμμα Copernicus στοχεύει στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος και της κλιματικής αλλαγής, προσφέροντας δωρεάν και ανοιχτή πρόσβαση σε δορυφορικά δεδομένα και υπηρεσίες. Οι έξι βασικές υπηρεσίες που παρέχονται από το πρόγραμμα αυτό είναι:

- Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS): Παρακολούθηση της υγείας των θαλασσών και των ωκεανών, παρέχοντας πληροφορίες για τις ωκεάνιες συνθήκες, την ποιότητα των υδάτων και τις οικολογικές τάσεις, (Copernicus Marine Environment Monitoring Service, n.d.).
- Copernicus Security Service: Υποστηρίζει την ασφάλεια της Ευρωπαϊκής Ένωσης, παρέχοντας πληροφορίες για την παρακολούθηση συνόρων, την αντιμετώπιση κρίσεων και την προστασία από φυσικές και ανθρώπινες απειλές, Copernicus Security Service, n.d.).
- Copernicus Land Monitoring Service (CLMS): Παρέχει δεδομένα σχετικά με τη χρήση της Γης, την αστική ανάπτυξη, τη γεωργία, τα δάση και τις υπό προστασία περιοχές της φύσης, (Copernicus Land Monitoring Service, n.d.).
- Copernicus Emergency Management Service (Copernicus EMS): Υποστηρίζει την αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών, όπως πλημμύρες, σεισμοί, δασικές πυρκαγιές και περιβαλλοντικές καταστροφές, μέσω χαρτογραφήσεων και πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο, (Copernicus Emergency Management Service, n.d.)
- Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS): Παρακολουθεί την ποιότητα του αέρα, τις εκπομπές ρύπων και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, παρέχοντας

πληροφορίες για τη ρύπανση και την κλιματική αλλαγή (Copernicus Atmosphere Monitoring Service, n.d.).

- Copernicus Climate Change Service (C3S): Παρέχει δεδομένα σχετικά με τις τάσεις της κλιματικής αλλαγής, υποστηρίζοντας τη διαχείριση και προσαρμογή στις κλιματικές αλλαγές, (Copernicus Climate Change Service, n.d.).

Στην (Εικόνα 12) παρουσιάζεται το διάγραμμα της δομής του προγράμματος Copernicus, αναδεικνύοντας τις έξι κύριες υπηρεσίες του. Κάθε υπηρεσία υποστηρίζει διαφορετικές δραστηριότητες παρακολούθησης περιβάλλοντος και ασφάλειας σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, με την συνεργασία εξειδικευμένων φορέων και Ευρωπαϊκών θεσμών.



Εικόνα 12: «Διάγραμμα των βασικών υπηρεσιών του προγράμματος Copernicus» (Πηγή: copernicus.eu).

Οι δορυφορικές αποστολές Sentinel, αναπτύσσονται για να υποστηρίξουν αυτές τις υπηρεσίες, παρέχοντας εικόνες υψηλής ανάλυσης για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος και της Γης γενικότερα. Μετά την εκτόξευση του Sentinel-1A, το 2014, η ΕΕ έχει ξεκινήσει μια διαδικασία για να θέσει σε τροχιά έναν «αστερισμό» σχεδόν 20 ακόμη δορυφόρων πριν το 2030.

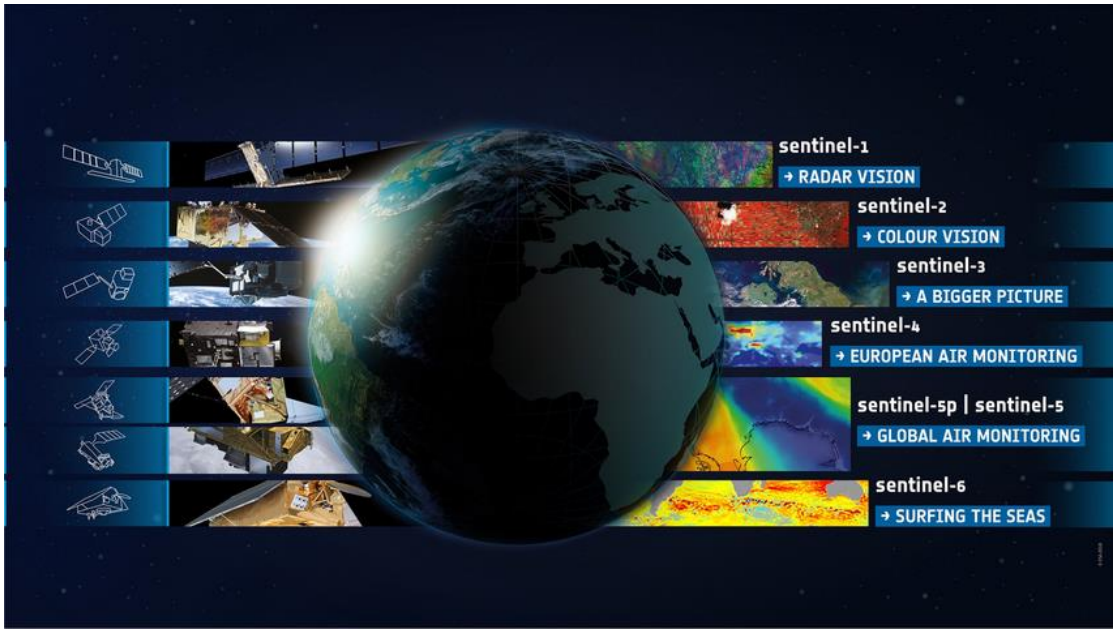
3.2 Δορυφόροι του Copernicus

Η ESA έχει αναπτύξει την οικογένεια δορυφόρων Sentinel, για να καλύψει τις επιχειρησιακές ανάγκες του προγράμματος Copernicus.

- Η πρώτη κατηγορία δορυφόρων είναι η **Sentinel-1**, η οποία αποτελείται από δύο δίδυμους δορυφόρους: τον Sentinel-1A και τον Sentinel-1B, (με τον Sentinel-1C να προγραμματίζεται να αντικαταστήσει τον Sentinel-1B). Οι δορυφόροι αυτοί χρησιμοποιούν ραντάρ απεικόνισης C-Band καταγραφικό σύστημα (Synthetic Aperture Radar-SAR), για την συνεχή παρακολούθηση της επιφάνειας της Γης ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών και φωτισμού.
- Ο **Sentinel-2** αποτελεί την δεύτερη κατηγορία δορυφόρων και περιλαμβάνει δύο δορυφόρους, τον Sentinel-2A και Sentinel-2B, που φέρουν πολυφασματικούς οπτικούς αισθητήρες (Multi-Spectral Instrument - MSI). Οι αισθητήρες αυτοί καταγράφουν τα ορατά και τα υπέρυθρα μήκη κύματος, προσφέροντας δεδομένα για τη χαρτογράφηση της χλωρίδας και την διαχείριση των φυσικών πόρων. Ο Sentinel-2C τέθηκε σε τροχιά στις 5 Σεπτεμβρίου 2024, συμπληρώνοντας με επιτυχία την συνέχεια της δορυφορικής αποστολής Sentinel-2.
- Η Τρίτη κατηγορία δορυφόρων, **Sentinel-3**, αποτελείται από τους δορυφόρους Sentinel-3A και Sentinel-3B. Οι δορυφόροι αυτοί διαθέτουν διάφορους αισθητήρες, όπως δέκτες Radar Altimeter, μικροκομματικά ραδιόμετρα (Micro Wave Radiometer-MWR), καθώς και συστήματα GNSS (Global Navigation Satellites System), και DORIS (Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellites). Ο κύριος στόχος των δορυφόρων Sentinel-3 είναι να συνεχίσουν την παροχή δεδομένων από τις προηγούμενες αποστολές Envisat και ERS, με έμφαση στη χαρτογράφηση της επιφάνειας της θάλασσας και της θερμοκρασίας της επιφάνειας των ωκεανών.
- Ο **Sentinel-4** είναι ένα φασματόμετρο στην περιοχή Ultraviolet Visible Near-Infrared (UVN), για την παρακολούθηση βασικών ιχνοστοιχείων αερίων και αερολυμάτων σε ολόκληρη την Ευρώπη. Αυτός ο δορυφόρος φέρει επίσης το όργανο TROPOMI, και προορίζεται να τοποθετηθεί σε δορυφόρους της σειράς Meteosat Third Generation Sounder (Metop-SG A) της EUMETSAT (Ευρωπαϊκούς Μετεωρολογικός Οργανισμός για την εκμετάλλευση μετεωρολογικών δορυφόρων).

- Ο Sentinel-5 είναι επίσης ένα φασματόμετρο Visible Near-Infrared Short-wave Infrared (UVNS) και έχει σχεδιαστεί για να τοποθετηθεί στους δορυφόρους Metop Second Generation (Metop-SG A) της EUMETSAT.
- Ο Sentinel-5 Precursor είναι ο πρώτος δορυφόρος του προγράμματος Copernicus που εξειδικεύεται στην παρακολούθηση της ατμόσφαιρας. Ο δορυφόρος αυτός είναι εξοπλισμένος με το όργανο TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) για τον εντοπισμό αερίων στην ατμόσφαιρα.
- Τέλος, ο Sentinel-6A (Michael Freilich) είναι εξοπλισμένος με το υψομετρικό Ραντάρ (altimeter radar) Poseidon-4 και ένα ραδιόμετρο μικροκυμάτων, με σκοπό την μέτρηση της στάθμης των ωκεανών, συνεχίζοντας τη σειρά αποστολών που ξεκίνησε με τους δορυφόρους Jason και TOPEX/Poseidon. Ο Sentinel-6B θα εκτοξευτεί το 2025 και μαζί με τον Sentinel-6A, θα παρέχουν την πιο ακριβή πηγή παρατηρήσεων του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας, της μέσης στάθμης της θάλασσας και της κυκλοφορίας των ωκεανών, τουλάχιστον μέχρι το 2030.

Στην (Εικόνα 13) παρουσιάζονται οι δορυφόροι Sentinel του προγράμματος Copernicus με τις κύριες εφαρμογές τους.



Εικόνα 13: «Αναπαράσταση της οικογένειας δορυφόρων Sentinel του προγράμματος Copernicus. Δίπλα από κάθε δορυφόρο, εμφανίζονται ενδεικτικά δεδομένα και οι κύριες εφαρμογές τους: (Sentinel-1 με ραντάρ παρακολούθησης (Radar Vision), το Sentinel-2 με πολυφασματική παρατήρηση (Color Vision), το Sentinel-3 για ευρύτερη παρακολούθηση της γης και των ωκεανών (A Bigger Picture), το Sentinel-4 για την παρακολούθηση της ατμόσφαιρας στην Ευρώπη (European Air Monitoring), το Sentinel-5P και Sentinel-5 για την παγκόσμια παρακολούθηση της ατμόσφαιρας (Global Air Monitoring), και το Sentinel-6 για την παρακολούθηση των ωκεανών (Surfing the Seas)»,(Πηγή εικόνας: www.researchgate.net).

3.3 Η Αποστολή Sentinel-1

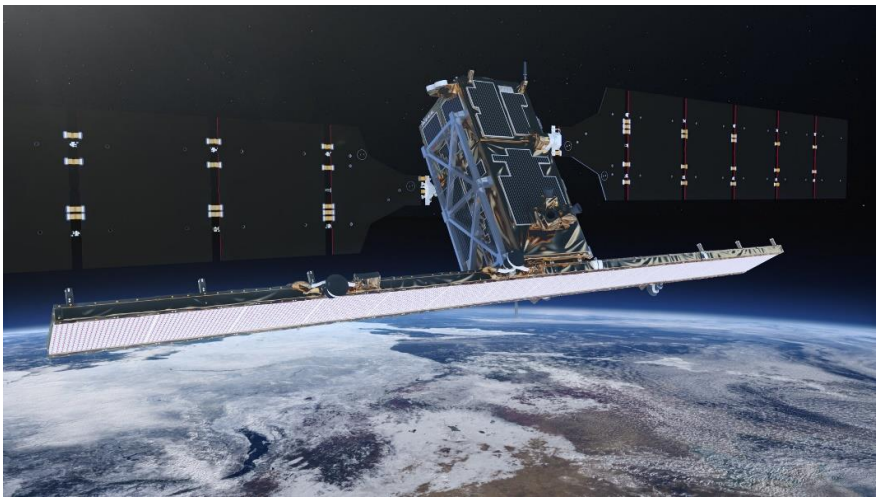
Ο δορυφόρος Sentinel-1 έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με έναν προγραμματισμένο τρόπο λειτουργείας, ο οποίος συνδυάζει ευρεία κάλυψη και υψηλή ανάλυση, εξασφαλίζοντας τη δημιουργία ενός συνεπούς μακροπρόθεσμου αρχείου δεδομένων, το οποίο είναι κρίσιμο για εφαρμογές που βασίζονται σε μεγάλες χρονοσειρές, όπως η κλιματική παρακολούθηση και η διαχείριση πόρων. Η αποστολή περιλαμβάνει έναν αστερισμό δύο σύγχρονών με τον ήλιο δορυφόρων σε πολική τροχιά, που μοιράζονται το ίδιο τροχιακό επίπεδο με διαφορά φάσης 180°, επιτρέποντας συνεχείς παρατηρήσεις ημέρα και νύχτα, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες. Οι δορυφόροι αυτοί χρησιμοποιούν Ραντάρ συνθετικού διαφράγματος (SAR) στη ζώνη C-Band, επιτρέποντας την λήψη εικόνων υψηλής ανάλυσης ακόμα και σε δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες. Το Sentinel-1 προσφέρει τέσσερις λειτουργείες απεικόνισης με διαφορετικές προδιαγραφές όσον αφορά την ανάλυση (έως 5m) και στην κάλυψη (έως 400km), ενώ παρέχει και δυνατότητα διπλής πόλωσης, κάτι που ενισχύει την ακρίβεια των δεδομένων. Οι σύντομοι χρόνοι επανα-επίσκεψης και η γρήγορη παράδοση δεδομένων συμβάλουν στην αξιόπιστη παρακολούθηση του περιβάλλοντος και στην αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Οι βασικές εφαρμογές του Sentinel-1 περιλαμβάνουν την παρακολούθηση:

- Παγκόσμιων μαζών Γης: Καταγραφή αλλαγών στη Γη, όπως η βλάστηση, η γεωργία και οι φυσικές καταστροφές.
- Θαλάσσιου πάγου: Εποπτεία της κάλυψης και της μεταβολής του θαλάσσιου πάγου.
- Πάγου στην στεριά: Εντοπισμός της μεταβολής των παγετώνων και των πάγων της Αρκτικής και της Ανταρκτικής.
- Ωκεανών και θαλασσών: Παρακολούθηση των ρευμάτων, των κυμάτων και των ανέμων στην επιφάνεια του ωκεανού.
- Ναυτικής επιτήρησης: Ενίσχυση της ασφάλειας στις θαλάσσιες διαδρομές και καταπολέμηση της παράνομης δραστηριότητας.
- Αντιμετώπιση έκτακτης ανάγκης: Παροχή κρίσιμων δεδομένων για την αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών, όπως πλημμύρες και σεισμοί.

Ο δορυφόρος Sentinel-1A ήταν ο πρώτος που τέθηκε σε τροχιά στις 3 Απριλίου 2014. Δυο χρόνια αργότερα, στις 25 Απριλίου 2016, εκτοξεύτηκε ο Sentinel-1B, ο οποίος αποτέλεσε το «αδερφάκι» του Sentinel-1A, συμπληρώνοντας τον αστερισμό των δύο δορυφόρων. Ωστόσο, ο Sentinel-1B παρουσίασε μια ανωμαλία που αφορούσε την τροφοδοσία των ηλεκτρονικών οργάνων της πλατφόρμας, γεγονός που τον έκανε ανίκανο να συλλέγει δεδομένα Ραντάρ από τις 23

Δεκεμβρίου 2021. Κατά συνέπεια, η ESA και η EC ανακοίνωσαν το τέλος της αποστολής του, στις 3 Αυγούστου 2022. Η αντικατάστασή του πραγματοποιήθηκε στις 5 Δεκέμβριου 2024 με την επιτυχή εκτόξευση του Sentinel-1C από το διαστημικό λιμάνι της Ευρώπης στην Γαλλία (sentiwiki.copernicus.eu, , n.d.).

Η (**Εικόνα 14**) παρουσιάζει την ρεαλιστική απεικόνιση Sentinel-1A υπό τροχιά πάνω από την επιφάνεια της Γης.



Εικόνα 14: «Απεικόνισή του Sentinel-1 υπό τροχιά» (Πηγή: www.esa.int).

3.3.1 Περιγραφή του Δορυφόρου

Ο δορυφόρος Sentinel-1 αναπτύχθηκε από μια βιομηχανική κοινοπραξία υπό την ηγεσία της Thales Alenia Space Italy, με την Astrium Germany υπεύθυνη για το ραντάρ C-SAR (C-Band Radar) και την Astrium UK για το ηλεκτρικό υποσύστημα του Ραντάρ.

Ο Sentinel-1 είναι σταθεροποιημένος σε τρεις άξονες και διαθέτει σύστημα προσανατολισμού(yaw/pitch/roll) με μηδενική μετατόπιση Doppler. Η ακρίβεια προσανατολισμού διατηρείται μέσω αισθητήρων ήλιου, αστέρα, γυροσκοπίων και μαγνητικών αισθητήρων. Η διαχείριση στάσης και τροχιάς επιτυγχάνεται με τροχούς αντίδρασης και ράβδους ροπής, διασφαλίζοντας ακρίβεια στον έλεγχο διεύθυνσης. Η παροχή ενέργειας βασίζεται σε δύο φωτοβολταϊκές συστοιχίες που παράγουν έως 5900W, με αποθήκευση σε αρθρωτή μπαταρία χωρητικότητας 324Ah. Ο δορυφόρος χρησιμοποιεί τον δορυφορικό δίαυλο PRIMA, αξιοποιώντας τεχνολογίες από τα RADARSAT-2 και COSMO-SkyMed, επιτυγχάνοντας ακρίβεια προσανατολισμού καλύτερη από 0,004° και στάσης περίπου 0,01° σε κάθε άξονα. Ο δορυφόρος διαθέτει αποθηκευτική ικανότητα δεδομένων 1,410GB, ενώ η επικοινωνία με την Γη γίνεται μέσω X-Band για κάθοδο δεδομένων TM/TC στα 64Kbps και 128kbps/2Mbps αντίστοιχα. Η τροχιά διατηρείται εντός σταθεροποιημένου τροχιακού σωλήνα 120 μέτρων (RMS).

Η συνολική μάζα του Sentinel-1 κατά την εκτόξευση ήταν 2.300kg, συμπεριλαμβανόμενων 130kg καυσίμου. Ο δορυφόρος σχεδιάστηκε για να παρέχει υψηλής ανάλυσης εικόνων ραντάρ, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα στην παρατήρηση ης Γης, την παρακολούθηση περιβαλλοντικών φαινομένων και την υποστήριξη διαχείρισης φυσικών καταστροφών (Sentiwiki, n.d.).

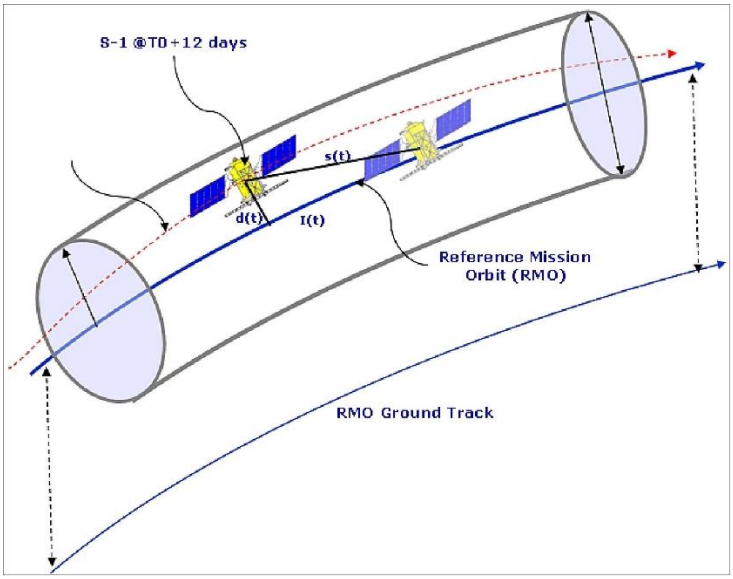


Εικόνα 15: «Ο δορυφόρος Sentinel-1 με το ραντάρ του σε πλήρη ανάπτυξη κατά τη διάρκεια δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας στις εγκαταστάσεις της Thales Alenia Space στις Κάννες της Ιταλίας» (Πηγή: futura-sciences.com).

3.3.2 Τροχιά - Γεωγραφική κάλυψη δορυφόρου

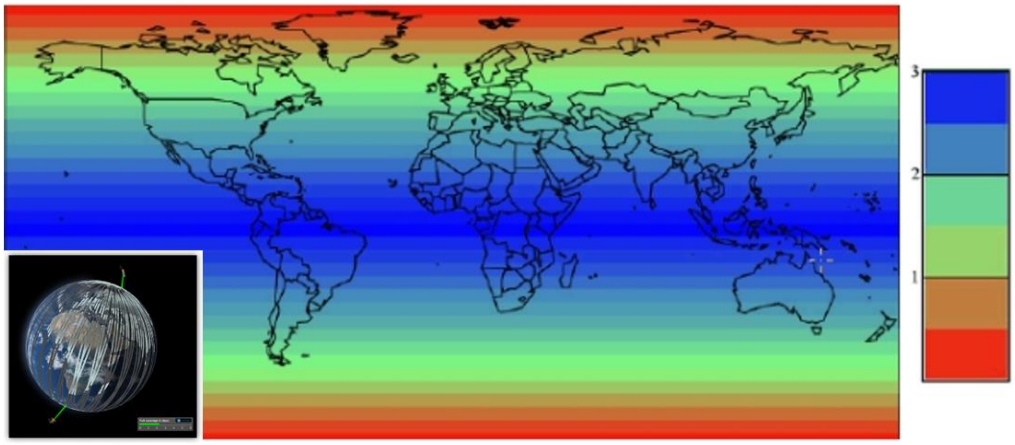
Ο Sentinel-1 λειτουργεί σε μια σχεδόν πολική τροχιά, με κύκλο επανάληψης 12 ημέρων και 175 τροχιές ανά κύκλο για έναν μόνο δορυφόρο. Οι δορυφόροι Sentinel-1A και Sentinel-1B μοιράζονταν το ίδιο τροχιακό επίπεδο με διαφορά φάσης τροχιάς 180°, μειώνοντας έτσι τον κύκλο επανάληψης σε 6 ημέρες, όταν και οι δύο ήταν σε λειτουργία.

Για εφαρμογές συμβολομετρίας (interferometry), απαιτείται αυστηρός έλεγχος της τροχιάς, ώστε να διασφαλίζεται ο σωστός χρονισμός και η επιλογή των κατάλληλων συμβολομετρικών ζευγών. Ο έλεγχος θέσης του Sentinel-1 επιτυγχάνεται με την χρήση ενός «τροχιακού σωλήνα» (orbital tube) πλάτους 60 μέτρων (RMS), γύρω από την ονομαστική επιχειρησιακή διαδρομή, εξασφαλίζοντάς έτσι τη σταθερότητα και την ακρίβεια των παρατηρήσεων (βλ. Εικόνα 16).



Εικόνα 16:«Σχηματική όψη του τροχιακού σωλήνα», (πηγή: ESA).

Ο Αστερισμός Copernicus Sentinel-1 προσφέρει σημαντική βελτίωση στον χρόνο επανα-επίσκεψης σε σύγκριση με προηγούμενες αποστολές, όπως το ERS-1/2 και το ENVISAT ASAR, διατηρώντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα της ευρείας κάλυψης περιοχής, αλλά με υψηλότερη ανάλυση και δυνατότητα παγκόσμιας κάλυψης με διπλή πόλωση. (βλ. Εικόνα 17), (Sentiwiki, n.d.).



Εικόνα 17: «Χρόνος επανα-επίσκεψης για S-1A και S-1B σε Ημέρες ανά Επανάληψη» (Πηγή εικόνας: sentiwiki.copernicus.eu)

Ο παρακάτω (

Πίνακας 2), παρέχει μια σύνοψή με τροχιακές πληροφορίες για τους δορυφόρους Sentinel-1A και 1B.

Πίνακας 2: «Πληροφορίες Τροχιάς για Sentinel-1A και 1B».

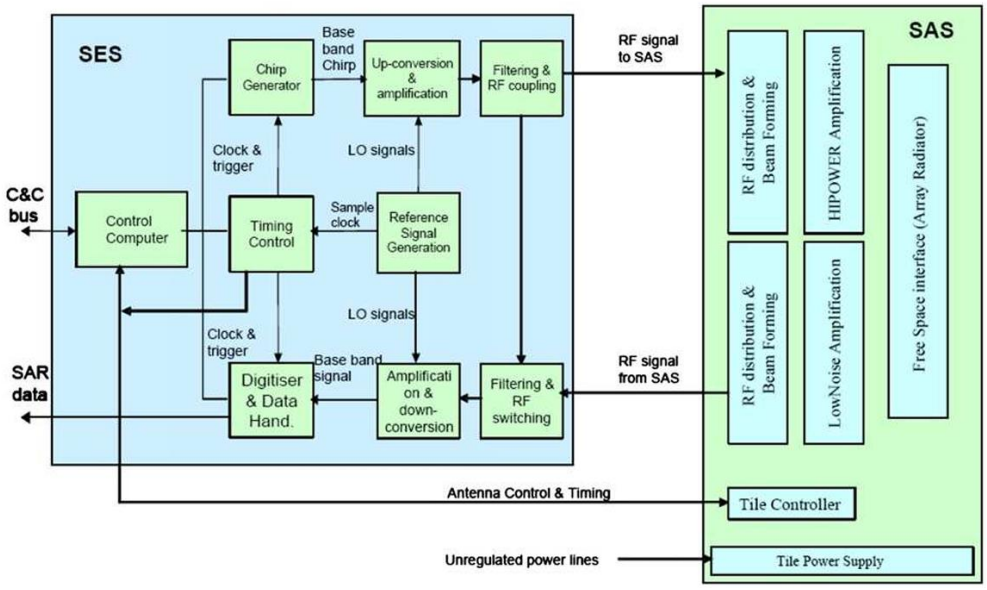
Υψόμετρο	Κλίση	Περίοδος	Κύκλος	Αναφ. απόκλιση σωλήνα	Τοπική ώρα στον Αύξοντα Κόμβο
693km	98.18°	98,6 λεπτά	12 μέρες	+- 120 m	Ώρα 18:00

3.3.3 Το Όργανο C-SAR

Το όργανο C-SAR (C-Band – Synthetic Aperture Radar), του δορυφόρου Sentinel-1 σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε από την Γερμανική EADS Astrium GmbH και προσφέρει δυνατότητα απεικόνισης παντός καιρού, τόσο την ημέρα όσο και την νύχτα, με δεδομένα υψηλής και μεσαίας ανάλυσης για παρατήρηση ξηράς, παράκτιων ζωνών και πάγων. Η βασική του τεχνολογία περιλαμβάνει μια κεραία συστοιχίας ενεργής φάσης (active phased array antenna), η οποία επιτρέπει ταχεία σάρωση σε ανύψωση για την κάλυψη μεγάλου εύρους γωνίας πρόσπτωσης και υποστήριξη λειτουργίας ScanSAR, καθώς και σάρωση σε αζιμούθιο η οποία επιτρέπει τη χρήση της τεχνικής (TOPS - Terrain Observation by Progressive array Scans) για την απαιτούμενη απόδοση εικόνας. Επιπλέον, διαθέτει δυνατότητα διπλής πόλωσης για βελτιωμένες παρατηρήσεις.

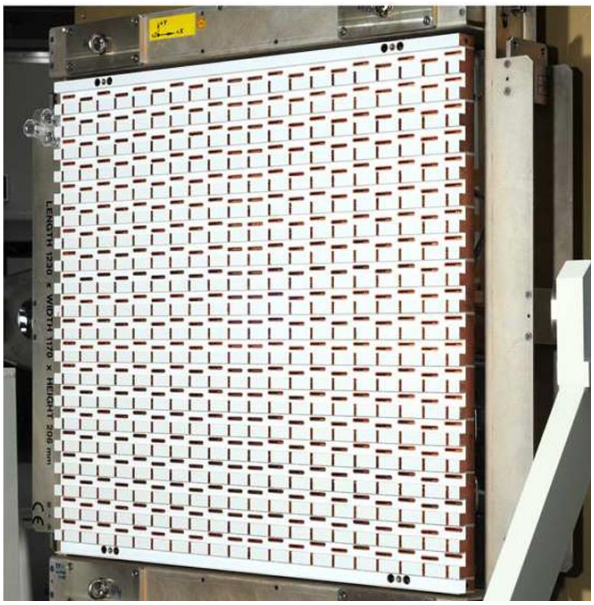
Η αρχιτεκτονική του C-SAR αποτελείται από δύο κύρια υποσυστήματα: Το Υποσύστημα ηλεκτρονικών SAR(SES) και το υποσύστημα κεραίας SAR(SAS) (βλ. Εικόνα 18).

Το SES είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία, ενίσχυση και επεξεργασία των σημάτων Ραντάρ, ενώ το SAS αναλαμβάνει τη διανομή και την εκπομπή των σημάτων μέσω της κεραίας, καθώς και την λήψη των σημάτων (ηχώ) από τις ανακλάσεις των Ραντάρ. Η κεραία του SAS χρησιμοποιεί κυματοδηγούς ενισχυμένους με ίνες άνθρακα, εξασφαλίζοντας ραδιομετρική σταθερότητα και υψηλή απόδοση (Εικόνα 19) (sentiwiki, n.d.).



Εικόνα 18: «Λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα οργάνου CSAR» (Πηγή: Torres et al.,2012).

Το σήμα του Ραντάρ παράγεται στη ζώνη βάσης από τη γεννήτρια Chirp και στη συνέχεια υφίσταται διαδικασία μετατροπής προς τα πάνω C-Band εντός του υποσυστήματος ηλεκτρονικών SAR(SES). Το συγκεκριμένο σήμα διανέμεται στους ενισχυτές υψηλής ισχύος που βρίσκονται στις ηλεκτρονικές μονάδες μετάδοσης/ λήψης (TRMs), οι οποίες είναι τοποθετημένες στο μπροστινό μέρος του συστήματος, γνωστό ως EFE. Η διανομή του σήματος γίνεται μέσω του δικτύου σχηματισμού δέσμης του υποσυστήματος κεραίας SAR (SAS). Η εκπομπή του σήματος και η λήψη της ηχού, πραγματοποιούνται μέσω της ίδιας κεραίας, η οποία χρησιμοποιεί θερμαντικά σώματα κυματοδηγού με σχισμή. Κατά την λήψη, το σήμα ηχώ ενισχύεται περαιτέρω από τους ενισχυτές χαμηλού θορύβου που βρίσκονται στις μονάδες EFE TRM. Το ίδιο δίκτυο που χρησιμοποιείται για την διανομή του σήματος εκπομπής, χρησιμοποιείται και για τη σύνοψη του λαμβανόμενου σήματος ηχώ. Αφού το σήμα περάσει από φιλτράρισμα και μετατροπή προς τα κάτω στη ζώνη βάσης εντός του SES, ψηφιοποιείται και διαμορφώνεται για εγγραφή και επεξεργασία (Sentiwiki, n.d.; Torres et al.,2012).

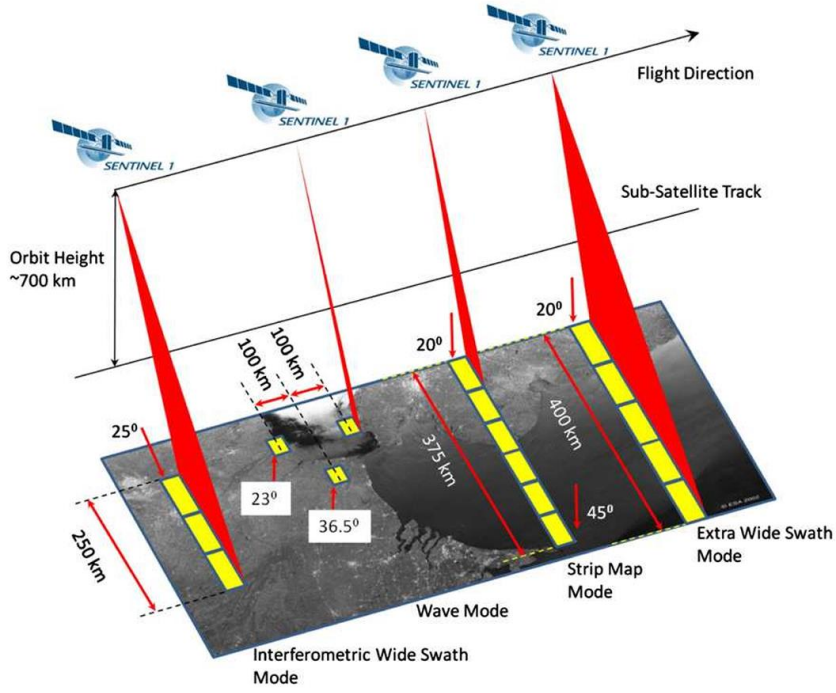


Εικόνα 19: «Πλακίδιο SAS, εμπρόσθια όψη με ζεύγη κυματοδηγών με σχισμές H/V», (πηγή: (Torres, et al.,2012)).

Οι κύριοι τρόποι λειτουργείας του C-SAR περιλαμβάνουν τις λειτουργίες Strip Map (SM), Interferometric Wide Swath (IW), Extra Wide Swath(EW) και Wave (WV)(βλ. Εικόνα 20). Αυτές παρέχουν προϊόντα σε μονή (HH ή VV) ή διπλή πόλωση (HH+HV ή VV+VH), με εξαίρεση τη λειτουργεία WV, η οποία υποστηρίζει μόνο μονή πόλωση.

- IW (Interferometric Wide Swath): Είναι η κύρια λειτουργεία απεικόνισης της ξηράς, λειτουργεί σε πόλωση VV+VH και καλύπτει πλάτος λωρίδας 250Km με ανάλυση 5m×20m. Παρέχει συνεχή παρατήρηση για μακροπρόθεσμη ανάλυση, ενώ εξασφαλίζει την ομοιογένεια της εικόνας και μειώνει το κόστος αποστολής.
- SM (Strip Map): Χρησιμοποιείται για μικρής εδαφικής έκτασης παρατήρηση, όπως μικρά νησιά και διαχείριση κρίσεων. Παρέχει υψηλή ανάλυση 5m×20m, αλλά σε μικρότερο πλάτος 80km.
- EW (Extra Wide Swath): Κατάλληλη για θαλάσσιες περιοχές, όπως οι Αρκτικοί και Νότιοι ωκεανοί, για παρακολούθηση θαλάσσιου πάγου και επιτήρηση. Προσφέρει ευρεία κάλυψη 400km με ανάλυση 20m×40m.
- WV (Wave Mode): Εφαρμόζεται για την παρακολούθηση του κυματισμού στους ανοιχτούς ωκεανούς, καταγράφοντας μικρές εικόνες (vignettes) 20km×20km κάθε 100km κατά μήκος της τροχιάς. Η γρήγορη εναλλαγή της γωνίας πρόσπτωσης (23°–36,5°) βελτιώνει την παρατήρηση των κυμάτων.

Οι λειτουργίες SM, IW και EW μπορούν να εκτελούνται για έως 30 λεπτά ανά τροχιά, ενώ η WV υποστηρίζει 75 λεπτά ανά τροχιά (Sentiwiki, n.d.; Torres et al., 2012).



Εικόνα 20: «Τρόποι λειτουργίας του συστήματος C-SAR του δορυφόρου Sentinel-1».(Πηγή: Torres, et al.,2012).

3.4 Η Αποστολή Sentinel-2

Ο Sentinel-2 αποτελεί την ευρωπαϊκή αποστολή που επικεντρώνεται στην απεικόνιση ευρείας ζώνης (Wide-Swath), υψηλής ανάλυσης (High-Resolution) και πολλαπλών φασμάτων (Multi-Spectral), σχεδιασμένη για να υποστηρίζει ποικίλες εφαρμογές του προγράμματος Copernicus. Η αποστολή αποτελείται από δύο δορυφόρους, οι οποίοι κινούνται στην ίδια τροχιά με διαφορά φάσης 180°, εξασφαλίζοντας συχνή επανα-επίσκεψη κάθε 5 ημέρες στον Ισημερινό. Τον Σεπτέμβριο του 2024, ο Sentinel-2C παρείχε τις πρώτες εικόνες από όλο τον κόσμο, οι οποίες υποβλήθηκαν σε επεξεργασία από το επίγειο τμήμα Copernicus, συμπληρώνοντας και βελτιώνοντας την κάλυψη του πλανήτη και τον χρόνο επανα-επίσκεψης της αποστολής. Οι δορυφόροι αυτοί φέρουν ένα πολυφασματικό όργανο που καταγράφει δεδομένα από 13 φασματικές ζώνες: τέσσερις ζώνες στα 10m, έξι ζώνες στα 20m και τρεις ζώνες με χωρική ανάλυση 60m, με το πλάτος της λωρίδας τροχιάς να είναι 290km. Η αποστολή Sentinel-2 αποτελεί την συνέχεια των προγραμμάτων SPOT και LANDSAT, παρέχοντας πολυφασματικές εικόνες που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της διαχείρισης της Γης, τη γεωργία, τη δασοκομία, την αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών, καθώς και ανθρωπιστικές επιχειρήσεις και ζητήματα ασφαλείας. Οι εικόνες υψηλής ανάλυσης που συλλέγονται από τους δορυφόρους είναι κρίσιμες για εφαρμογές όπως η χαρτογράφηση κινδύνων και η παρακολούθηση του περιβάλλοντος (Sentiwiki.copernicus.eu, s2-mission n.d.).

Η (Εικόνα 21) παρουσιάζει την ρεαλιστική απεικόνιση Sentinel-2 υπό τροχιά πάνω από την επιφάνεια της Γης.



Εικόνα 21: «Απεικόνιση του Sentinel-2 υπό τροχιά» (Πηγή: www.esa.int).

3.4.1 Περιγραφή Δορυφόρου

Η αποστολή Sentinel-2 αποτελείται από δύο επιχειρησιακούς δορυφόρους, τον Sentinel-2B (εκτόξευση: 2017) και τον Sentinel-2C (εκτόξευση: 2024), οι οποίοι εκτοξεύτηκαν με το ευρωπαϊκό εκτοξευτή VEGA. Ο Sentinel-2A (εκτόξευση: 2015) λειτούργησε για περίπου 10 χρόνια, με τον Sentinel-2C να αναλαμβάνει τη συνέχιση της αποστολής, διασφαλίζοντας αδιάλειπτη συλλογή δεδομένων. Ο Sentinel-2D θα αντικαταστήσει στο μέλλον τον Sentinel-2B, ενώ η επόμενη γενιά Sentinel-2 υπόσχεται βελτιωμένες μετρήσεις έως το 2035 (Sentiwiki.copernicus.eu, n.d.).

Ο Sentinel-2B και Sentinel-2C βρίσκονται σε ηλιοσύγχρονη τροχιά σε ύψος 786km, με διαφορά φάσης 180°, εξασφαλίζοντας τακτική κάλυψη της επιφάνειας της Γης. Η ακριβής τροχιακή τους θέση προσδιορίζεται μέσω του Global Navigation Satellite System (GNNS), ενώ η τροχιακή σταθερότητα διατηρείται με συστήματα πρόωσης. Ο σχεδιασμός τους προβλέπει διάρκεια ζωής 7,25 έτη, με ενσωματωμένες μπαταρίες και προωθητικό σύστημα που επιτρέπουν έως 12 έτη λειτουργείας.

Στην (**Εικόνα 22**) απεικονίζεται ο δορυφόρος Sentinel-2B στην τοποθεσία της ESA στην Ολλανδία, στις 14 Νοεμβρίου 2016, πριν συσκευαστεί και αποσταλεί στην Γαλλική Γουιάνα για την εκτόξευσή του.



Εικόνα 22: «Τελευταίες δοκιμές του δορυφόρου Sentinel-2B στην τοποθεσία της ESA στην Ολλανδία». (Πηγή: www.esa.int)

3.4.2 Τροχιά- Γεωγραφική Κάλυψη

Η αποστολή Sentinel-2 ακολουθεί ηλιοσύχρονη τροχιά, διασφαλίζοντας σταθερή γωνία ηλιακού φωτισμού στην επιφάνεια της Γης. Αυτή η επιλογή ελαχιστοποιεί τις επιπτώσεις σκιών και διαφορών φωτισμού, επιτρέποντας συγκρίσιμες χρονοσειρές δεδομένων (Sentiwiki, n.d.).

Οι δορυφόροι Sentinel-2B και Sentinel-2C κινούνται στην ίδια τροχιά με διαφορά φάσης 180°, σε μέσω υψόμετρο 786km και κλίση 98,62°. Η μέση τοπική ηλιακή ώρα (MLST) στον φθίνοντα κόμβο είναι 10:30π.μ., επιλογή η οποία ισορροπεί μεταξύ καλού ηλιακού φωτισμού και ελαχιστοποίησης της νεφοκάλυψης. Αυτός ο συγχρονισμός επιτρέπει την ενοποίηση των δεδομένων Sentinel-2 με προηγούμενες αποστολές (Landsat, SPOT-5), ενισχύοντας τη διαχρονική παρακολούθηση.

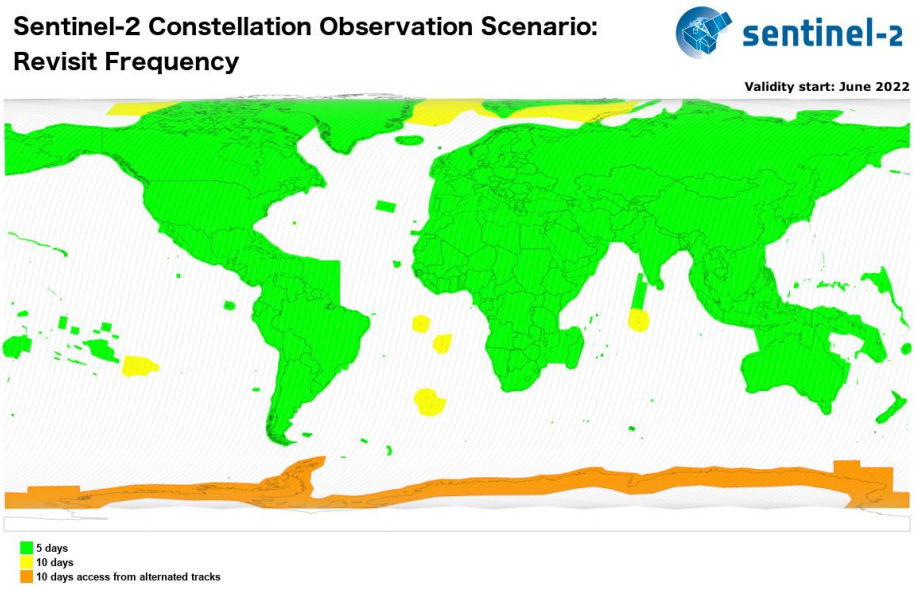
Η αποστολή Sentinel-2 παρέχει συστηματική κάλυψη στις εξής περιοχές:

- Σε όλες τις ηπειρωτικές επιφάνειες μεταξύ 56° N και 82,8° B
- Παράκτια ύδατα έως 20km από την ακτή
- Νησιά άνω των 100 km² (συμπεριλαμβανομένων των νησιών της ΕΕ)
- Μεσόγειος και κλειστές θάλασσες (π.χ. Κασπία Θάλασσα).

Επιπλέον, πραγματοποιούνται παρατηρήσεις κατόπιν αιτήματος κρατών μελών ή υπηρεσιών Copernicus (π.χ. Ανταρκτική, Κόλπος Baffin).

Με δύο δορυφόρους, όλες οι τυπικές περιοχές καλύπτονται κάθε πέντε ημέρες υπό τις ίδιες συνθήκες θέασης. Σε ορισμένες περιοχές, λόγω επικάλυψης γειτονικών τροχιών, η επαναληψιμότητα είναι ακόμη υψηλότερη.

Στην (Εικόνα 23) παρουσιάζεται ο χρόνος κάλυψης και επανα-επίσκεψης που προβλέπεται από την αποστολή Sentinel-2. Επίσης, στον Πίνακας 3 συνοψίζονται οι τροχιακές πληροφορίες των δορυφόρων.



Εικόνα 23: «Χρόνος κάλυψης και επανα-επίσκεψης που προβλέπεται από την αποστολή Sentinel-2 MSI» (Πηγή: sentiwiki.copernicus.eu).

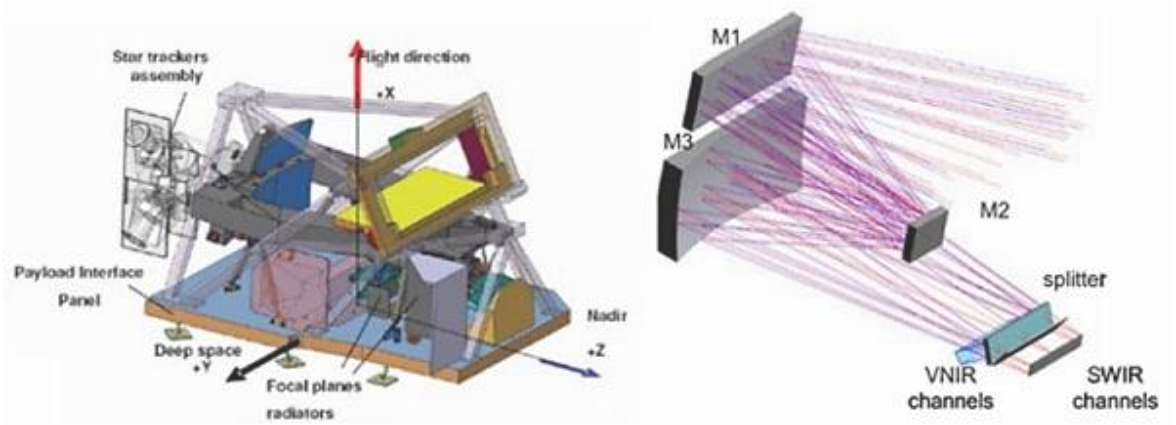
Πίνακας 3: «Σημαντικές τροχιακές πληροφορίες για Sentinel-2A και το Sentinel-2B».

Υψόμετρο	Κλίση	Περίοδος	Κύκλος	Απόκλιση τροχιάς εδάφους	Τοπική ώρα σε Φθίνοντα Κόμβο
786χλμ	98,62μοίρες	100,6λεπτά	10 μέρες	+- 2χλμ	Ώρα 10:30

3.4.3 Όργανο MSI

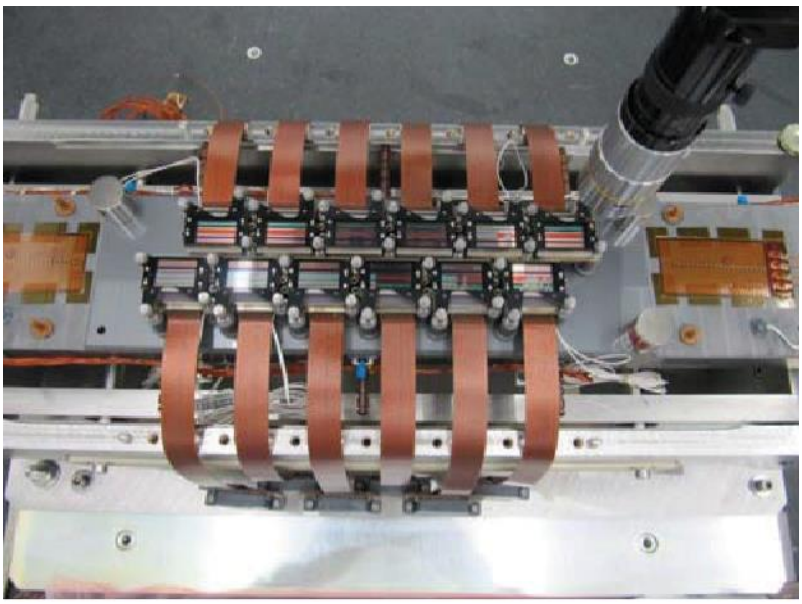
Το Multi-Spectral Instrument (MSI) (Εικόνα 24) είναι το καταγραφικό όργανο που είναι τοποθετημένο στους δορυφόρους Sentinel-2. Το όργανο αυτό χρησιμοποιεί μια τεχνολογία απεικόνισης τύπου push-broom. Στην τεχνολογία αυτή, ο αισθητήρας συλλέγει σειρές δεδομένων εικόνας καθώς ο δορυφόρος κινείται κατά μήκος της τροχιάς του, δημιουργώντας νέα δεδομένα σε κάθε πέρασμα. Η μέση περίοδος παρατήρησης σε χερσαίες και παράκτιες περιοχές είναι περίπου 17 λεπτά, ενώ η μέγιστη διάρκεια παρατήρησης μπορεί να φτάσει τα 32 λεπτά. Το φως που ανακλάται από την Γη και την ατμόσφαιρα προς το MSI συλλέγεται μέσω ενός τηλεσκοπίου τριών

κατόπτρων (Three-Mirror Anastigmat - TMA), (M1,M2 και M3) (βλ. **Εικόνα 24** δεξί σχήμα) με διάμετρο κόρης 150mm. Το σύστημα αυτό κατευθύνει το φως μέσω ενός διαχωριστή δέσμης σε δύο ξεχωριστά υποσυστήματα εστιακού επιπέδου (Focal Planet Assemblies - FPA). Το πρώτο από αυτά τα υποσυστήματα ανιχνεύει σε δέκα μήκη κύματος VNIR (ορατές και κοντινές υπέρυθρες ζώνες), ενώ το δεύτερο υποσύστημα ανιχνεύει σε τρία μήκη κύματος SWIR (μέσο υπέρυθρο μήκος κύματος). Η ραδιομετρική βαθμονόμηση του οργάνου MSI επιτυγχάνεται μέσω ενός diffuser Fitted τοποθετημένου στην εσωτερική όψη του συνδυασμένου μηχανισμού βαθμονόμηση και κλείστρου (Calibration and Shutter Mechanism - CSM) (Sentiwiki, n.d.)



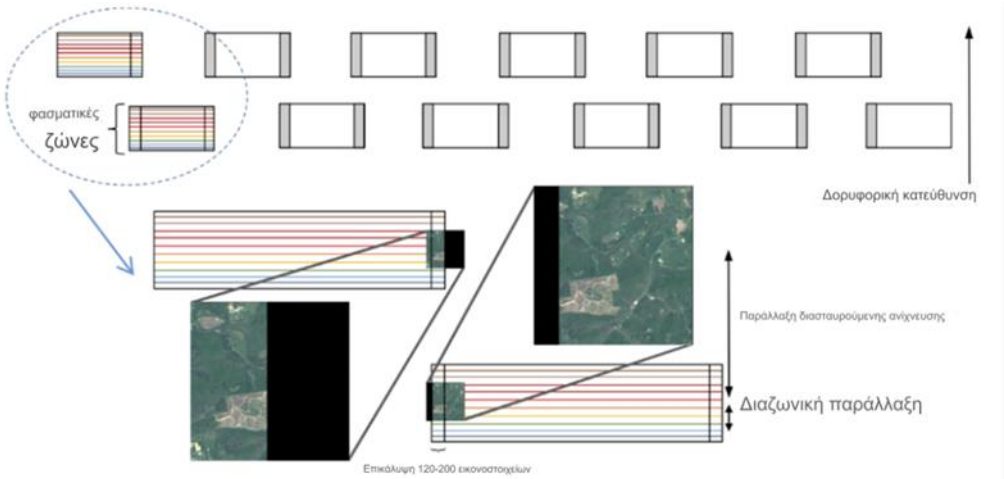
Εικόνα 24: «Εσωτερική διαμόρφωση MSI» (πηγή: Sentiwiki.copernicus.eu, s2-mission n.d).

Για να επιτευχθεί το απαιτούμενο πλάτος κάλυψης των 290km, τα δύο υποσυστήματα(FPA), τόσο για το VNIR όσο και για το SWIR αποτελούνται από 12 ανιχνευτές που είναι κλιμακωμένοι σε δύο ορίζοντες σειρές (βλ. **Εικόνα 25**), η σχεδίαση των ανιχνευτών είναι τέτοια ώστε να καλύπτουν ένα οπτικό πεδίο μήκους περίπου 20,6°. Αυτή η διάταξη επιτρέπει στο όργανο να καταγραφεί μεγαλύτερη γεωγραφική έκταση σε κάθε πέρασμα του δορυφόρου. Ο περαιτέρω διαχωρισμός των φασματικών ζωνών (τόσο για το VNIR όσο και για το SWIR), επιτυγχάνεται με την χρήση φίλτρων που τοποθετούνται πάνω από τους ανιχνευτές, επιτρέποντας έτσι την καταγραφή διαφορετικών μηκών κύματος και ζωνών, σύμφωνα με τις ανάγκες της αποστολής. Το MSI μετρά την ανακλώμενη ακτινοβολία της Γης σε 13 φασματικές ζώνες από VNIR έως SWIR (Sentiwiki, n.d.).



Εικόνα 25: «VNIR PFM FPA μετά από ενσωμάτωση και ευθυγράμμιση ανιχνευτών και φίλτρων [Μονάδες: Astrium SAS (Γαλλία) και e2v Technologies (Ηνωμένο Βασίλειο)]» (Πηγή: earth.esa.int).

Στην (Εικόνα 26) απεικονίζεται η διάταξη του αισθητήρα του Sentinel-2 MSI, και φαίνεται πώς επιτυγχάνεται η επικάλυψη των περιοχών εικόνας μεταξύ γειτονικών ανιχνευτών, που είναι περίπου 120-200pixels. Αυτή η επικάλυψη προκαλεί φαινόμενα cross-detector parallax (παράλλαξη μεταξύ ανιχνευτών) και cross-band parallax (παράλλαξη μεταξύ φασματικών ζωνών) εντός του ίδιου ανιχνευτή, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε μικρές μετατοπίσεις μεταξύ των εικόνων που καταγράφονται από τις διάφορες φασματικές ζώνες. Η προ επεξεργασία των δεδομένων μειώνει αυτές τις μετατοπίσεις, με ακρίβεια που συνήθως είναι κάτω από 10 εικονοστοιχεία βελτιώνοντας τη δυνατότητα για πιο ακριβείς γεωσκοπικές αναλύσεις και εφαρμογές (Nguyen et al., 2023).



Εικόνα 26: «Διαμόρφωση κλιμακωτών ανιχνευτών και γωνίες παράλλαξης μεταξύ ανιχνευτών/ζωνών» (Πηγή: centreborelli.github.io).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ & ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Οι φυσικές καταστροφές αποτελούν μια από τις μεγαλύτερες απειλές για τις ανθρώπινες ζωές και τις υποδομές, προκαλώντας τεράστιες απώλειες και ζημιές. Με την αυξανόμενη συχνότητα και σοβαρότητα τέτοιων γεγονότων λόγω της κλιματικής αλλαγής, είναι επιτακτική η ανάγκη να αναπτυχθούν αποτελεσματικότερες στρατηγικές για τη διαχείριση καταστροφών. Τέτοια φαινόμενα περιλαμβάνουν σεισμούς, ηφαιστειακές εκρήξεις, κατολισθήσεις, τσουνάμι, τυφώνες, πλημμύρες, ανεμοστρόβιλους, πυρκαγιές, ξηρασίες και ακραίες θερμοκρασίες, τα οποία μπορούν να επιφέρουν σοβαρές συνέπειες σε ανθρώπινες ζωές και υποδομές. Οι τεχνολογικές εξελίξεις στις τελευταίες δεκαετίες έχουν βελτιώσει σημαντικά την ικανότητά μας να προετοιμαζόμαστε, να ανταποκρινόμαστε και να ανακάμπτουμε από τέτοια καταστροφικά γεγονότα. Η Τηλεπισκόπηση, τα συστήματα Ραντάρ και η δορυφορική απεικόνιση αποτελούν τεχνολογίες που μας επιτρέπουν να παρακολουθούμε την επιφάνεια και την ατμόσφαιρα της Γης από απόσταση. Χάρη στις τεχνολογικές προόδους, είναι πλέον δυνατή η παρακολούθηση των καταστροφών (όπως ηφαιστειακές έκρηξης, κατολισθήσεις, πλημμύρες και πυρκαγιές) σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο (Krichen,et al.,2024).

4.1 Φυσικές Καταστροφές

Οι φυσικές καταστροφές προκύπτουν όταν ένας φυσικός κίνδυνος εξελίσσεται από πιθανό ενδεχόμενο σε ενεργή κατάσταση, προκαλώντας αρνητικές επιπτώσεις στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Τέτοια ακραία φυσικά φαινόμενα μπορούν να απειλήσουν τόσο το περιβάλλον όσο και την ανθρώπινη ύπαρξη. Ο όρος φυσική καταστροφή βασίζεται κυρίως στις συνέπειες που έχει το φαινόμενο στην ανθρώπινη ζωή και όχι στη φύση του ίδιου του φαινομένου (Safecrete, n.d.).



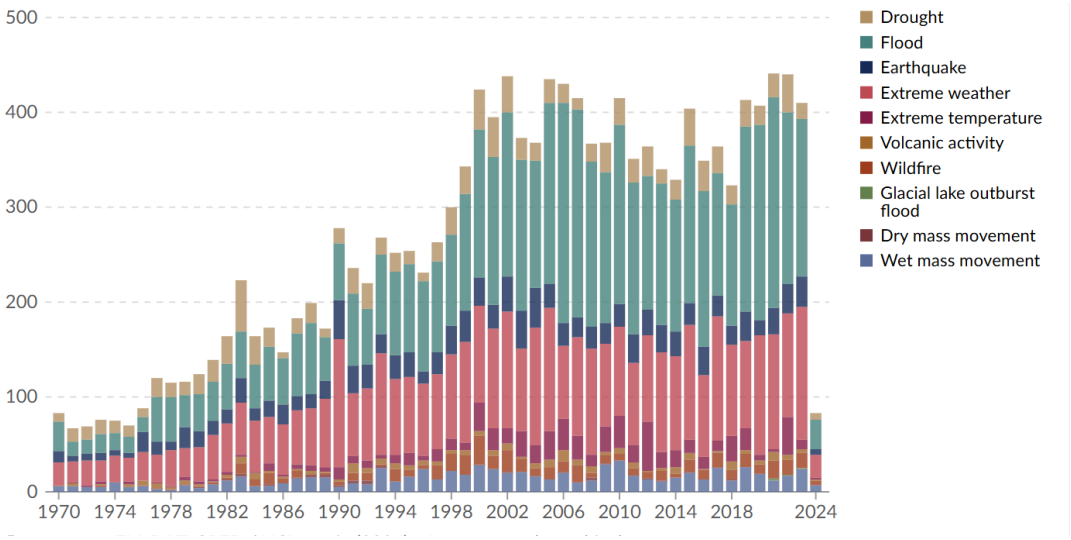
Εικόνα 27: «Απεικόνιση φυσικών καταστροφών».

Σύμφωνα με την Emergency Events Database (EM-DAT), οι φυσικές καταστροφές ταξινομούνται στις εξής κατηγορίες (βλ. **Εικόνα 28**):



Εικόνα 28: «Κατάταξη φυσικών καταστροφών βάση της EM-DATA » (Πηγή: emdat.be).

Η άμεση σχέση μεταξύ της κλιματικής αλλαγής και της συχνότητας εμφάνισης ακραίων φυσικών φαινομένων είναι πλέον επιστημονικά τεκμηριωμένη. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (Inter governmental Panel on Climate Change, IPCC), οι κυριότερες καταγεγραμμένες φυσικές καταστροφές περιλαμβάνουν: Ξηρασίες, Σεισμούς, Πλημμύρες, Κατολισθήσεις, Παγετώνες, Τυφώνες, Ηφαίστεια και Πυρκαγιές. Η βάση δεδομένων EM-DAT καταγράφει περισσότερες από 36.000 φυσικές καταστροφές που έχουν σημειωθεί παγκοσμίως από το 1900 έως το 2024 (βλ. γράφημα: **Εικόνα 29**).

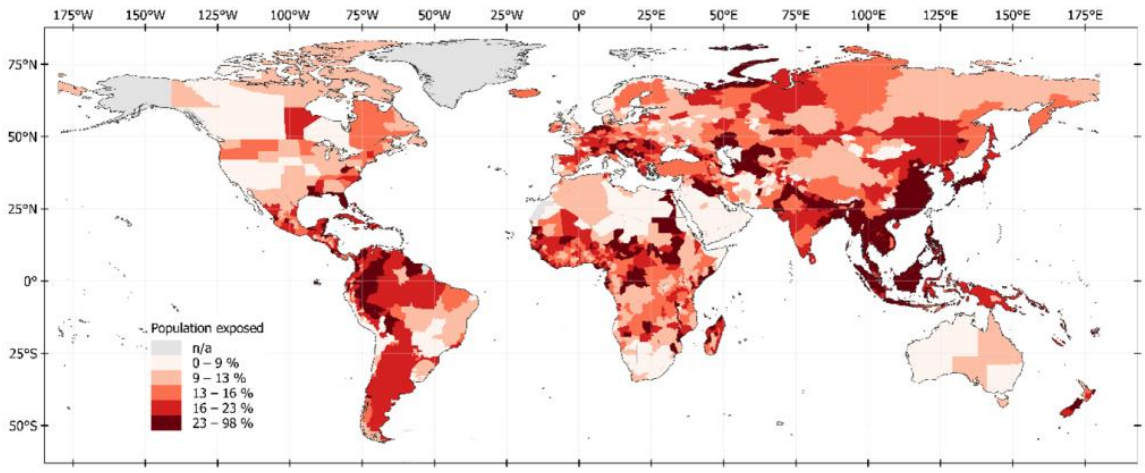


Εικόνα 29: « Ο ετήσιος αναφερόμενος αριθμός φυσικών καταστροφών, κατηγοριοποιημένος ανά είδος από το 1970 - 2024». (πηγή: EM-DAT, CRED/UCLouvain (2024)).

4.2 Η Δορυφορική Τηλεπισκόπηση ως Εργαλείο Διαχείρισης Καταστροφών

Η Τηλεπισκόπηση αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στη διαχείριση φυσικών καταστροφών, προσφέροντας δυνατότητες έγκαιρης ανίχνευσης, παρακολούθησης και αξιολόγησης ζημίων μέσα από δορυφορικές εικόνες και αεροφωτογραφίες, η Τηλεπισκόπηση παρέχει τη δυνατότητα παρακολούθησης και ανάλυσης της χωρικής και χρονικής μεταβολής των στοιχείων που σχετίζονται με καταστροφές, όπως οι πλημμύρες, η βλάστηση και η γεωλογία. Αυτά τα δεδομένα επιτρέπουν τη δημιουργία χαρτών επικινδυνότητας, οι οποίοι βοηθούν στον εντοπισμό περιοχών με υψηλό κίνδυνο και την ανάπτυξη στρατηγικών πρόληψης. Επιπλέον, η Τηλεπισκόπηση σε συνδυασμό με τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) επιτρέπει την ενοποίηση δεδομένων από διαφορετικές πηγές, όπως γεωλογικά, υδρολογικά και τοπογραφικά στοιχεία, για την ολοκληρωμένη διαχείριση καταστροφών. Ιδιαίτερα για ταχεία φαινόμενα, όπως οι πλημμύρες, οι δορυφορικές εικόνες σε τακτά χρονικά διαστήματα επιτρέπουν την ανίχνευση ανωμαλιών και την πρόβλεψη μελλοντικών καταστροφών Κατά τη διάρκεια της καταστροφής, προσφέρει γρήγορη και ακριβή εικόνα της κατάστασης, βοηθώντας στην συντονισμένη ανταπόκριση έκτακτης ανάγκης και στην εκτίμηση των ζημιών. Τέλος, στη φάση αποκατάστασης, τα δεδομένα Τηλεπισκόπησης συμβάλουν στον σχεδιασμό των ενεργειών αποκατάστασης και στη μακροπρόθεσμη πρόληψη μελλοντικών καταστροφών (Van Westen,2000).

Οι πλημμύρες αποτελούν μια από τις σοβαρότερες φυσικές καταστροφές, επηρεάζοντας εκατομμύρια ανθρώπους παγκοσμίως και προκαλώντας σοβαρές οικονομικές και περιβαλλοντικές ζημίες. Σύμφωνα με την μελέτη των “Rentschler, J., Salhab, M., & Jafino, B. A. (2022), με τίτλο "FloodF exposure and poverty in 188 Countries", που δημοσιεύτηκε στο Nature Communications, το 23% του παγκόσμιου πληθυσμού (δηλαδή 1,81 δισεκατομμύρια άνθρωποι) ζει σε περιοχές με υψηλό κίνδυνο πλημμύρας. Ο κίνδυνος αυτός είναι ιδιαίτερα έντονος σε συγκεκριμένες περιοχές (βλ. χάρτη: **Εικόνα 30**). Από τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία της EM-DAT, προκύπτει ότι οι πλημμύρες αποτελούν τη συχνότερη μορφή φυσικής καταστροφής. Μάλιστα, κατατάσσονται δεύτερες σε θνησιμότητα μετά τους σεισμούς, πλήττοντας μεγάλο ποσοστό του παγκόσμιου πληθυσμού (Our World in Data, n.d.).



Εικόνα 30: «Το ποσοστό των ανθρώπων που ζουν σε ζώνες υψηλού κινδύνου πλημμύρας».(πηγή: Rentschler, et al.,2022).

Η παρακολούθηση των πλημμυρών είναι ζωτικής σημασίας, ωστόσο οι παραδοσιακές μέθοδοι, όπως οι επίγειες έρευνες και η αεροφωτογράφιση, μπορούν να είναι χρονοβόρες, ακριβές και εν μέρει επικίνδυνες. Με τη χρήση δορυφορικών εικόνων, είναι δυνατή η λεπτομερής ανάλυση της πλημμυρισμένης έκτασης και η εκτίμηση των ζημιών που προκαλούνται. Οι δορυφορικές αποστολές όπως οι Terra, Aqua, Landsat, Ikonos, WorldView, GeoEye-1, Radarsat-1, Sentinel-1 και Sentinel-2 παίζουν βασικό ρόλο στην παρακολούθηση των πλημμυρών. Αυτά τα συστήματα προσφέρουν διαφορετική χωρική και φασματική ανάλυση, αλλά και διαφορετική επαναληψιμότητα, καθιστώντας τα κατάλληλα για διαφορετικούς τύπους παρακολούθησης και ανάλυσης φυσικών καταστροφών. Η αξιοποίηση αυτών των δεδομένων έχει διευκολύνει την παρακολούθηση των πλημμυρών σε παγκόσμια κλίμακα, επιτρέποντας στους επιστήμονες να κατανοήσουν καλύτερα την έκταση των πλημμυρών και να προσαρμόσουν τις μεθόδους αντίδρασης και πρόληψης (Popandopulo, et al., 2023).

4.2.1 Sentinel-1 και Ραντάρ για Ανίχνευση Πλημμυρών

Οι δορυφόροι Sentinel-1A και Sentinel-1B, που αποτελούν μέρος του προγράμματος Copernicus, ξεκίνησαν την λειτουργεία τους το 2014, προσφέροντας πλήρη κάλυψή της υδρογείου κάθε έξι ημέρες. Ωστόσο, μετά την αναστολή λειτουργείας του Sentinel-1B το 2021 λόγω βλάβης, η συλλογή δεδομένων συνεχίζεται μόνο από τον Sentinel-1A, περιορίζοντας την κάλυψη σε έναν κύκλο 12 ημερών. Παρά τη μείωση αυτή, τα δεδομένα Ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) που συλλέγονται από τον Sentinel-1A παραμένουν εξαιρετικά χρήσιμα για την παρακολούθηση πλημμυρικών φαινομένων (Zhang, et al., 2021). Οι πλημμύρες συμβαίνουν συχνά όταν ο ουρανός καλύπτεται από σύννεφα, καθιστώντας αδύνατη τη χρήση οπτικών δορυφορικών εικόνων για τη χαρτογράφηση πλημμυρών κατά την διάρκεια της καταστροφής. Επόμενος τα διαστημικά συστήματα SAR είναι η πλέον προτιμώμενη επιλογή για παρακολούθηση της εξέλιξης μιας

πλημμύρας. Οι αισθητήρες SAR παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα για την χαρτογράφηση πλημμυρών, καθώς είναι ανεξάρτητοι από το φυσικό ηλιακό φωτισμό και επηρεάζονται ελάχιστα από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Πολλές μελέτες έχουν αποδείξει ότι οι εικόνες SAR είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τον προσδιορισμό της έκτασης των πλημμυρών κατά τη διάρκεια μιας καταστροφής (Uddin, Matin & Meyer, 2019). Οι εικόνες Sentinel-1A συλλέγονται σε Interferometric Wide Swath Mode (IW), με πόλωση (Vertical-Vertical - VV) και επιτρέπουν την ακριβή καταγραφή και χαρτογράφηση των πλημμυρισμένων περιοχών. Για τη βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων και τη μείωση του θορύβου, τα δεδομένα επεξεργάζονται με το λογισμικό SNAP. Αυτή η επεξεργασία περιλαμβάνει διαδικασίες όπως βαθμονόμηση (including calibration), αποθορυβοποίηση(Thermal noise removal) και γεωκωδικοποίηση (geocoding), που επιτρέπουν την παρακολούθηση των πλημμυρικών επεισοδίων με ακρίβεια, συμβάλλοντας έτσι στην διαχείριση των πλημμυρών και την προστασία των υποδομών (Zhang, et al., 2021).

Η υπηρεσία GloFAS (Global flood Monitoring - GFM), αποτελεί μια λειτουργική υπηρεσία παγκόσμιας παρακολούθησης πλημμυρών, η οποία προσφέρει συνεχή παρακολούθηση σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Ενσωματώνοντας δεδομένα από τους δορυφόρους Sentinel-1, το σύστημα αυτό επεξεργάζεται και αναλύει άμεσα τα εισερχόμενα δεδομένα Ραντάρ, επιτρέποντας την έγκαιρη ανίχνευση και χαρτογράφηση των πλημμυρικών φαινομένων.

Τα δεδομένα συλλέγονται σε λειτουργεία (Sentinel-1 IW GRDH) με ανάλυση 10mx10m, ενώ χρησιμοποιείται αποκλειστικά η πόλωσης VV λόγω της υψηλής ευαισθησίας της στη διάκριση του νερού από τις ξηρές επιφάνειες. Στη συνέχεια, τα προ-επεξεργασμένα δεδομένα προωθούνται στη μηχανή ανίχνευσης πλημμυρών του GFM, όπου εφαρμόζονται τρεις ανεξάρτητοι αλγόριθμοι:

1. HASARD: Βασίζεται σε μια καινοτόμο διαδικασία διαχωρισμού εικόνας για την ακριβή οριοθέτηση των πλημμυρισμένων περιοχών.
2. Alg2: Χρησιμοποιεί ιεραρχικό κατώφλι και θεωρία ασαφούς λογικής (Fuzzy-logic) για την ταξινόμηση των πλημμυρών.
3. Alg3: Χρησιμοποιεί ένα ιστορικό σημάτων Sentinel-1 για ακριβή ανίχνευση νερού με βάση στατιστικές παραμέτρους.

Τα τελικά προϊόντα χαρτογράφησης πλημμυρών απεικονίζονται σε ένα τελικό χάρτη, όπου τα αποτελέσματα των τριών αλγορίθμων συνδυάζονται και η απόφαση αν ένα εικονοστοιχείο είναι πλημμυρισμένο βασίζεται στη συμφωνία των αλγορίθμων (Global Flood Awareness System, n.d.).

4.2.2 Sentinel-2 και Χαρτογράφηση Πλημμυρών

Για τα οπτικά δεδομένα, οι υδάτινες περιοχές ανιχνεύονται γενικά χρησιμοποιώντας τη εγγύς υπέρυθρη ζώνη (NIR) επειδή στη ζώνη NIR, η ανακλαστικότητα της επιφάνειας του νερούψείναι γενικά πολύ χαμηλότερη από την ανακλαστικότητα που δίνεται από άλλους τύπους κάλυψης γης. Ωστόσο, οι οπτικές εικόνες μπορούν εύκολα να επηρεαστούν από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, την ανάκλαση του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια και τη θολότητα του νερού, γεγονός που καθιστά δύσκολο τον καθορισμό μιας κοινής τιμής κατωφλίου για την ανίχνευση πλημμυρών. Για τον μετριασμό του προβλήματος, χρησιμοποιούνται οι φασματικοί λόγοι, π.χ. ο Δείκτης Βλάστησης NDVI ή/και ο Δείκτης Νερού NDWI, που υπολογίζονται από συνδυασμούς ορατών ζωνών, NIR και βραχέων κυμάτων-υπέρυθρης (SWIR) (Takeuchi et al., 1999; Townsend and Walsh, 1998; Seiler et al., 2009; Sakamoto et al., 2007). Συνήθως, η ανίχνευση πλημμυρισμένης περιοχής προκύπτει με τον καθορισμό κατωφλίου τέτοιων δεικτών. Η αποστολή Sentinel-2, παρέχει δεδομένα υψηλής χωρικής και φασματικής ανάλυσης, με μεγαλύτερη συχνότητα λήψεων, προσφέροντας σημαντική βοήθεια στην παρακολούθηση πλημμυρών και άλλων φαινομένων που σχετίζονται με την αλλαγή των υδάτινων σωμάτων. Ο Sentinel-2, με τις 12 ζώνες που καλύπτουν το οπτικό και υπέρυθρο φάσμα, προσφέρει πολύ μεγαλύτερη δυνατότητα για τον καθορισμό φασματικών δεικτών και την ανίχνευση υδάτινων χαρακτηριστικών. Αντίθετα, ο Sentinel-1, με δύο πολώσεις VV και VH, είναι απλούστερος στην ανάλυση μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, χωρίς την ανάγκη για πρόσθετους φασματικούς δείκτες ή συνδυασμούς ζωνών. Επομένως, ενώ ο Sentinel-1 παρέχει αξιόπιστα δεδομένα σε οποιεσδήποτε συνθήκες, ο Sentinel-2 προσφέρει πιο λεπτομερή και πολύπλευρη ανάλυση όταν οι οπτικές συνθήκες είναι καλές. Οι δύο δορυφόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν συμπληρωματικά για τη βέλτιστη παρακολούθηση των φαινομένων (Konapala, Kumar & Ahmad, 2021).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: Μελέτη Περίπτωσης της Κακοκαιρίας Daniel.

Τα ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως οι έντονες βροχοπτώσεις και οι πλημμύρες, έχουν γίνει συχνότερα τα τελευταία χρόνια, προκαλώντας αυξανόμενη ανησυχία στην κοινή γνώμη. Αυτή η αυξημένη συχνότητα σχετίζεται άμεσα με την κλιματική αλλαγή, η οποία επηρεάζει ιδιαίτερα περιοχές όπως η Μεσόγειος Θάλασσα και η Ελλάδα. Οι ακραίες βροχές που προηγουμένως εμφανίζονταν σπάνια, με περίοδο επαναφοράς εκατονταετιών, πλέον εμφανίζονται με μεγαλύτερη συχνότητα, και οι συνέπειες τους, προκαλούν καταστροφές σε πεδινές και αστικές περιοχές. Οι επιστήμονες υποστηρίζουν ότι αυτά τα φαινόμενα τείνουν να γίνουν η νέα «κανονικότητα», καθώς οι αλλαγές στο κλίμα οδηγούν σε ασταθή καιρικά μοτίβα. Οι καταιγίδες που προκαλούν τις πλημμύρες συνήθως ξεκινούν από τις ορεινές περιοχές που καλύπτουν περίπου το 20-25% της έκτασης της Ελλάδας. Αν και τα δάση αυτών των περιοχών λειτουργούν ως φυσικά φράγματα, δεν μπορούν πάντα να αποτρέψουν την απορροή μεγάλων ποσοτήτων νερού προς τα πεδινά, όπου προκαλούνται οι πιο σοβαρές καταστροφές. (Μπαλούτσο,2020).



Εικόνα 31: « Εικόνες από drone αποκαλύπτουν την καταστροφή από δυο σοβαρές πλημμύρες που έπληξαν την Ελλάδα, στον θεσσαλικό Κάμπο(2023), και στην Μάνδρα Αττικής (2017)» (Πηγή: simerini.gr, newsit.gr).

5.1 Ιστορικές Πλημμύρες της Ελλάδας

Η Ελλάδα κατατάσσεται τέταρτη σε φονικές πλημμύρες στην Ανατολική Μεσόγειο τα τελευταία 140 χρόνια. Το Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών αναφέρει ότι από το 1882 έως το 2021, πλημμύρες με περισσότερους από 10 θανάτους συμβαίνουν κάθε 6,5 χρόνια, ενώ πιο σοβαρές πλημμύρες, με περισσότερους από 22 θανάτους, εμφανίζονται κατά μέσο όρο κάθε 12 χρόνια (in.gr, 2023).

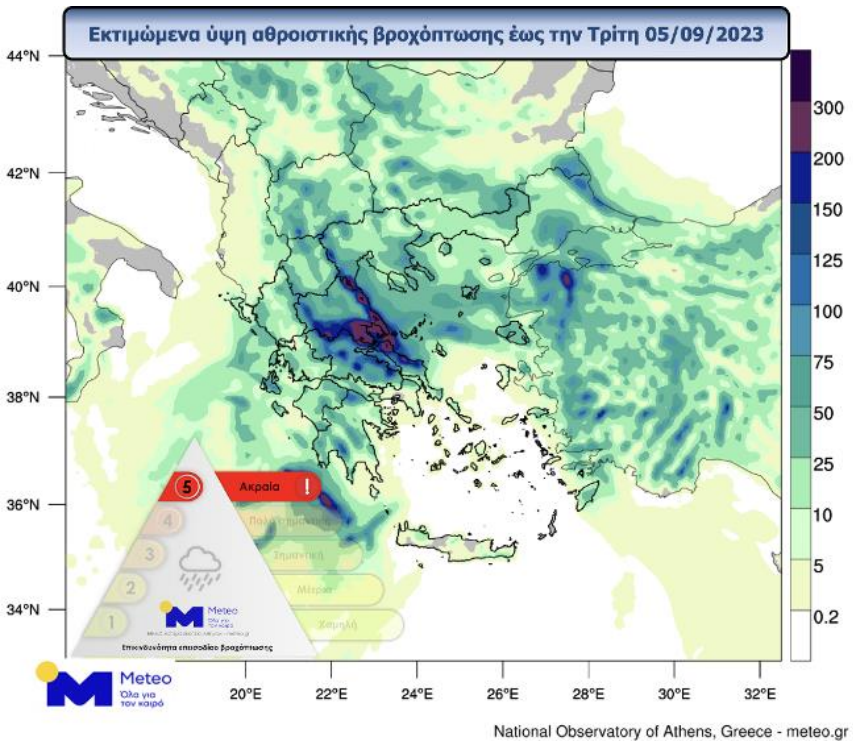
Οι 7 πιο φονικές πλημμύρες στην Ελλάδα τις τελευταίες δεκαετίες είναι:

- 14 Νοεμβρίου 1895 (61 νεκροί): Ισχυρές καταιγίδες έπληξαν την Αθήνα και τον Πειραιά, προκαλώντας τεράστιες καταστροφές. Ο Κηφισός είχε φουσκώσει επικίνδυνα, και το ύψος του νερού στο Νέο Φάληρο ξεπέρασε το 1 μέτρο. Στον Πειραιά, 450 σπίτια κατέρρευσαν και η πόλη έμεινε στο σκοτάδι, φωτιζόμενη από τα πλοία.
- 23 Νοεμβρίου 1925 (8 νεκροί): Μια καταστροφική και επικίνδυνη βροχόπτωση χτύπησε για άλλη μια φορά την Αθήνα και τον Πειραιά. Στην πρωτεύουσα καταστράφηκαν 127 σπίτια, αφήνοντας πολλούς άστεγους. Οι πλημμύρες συνοδεύονταν από ισχυρούς ανέμους, που ενίσχυσαν την καταστροφή.
- 22 Νοεμβρίου 1934 (6 νεκροί): Μια καταιγίδα διάρκειας 6ωρών έπληξε της περιοχές της Κοκκινιάς, του Νέου Φαλήρου, του Μοσχάτου και του Αγίου Ιωάννη, προκαλώντας καταστροφές και αφήνοντας 6 νεκρούς. Το νερό στο Μοσχάτο είχε φτάσει μέχρι και τα 2μέτρα.
- Νοεμβρίου 1961 (43 νεκροί): Η καταιγίδα του 1961, γνωστή ως «μητέρα των καταιγίδων», διήρκησε 10ώρες και προκάλεσε ανυπολόγιστες καταστροφές στην πρωτεύουσα με τους νεκρούς να ανέχονται στους 43. Τεράστιοι όγκοι νερού από τον Κηφισό και τον Ιλισσό πλημμύρισαν τις δυτικές και βορειοδυτικές συνοικίες της πόλης, αφήνοντας χιλιάδες αστέγους.
- 2 Νοεμβρίου 1977 (37 νεκροί): Βροχή μεγάλης έντασης χτύπησε το κέντρο της Αθήνας και τον Πειραιά. Οι καταστροφές ήταν εκτεταμένες, με πάνω από 1.900 πλημμυρισμένα κτίρια και 172 παρασυρμένα οχήματα.
- 21-22 Οκτωβρίου (17 νεκροί): η υπερχείλιση του ποταμού Ποδόνιφτη λόγω υψηλής βροχόπτωσης, προκάλεσε εκτεταμένες πλημμύρες στην Νέα Ιωνία, τον Περισσό και άλλες περιοχές της Αθήνας, αφήνοντας πίσω 17 νεκρούς και τεράστιες υλικές ζημίες σε σπίτια, αυτοκίνητα και καταστήματα.

- 15 Νοεμβρίου 2017 (24 νεκροί): Μια ξαφνική νεροποντή με μεγάλα ύψη βροχής (με δεδομένα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών η βροχόπτωση ξεπέρασε τα 200 χιλιοστά σε μόλις έξι ώρες), προκάλεσε πλημμύρες στην Μάνδρα και τη Νέα Πέραμος, αφήνοντας πίσω της 24 νεκρούς. Η καταιγίδα μετέτρεψε τις περιοχές σε «τοπία λάσπης», προκαλώντας εκτεταμένες καταστροφές (Newsbomb, n.d.)

5.2 Ανάλυση της Κακοκαιρία DANIEL

Η κακοκαιρία Daniel ξεκίνησε στις 4 Σεπτεμβρίου 2023. Μια μέρα πριν, το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών/meteo.gr, εξέδωσε έκτακτη ανακοίνωση προειδοποιώντας για μια επιδείνωση του καιρού με ισχυρές βροχές και καταιγίδες. Η ανακοίνωση ανέφερε ότι επρόκειτο για ένα επεισόδιο βροχόπτωσης Κατηγορίας 5, το οποίο χαρακτηρίζεται ως ακραίο και επικίνδυνο καιρικό φαινόμενο (βλ. Εικόνα 32 πρόβλεψη υετού).

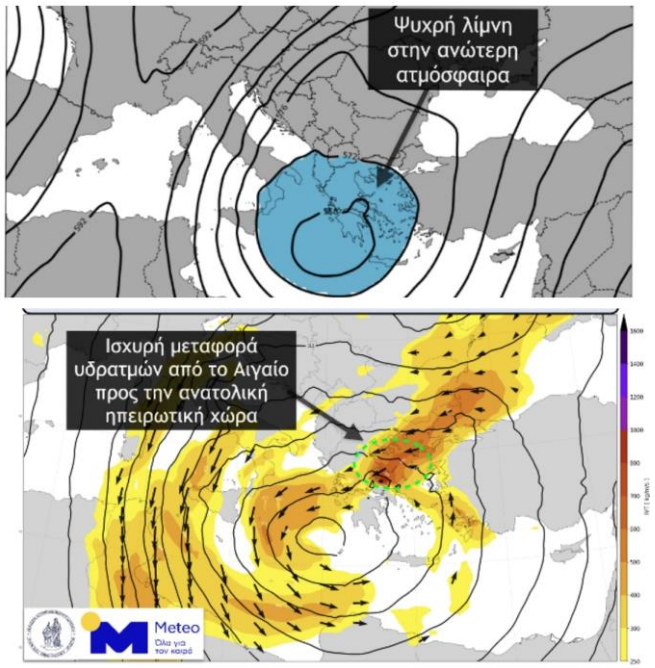


Εικόνα 32: «Προγνωστικό γράφημα αναμενόμενου αθροιστικού υετού κακοκαιρίας»(Πηγή: meteo.gr).

Η αιτία αυτής της επιδείνωσης ήταν η νοτιοδυτική κίνηση μιας ατμοσφαιρικής διαταραχής από τα βόρεια Βαλκάνια προς την Ελλάδα και το Ιόνιο πέλαγος. Η διαταραχή αυτή, γνωστή ως «ψυχρή λίμνη», αποκόπηκε από την γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία και κινήθηκε αργά, διατηρώντας τη δυναμική της στην Κεντρική Μεσόγειο. Αυτή η αργή κίνηση, σε συνδυασμό με την έντονη μεταφορά υδρατμών από το Αιγαίο προς τις ανατολικές περιοχές της χώρας, προκάλεσε

επίμονες και ισχυρές βροχές και καταιγίδες (Παπαβασιλείου & Λαγουβάρδος, 2023).Το φαινόμενο αυτό, γνωστό ως η κακοκαιρία Daniel, είχε σημαντικές επιπτώσεις, ειδικά στην Ανατολική ηπειρωτική Ελλάδα.

Στην (Εικόνα 33) παρουσιάζονται οι χάρτες πρόγνωσης του meteo.gr για την ατμοσφαιρική διαταραχή και τη μεταφορά υδρατμών προς τον Ελλαδικό χώρο.



Εικόνα 33: «Πρώτη εικόνα: χάρτης με την ατμοσφαιρική κυκλοφορία πάνω από την Ευρώπη (5/09/23), Δεύτερη εικόνα: χάρτης μεταφοράς υδρατμών (05/09/2023)» »(Πηγή: meteo.gr).

Η κακοκαιρία Daniel εξασθένισε και τελείωσε στις 7 Σεπτεμβρίου 2023, αφήνοντας πίσω της ένα από τα πιο έντονα καιρικά φαινόμενα που έχει αντιμετωπίσει η Ελλάδα τις τελευταίες δεκαετίες. Σύμφωνα με το meteo.gr, τα ημερήσια ύψη βροχής στην Κεντρική Ελλάδα κατά τη διάρκεια της κακοκαιρίας ξεπέρασαν κατά πολύ τα προηγούμενα ρεκόρ από το 2006. Ο χάρτης που δημοσιεύτηκε από το meteo.gr (βλ. Εικόνα 34), αποτυπώνει τα 8 μεγαλύτερα ύψη βροχής που καταγράφηκαν μέχρι τις 20:45 στις (5/09/2023), όπως συλλέχθηκαν από το δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών/meteo.gr. Η ένταση και η διάρκεια των βροχοπτώσεων ήταν πρωτοφανείς, προκαλώντας καταστροφές σε μεγάλες περιοχές της χώρας, κυρίως στην Κεντρική Ελλάδα, με σοβαρές συνέπειες για τις υποδομές, τις περιουσίες και την ανθρώπινη ζωή (Ντάφης, Κύρος, & Λαγουβάρδος, 2023).

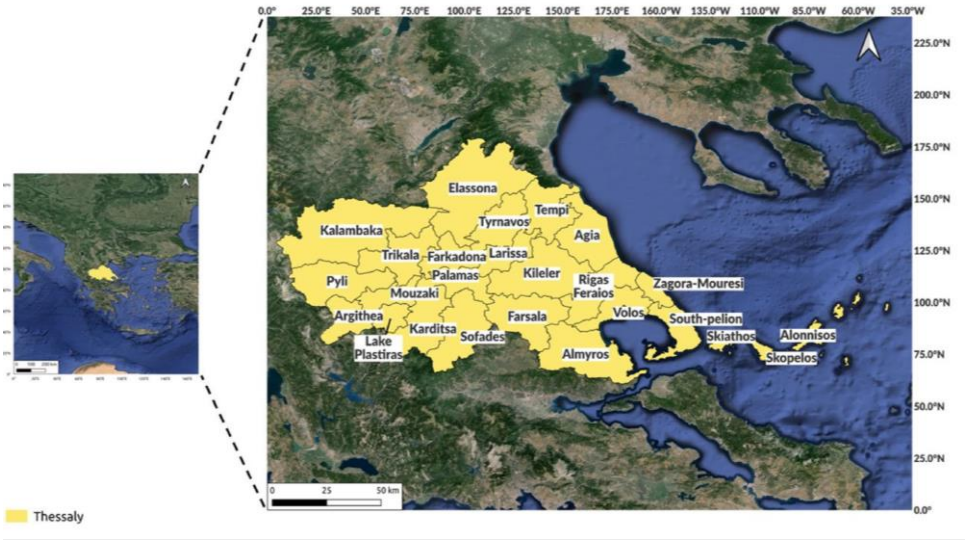


Εικόνα 34: «Χάρτης με τα 8 μεγαλύτερα ύψη βροχής σε χιλιοστά μέχρι τις 20:45 στις 5/9/2023» (πηγή: meteo.gr).

*Σημαντική υποσημείωση: Σε αρκετούς μετεωρολογικούς σταθμούς, η καταγραφή των δεδομένων διακόπηκε πρόωρα λόγω διακοπής ηλεκτρικού ρεύματος, γεγονός που σημαίνει ότι οι βροχοπτώσεις συνεχίστηκαν και πιθανώς τα συνολικά ύψη βροχής να ήταν ακόμα μεγαλύτερα.

5.3 Επιπτώσεις της κακοκαιρίας Daniel στην Θεσσαλία

Μετά από εβδομάδες ξηρασίας, πυρκαγιών και ακραίων θερμοκρασιών, η Κεντρική Ελλάδα βρέθηκε απροετοίμαστη να αντιμετωπίσει τη σφοδρότητα και την ένταση της κακοκαιρίας Daniel. Οι ισχυρές βροχοπτώσεις που σημειώθηκαν σε αρκετές περιοχές προκάλεσαν σοβαρές και πρωτοφανείς πλημμύρες. Στην περιφέρεια της Θεσσαλίας, η οποία αποτελεί σημαντικό γεωργικό κόμβο της χώρας, οι καταστροφές ήταν εκτεταμένες. Η περιοχή, που καλύπτει 1.403.600 εκτάρια και περιλαμβάνει 25 δήμους, υπέστη ζημιές οι οποίες εκτιμήθηκαν μεταξύ 1,5 και 2,5 δισεκατομμυρίων ευρώ. Η Θεσσαλία συνεισφέρει περίπου 12,2% της ακαθάριστης προστιθέμενης αξίας της γεωργικής βιομηχανίας της χώρας, γεγονός που καθιστά τις επιπτώσεις της κακοκαιρίας ακόμα πιο κρίσιμες για την ελληνική οικονομία (Eudaric et al., 2024).



Εικόνα 35: «Ο χάρτης της Θεσσαλίας » (πηγή: Eudaric et al., 2024).

Οι πλημμύρες έπληξαν τις αγροτικές δραστηριότητες της περιοχής, οδηγώντας σε εκτεταμένες απώλειες στην παραγωγή βασικών καλλιεργειών, όπως το βαμβάκι, το καλαμπόκι, τις ντομάτες και τα μήλα. Εκτιμάται ότι σχεδόν το 70% των βαμβακοκαλλιεργειών υπέστη σοβαρές και ανυπολόγιστες ζημίες, με αποτέλεσμα την μείωση της συνολικής παραγωγής βαμβακιού στην Ελλάδα κατά 15% -20% (He et al.,2024). Επιπλέον, η αδυναμία πλήρους ανάπτυξης των φυτών ενδέχεται να προκαλέσει μακροχρόνιες επιπτώσεις στην γεωργική απόδοση της περιοχής.

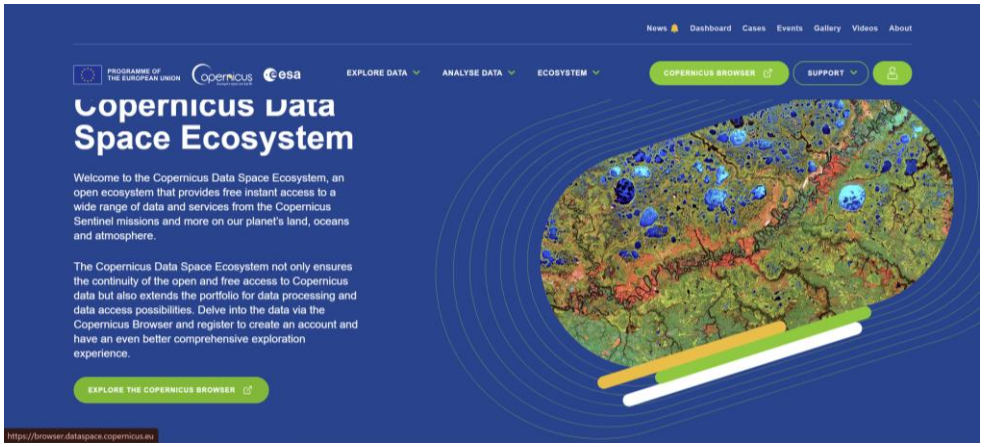
Για την ακριβέστερη κατανόηση και εκτίμηση των επιπτώσεων της καταιγίδας Daniel στην Θεσσαλία, είναι απαραίτητη η ακριβής αξιολόγηση του μεγέθους της καταστροφής. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε μια εκτίμηση της πλημμύρας και των σχετικών απωλειών και ζημιών, αξιοποιώντας την δυνατότητα χαρτογράφησης πλημμυρών σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Η διαδικασία βασίστηκε σε δεδομένα από δορυφορικές παρατηρήσεις ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (Sentinel-1) και οπτικούς δορυφόρους (Sentinel-2), με επεξεργασία των εικόνων μέσω λογισμικών LEOWorks και SNAP.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

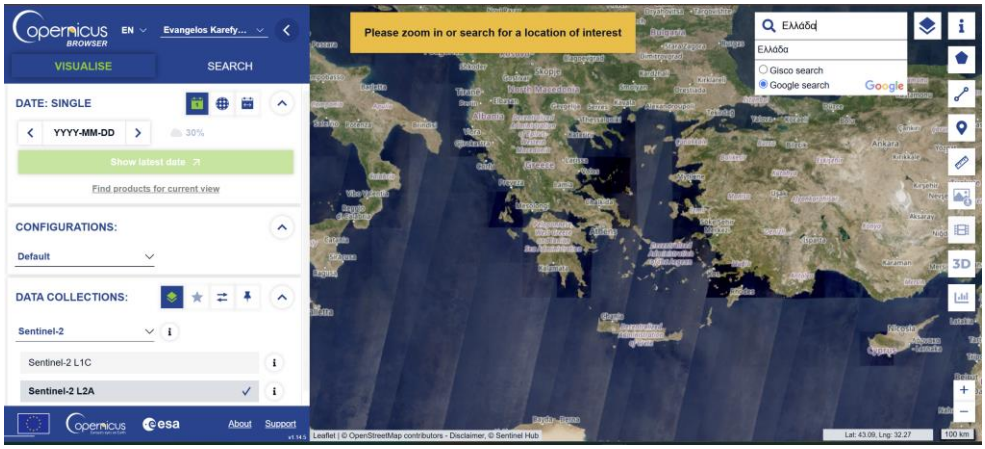
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΣΤΗΝ ΘΕΣΣΑΛΙΑ.

6.1 Συλλογή και Απόκτηση Δεδομένων

Η συλλογή και απόκτηση των δορυφορικών δεδομένων για την παρούσα μελέτη πραγματοποιείται μέσω της ανοικτής πλατφόρμας της ESA, Copernicus Data Space Ecosystem (https://dataspace.copernicus.eu) και συγκεκριμένα μέσω του Copernicus Browser (https://browser.dataspace.copernicus.eu). Πρόκειται για μια εξελιγμένη πλατφόρμα που προσφέρει στους χρήστες πρόσβαση σε δεδομένα από τις αποστολές Sentinel και άλλες αποστολές του προγράμματος Copernicus.



Εικόνα 36: «Copernicus Data Space Ecosystem».



Εικόνα 37: «Copernicus Brower».

Η ESA συντονίζει την παράδοση δεδομένων από πάνω από 30 δορυφόρους, με τους δορυφόρους Sentinel-1 και Sentinel-2 να είναι οι κυριότεροι για την συγκεκριμένη μελέτη. Η πλατφόρμα Copernicus Data Space παρέχει στους χρήστες μια ισχυρή αναζήτηση και εργαλεία

λήψης δορυφορικών εικόνων, τα οποία επιτρέπουν τη συλλογή δεδομένων για την παρατήρηση του περιβάλλοντος και τη μελέτη κλιματικών φαινομένων.

Η διαδικασία απόκτησης των δεδομένων από το Copernicus Data Space παρουσιάζεται παρακάτω (Πίνακας 4):

Πίνακας 4: «Βήματα απόκτησης δεδομένων από το Copernicus Data Space».

Α/Α	Βήματα	Περιγραφή Βημάτων/Παρατηρήσεις
1	Δημιουργία λογαριασμού στο (https://dataspace.copernicus.eu/)	Απαιτείται η δημιουργία ενός απλού λογαριασμού στην Copernicus Data Space για να αποκτήσει ο χρήστης πρόσβαση στα διαθέσιμα δεδομένα.
2	Χρήση του Copernicus Data Space Browser	Για την αναζήτηση και λήψη δεδομένων ο χρήστης μπορεί να μεταβεί στο (https://browser.dataspace.copernicus.eu/), όπου παρέχονται εργαλεία για την αναζήτηση δορυφορικών εικόνων και την επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος. Στην πλατφόρμα αυτή, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει: • Περιοχή Ενδιαφέροντος μέσω του χάρτη, με εργαλεία σχεδίασης ή εισαγωγή συντεταγμένων, • Ημερομηνία Λήψης της Εικόνας, • Τύπο Δορυφόρου (π.χ. Sentinel-1, Sentinel-2), • Τύπο Δεδομένων (π.χ. GRD,SLC,RGB κ.α.)
3	Λήψη Δεδομένων	Μετά την αναζήτηση των εικόνων, οι χρήστες μπορούν να κατεβάσουν τα δεδομένα σε διάφορους τύπους αρχείων και να τα χρησιμοποιήσουν για ανάλυση.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ως περιοχή μελέτης επιλέγεται ο Θεσσαλικός κάμπος και συγκεκριμένα οι περιοχές κατά μήκος του ποταμού Πηνειού και γύρω από τη λίμνη Κάρλα. Η επιλογή των συγκεκριμένων περιοχών βασίζεται στο γεγονός ότι είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε πλημμυρικά φαινόμενα, κατά τη διάρκεια έντονων καιρικών φαινομένων.

Κατά την επιλογή των κριτηρίων, το χρονικό διάστημα αναζήτησης επικεντρώνεται σε ημερομηνίες που σχετίζονται με τα πρόσφατα πλημμυρικά επεισόδια της περιοχής.

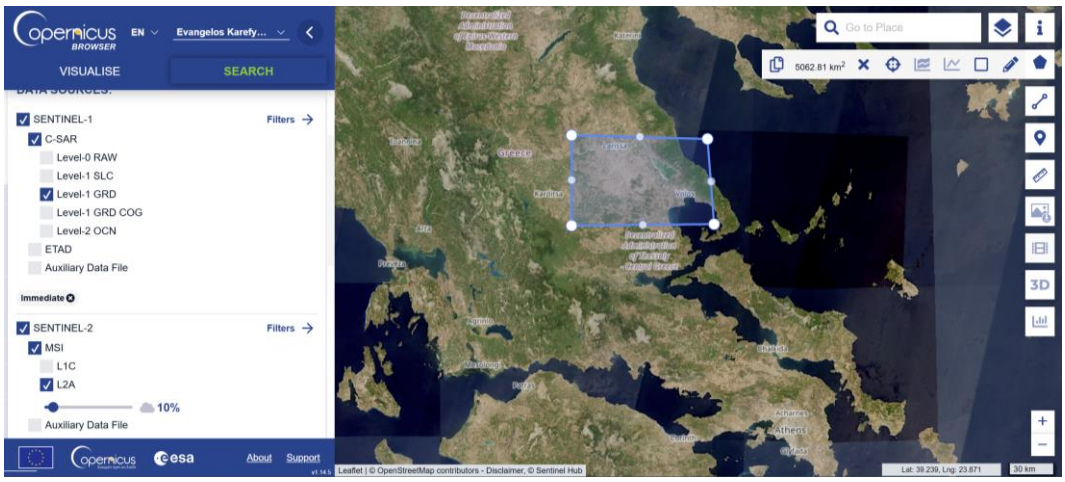
Οι δορυφορικές αποστολές που χρησιμοποιούνται είναι :

- Sentinel-1A (Τύπος εικόνων: IW-GRD - Interferometric Wide Swath Ground Range Detected)
- Sentinel-2A & Sentinel-2B (Τύπος εικόνων: MSI-L2A - Multispectral Instrument, Level- 2A).

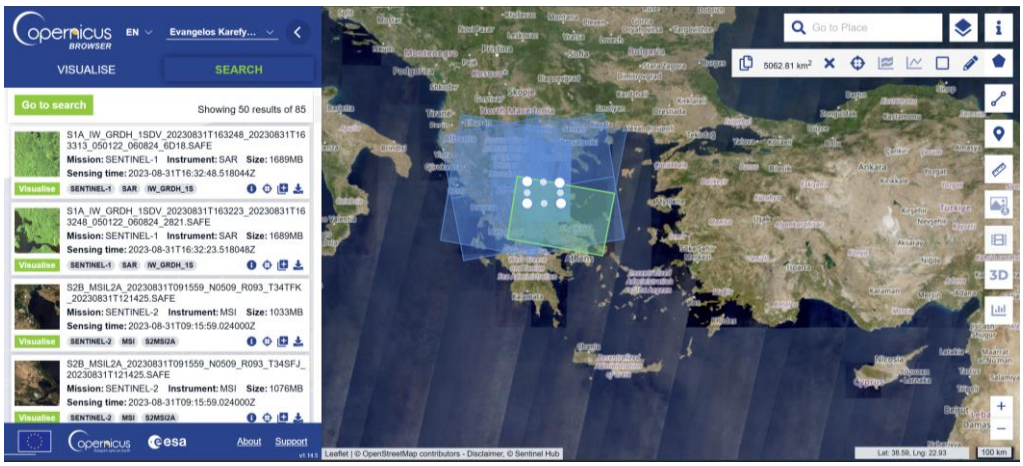
Για την καλύτερη μελέτη και ανάλυση των φαινομένων, απαιτείται η χρήση δορυφορικών εικόνων τόσο πριν όσο και μετά τα φαινόμενα. Έτσι επιλέγονται εικόνες από τους δορυφόρους Sentinel-1 και Sentinel-2, οι οποίες καταγράφουν την κατάσταση της περιοχής πριν και μετά τις πλημμύρες. Οι ημερομηνίες και οι ώρες λήψης των εικόνων παρουσιάζονται στον παρακάτω (Πίνακας 5):

Πίνακας 5: «Ημερομηνίες και ώρες λήψης δορυφορικών εικόνων Sentinel-1&2».

Α/Α	Δορυφόρος	Τύπος Δεδομένων	Ημερομηνία λήψης	Ώρα λήψης	Περιοχή κάλυψης
1	Sentinel-1A	IW-GRD	27/07/2023	04:31:55 - 04:32:20	Θεσσαλικός Κάμπος
2	Sentinel-1A	IW-GRD	13/09/2023	04:31:32 - 04:31:57	Θεσσαλικός Κάμπος
3	Sentinel-2B	MSI-L2A	21/08/2023	09:15:59	Tile: T34SFJ
4	Sentinel-2A	MSI-L2A	15/10/2023	09:20:31	Tile: T34SFJ
5	Sentinel-2B	MSI-L2A	10/09/2023	09:15:59	Tile: T34SEJ, T34SFJ



Εικόνα 38: «Οριοθέτηση περιοχής ενδιαφέροντος και εισαγωγή κριτηρίων για αναζήτηση εικόνων Sentinel-1 και Sentinel-2».



Εικόνα 39: «Δορυφορικές εικόνες που προέκυψαν από τη διαδικασία αναζήτησης».

Οι δορυφορικές εικόνες που λήφθηκαν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτούσιες, καθώς απαιτείται προ-επεξεργασία για τη διόρθωση πιθανών σφαλμάτων και την εξασφάλιση της ακρίβειας των δεδομένων. Η επεξεργασία αυτή πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού SNAP για τις εικόνες του Sentinel-1, και του LEOWorks για τις εικόνες του Sentinel-2.

6.2 Παρουσίαση των Λογισμικών Επεξεργασίας SNAP & LEOWorks

Λογισμικό SNAP

Το λογισμικό SNAP (Sentinel Application Platform), είναι ένα ισχυρό εργαλείο που έχει σχεδιαστεί για την επεξεργασία και ανάλυση δορυφορικών εικόνων, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές που σχετίζονται με την παρατήρηση της Γης. Αναπτύχθηκε από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) από τους Brokmann Consult, SkyWatch και CS, και υποστηρίζει δεδομένα από πολλές αποστολές δορυφόρων όπως οι Sentinel-1, 2 και 3. Χάρη στις προηγμένες τεχνολογικές δυνατότητες του, το SNAP είναι ιδανικό για εφαρμογές που αφορούν την ανάλυση και παρατήρηση της Γης. Κύρια χαρακτηριστικά του περιλαμβάνουν:

- Επεκτασιμότητα (Extensibility), που επιτρέπει την προσαρμογή και επέκταση των λειτουργειών του.
- Φορητότητα (Portability), διασφαλίζοντας τη χρήση του σε διαφορετικά λειτουργικά συστήματα.
- Δυνατότητα ενσωμάτωσης πρόσθετων στοιχείων λογισμικού (Modular Rich Client Platform), όπως εργαλεία απεικόνισης και υπολογιστικά φύλλα.
- Αφαίρεση γενικών δεδομένων παρατήρησης της Γης (Generic EO Data Abstraction), προσφέροντας ευελιξία στη διαχείριση δορυφορικών δεδομένων.

- Διαχείριση μνήμης (Tiled Memory Management), για αποτελεσματική επεξεργασία μεγάλων δεδομένων.
- Πλαίσιο επεξεργασίας γραφημάτων (Graph Processing Framework), διευκολύνει την δημιουργία πολύπλοκων ροών εργασίας για την ανάλυση των δεδομένων.

(ESA, n.d.; Copernicus Sentinels, n.d.)



Εικόνα 40: «Εκκίνηση λογισμικού SNAP».

Λογισμικό LEOWorks

Το LEOWorks είναι ένα εκπαιδευτικό λογισμικό ανοιχτού κώδικα, σχεδιασμένο για επιθεώρηση και ανάλυση δορυφορικών εικόνων. Αναπτύχθηκε από την ομάδα EDUSPACE του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA) και χρησιμοποιείται ως κύριο εργαλείο για την επίδειξη τεχνικών παρατήρησης της Γης σε σχολεία δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης και σε πανεπιστημιακά προγράμματα.

Η αρχική έκδοση LEOWorks 3.0, είχε ως στόχο την προβολή, ανάλυση και ερμηνεία δορυφορικών εικόνων στο πλαίσιο της εκπαίδευσης. Στην συνέχεια, η TERRASIGNA ανάπτυξε τη νέα έκδοση LEOWorks 4.x, η οποία βασίζεται στην γλώσσα Java και διαθέτει προηγμένες λειτουργείες GIS και επεξεργασία εικόνας SAR. Το LEOWorks 4.x διατίθεται με Γενική Δημόσια Άδεια (GPL), καθιστώντας το ένα ισχυρό εργαλείο τόσο για την ανάλυση οπτικών δεδομένων όσο και για την επεξεργασία εικόνων ραντάρ (ESA, n.d.).



Εικόνα 41: «Εκκίνηση λογισμικού LEOWorks».

6.3 Ανάλυση Πλημμύρας στον Θεσσαλικό Κάμπο με Χρήση Sentinel-1 και SNAP

Η ανάλυση δορυφορικών εικόνων Sentinel-1 μέσω του λογισμικού SNAP αποτελεί μία αποτελεσματική προσέγγιση για τη χαρτογράφηση πλημμυρών. Στόχος της διαδικασίας είναι η επεξεργασία δεδομένων SAR ώστε να εντοπιστούν και να διαχωριστούν οι πλημμυρισμένες περιοχές από τις μόνιμες υδάτινες επιφάνειες.

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στη χαρτογράφηση της πλημμύρας στον θεσσαλικό Κάμπο. Η μέθοδος που ακολουθείται περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Εισαγωγή και προετοιμασία δεδομένων Sentinel-1
2. Προ-επεξεργασία εικόνων:
    - Αφαίρεση θερμικού θορύβου (Thermal Noise Removal)
    - Ραδιομετρική βαθμονόμηση (Radiometric Calibration)
    - Φιλτράρισμα θορύβου (Speckle Filtering)
    - Εφαρμογή ακριβούς τροχιάς δορυφόρου (Apply Orbit File)
    - Γεωαναφορά και διόρθωση ανάγλυφου (Terrain Correction)
    - Μετατροπή σε λογαριθμική κλίμακα (Linear to dB)
    - Καθορισμός κατωφλίου (Thresholding)
3. Διαχωρισμός πλημμυρισμένων περιοχών από τα μόνιμα υδάτινα σώματα.
4. Οπτικοποίηση και ανάλυση αποτελεσμάτων.

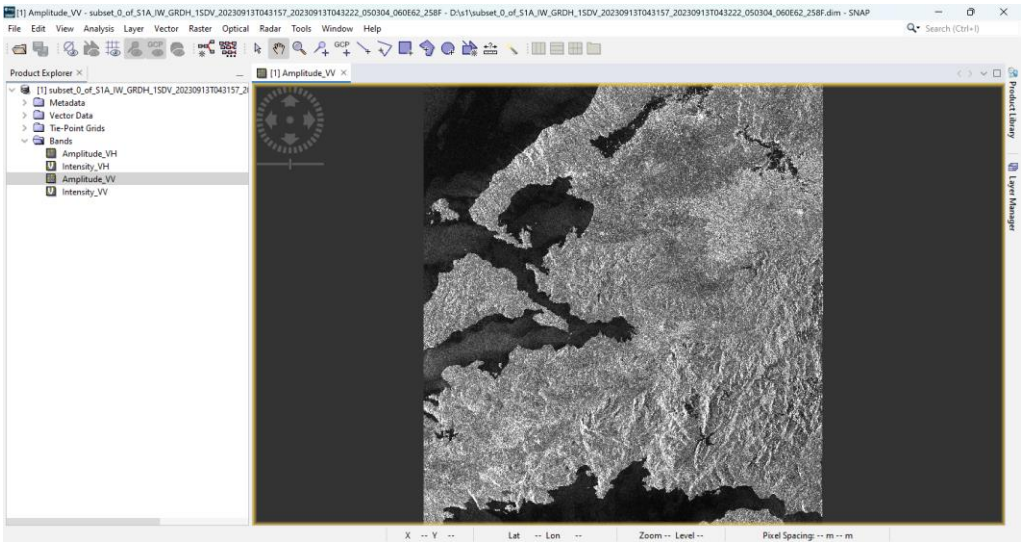
6.3.1 Εισαγωγή και Προετοιμασία Δεδομένων Sentinel-1

Πριν από την έναρξη της προ-επεξεργασίας των δεδομένων, το πρώτο βήμα είναι η φόρτωση του αρχείου των δορυφορικών εικόνων στο λογισμικό SNAP. Το αρχείο μπορεί να εισαχθεί είτε απευθείας σε συμπιεσμένη μορφή (*.zip) είτε αποσυμπιεσμένο, δίνοντας πρόσβαση στις επιμέρους πληροφορίες του.

Μέσα στην καρτέλα Product Explorer, εμφανίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του δορυφορικού προϊόντος (βλ. Εικόνα 42) τα οποία περιλαμβάνουν:

- Metadata (Μεταδιδόμενα): Πληροφορίες σχετικά με την τροχιά του δορυφόρου και τις τεχνικές παραμέτρους του SAR.
- Vector Data (Διανυσματικά δεδομένα): Επιπλέον γεωχωρικές πληροφορίες για την περιοχή μελέτης.
- Tie-points grid (Κάνναβος σημείων σύνδεσης): Δεδομένα όπως γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος.
- Quick looks: Γραφική απεικόνιση των δεδομένων για προεπισκόπηση.
- Bands (ζώνες εικόνας): Διαφορετικές φασματικές ζώνες που περιέχει το δορυφορικό προϊόν.

Επιπλέον, η καρτέλα ιδιοτήτων παρέχει λεπτομέρειες όπως η ημερομηνία και ώρα λήψης της εικόνας, ο αριθμός τροχιάς του δορυφόρου και η γωνία παρατήρησης.

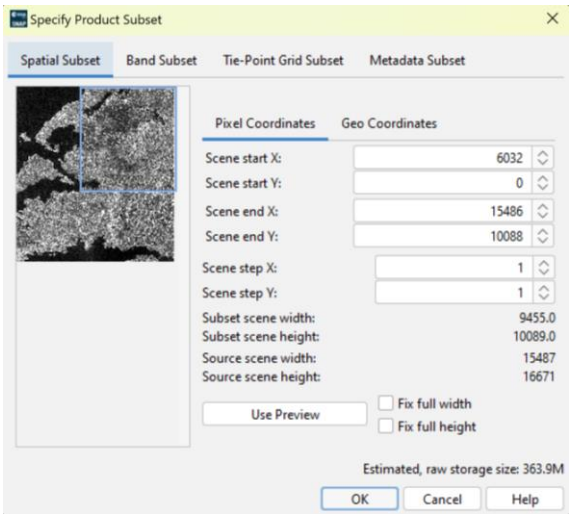


Εικόνα 42: «Εισαγωγή δεδομένων στο SNAP».

Κάθε δορυφορική εικόνα Sentinel-1 περιλαμβάνει δύο πολώσεις την VV και VH. Κάθε μια από αυτές διαθέτει δύο Bands, το Amplitude και το Intensity. Το Intensity υπολογίζεται ως το τετράγωνο του Amplitude και χρησιμοποιείται κυρίως για ανάλυση. Στη συγκεκριμένη μελέτη,

επιλέχθηκε η πόλωση VV και η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του band Amplitude_VV.

Δεδομένου ότι η δορυφορική εικόνα καλύπτει μια ευρύτερη περιοχή από εκείνη που αφορά την έρευνα, για λόγους αποδοτικότητας και ταχύτερης επεξεργασίας, επιλέγεται ένα υποσύνολο (Subset) της εικόνας που αντιστοιχεί στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η δημιουργία αυτού του υποσυνόλου γίνεται με την εισαγωγή των συντεταγμένων που το ορίζουν. Το υποσύνολο που προκύπτει εμφανίζεται στο παράθυρο Product Explorer ως νέο προϊόν, το οποίο διαθέτει τις ίδιες δυνατότητες επεξεργασίας και ανάλυσης με την αρχική εικόνα.



Εικόνα 43: «Δημιουργία υποσυνόλου για περιοχή ενδιαφέροντος».

6.3.2 Προ-επεξεργασία Εικόνων

Η προ-επεξεργασία της εικόνας περιλαμβάνει μια σειρά από διορθώσεις ώστε να διασφαλιστεί η ακρίβεια της ανάλυσης.

Τα βασικά στάδια περιλαμβάνουν:

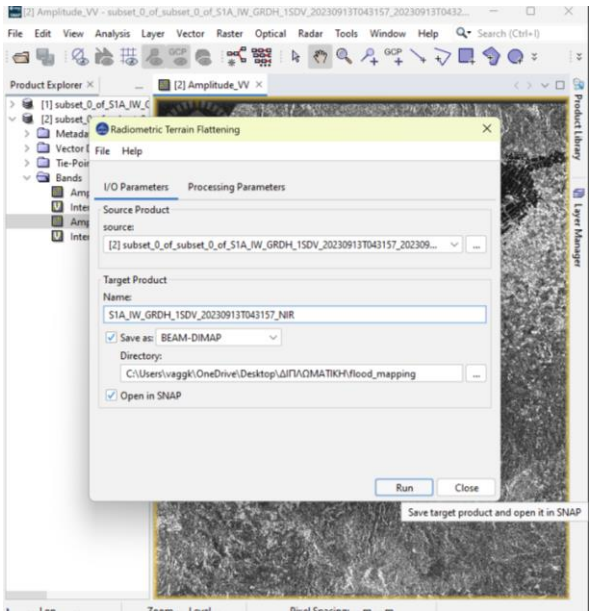
Αφαίρεση θερμικού θορύβου (Thermal Noise Removal):

Τα μεταδεδόμενα του προϊόντος περιλαμβάνουν ένα πίνακα αναζήτησης στην ενότητα Original_Product_Metadata, ο οποίος περιέχει τις μετρήσεις θορύβου. Αυτός ο θόρυβος μπορεί να αφαιρεθεί από τις τιμές έντασης κάθε εικονοστοιχείου μέσω του κατάλληλου τελεστή που προσφέρεται στο SNAP.

Για να πετύχει αυτό επιλέγεται από το μενού:

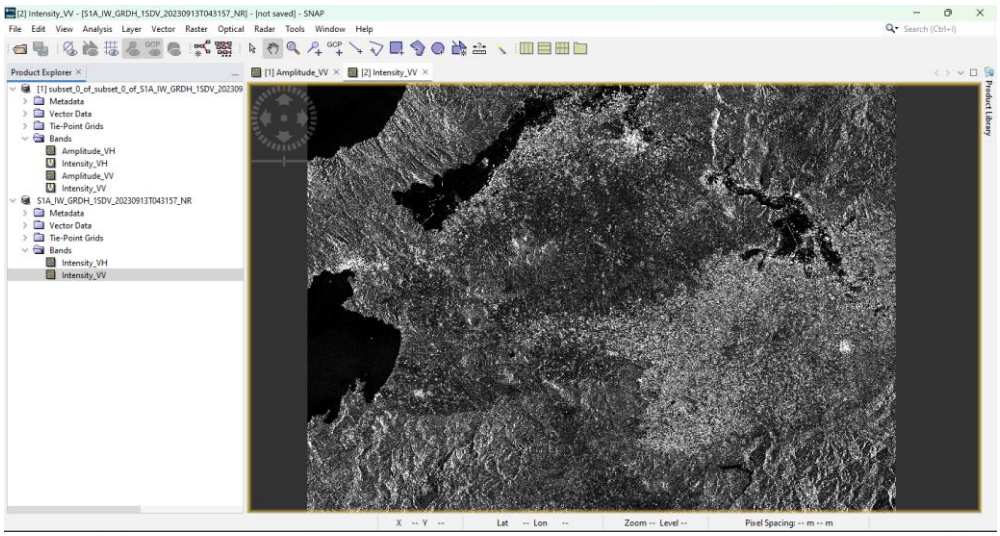
Radar -> Radiometric -> S-1 Thermal Noise Removal.

Στο αναδυόμενο παράθυρο που εμφανίζεται, προσδιορίζεται από τον χρήστη ένα όνομα αρχείου εξόδου προσθέτοντας μια κατάληξη όπως π.χ. NIR, και επιλέγεται ο φάκελο αποθήκευσης. Στην συνέχεια, πατώντας Εκτέλεση (Run) δημιουργείται ένα νέο προϊόν.



Εικόνα 44: «Αφαίρεση θερμικού θορύβου: Ορισμός ονόματος νέου προϊόντος».

Όταν ανοιχτεί ο φάκελος Bands του νέου προϊόντος εξόδου, θα παρατηρηθεί ότι υπάρχει μια ζώνη με την ονομασία Intensity_VV. Αυτό συμβαίνει επειδή ο θόρυβος αφαιρέθηκε από την ένταση, δηλαδή από την τετραγωνική τιμή του πλάτους.



Εικόνα 45: «Οπτικοποίηση του νέου προϊόντος, μετά την αφαίρεση θορύβου».

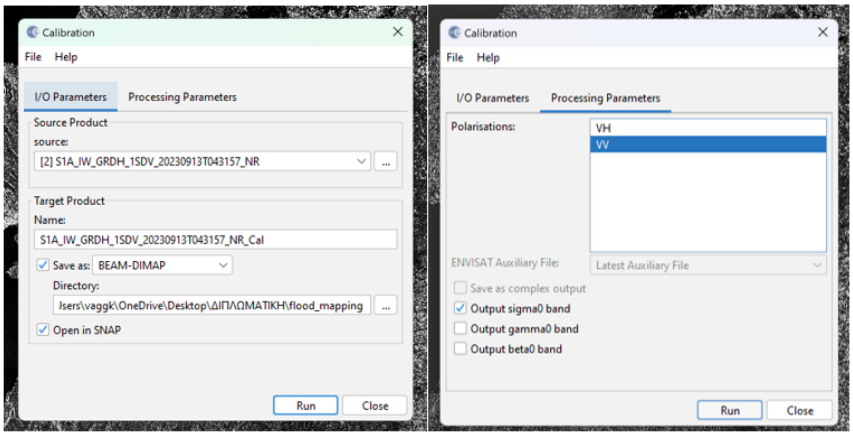
<u>Ραδιομετρική Βαθμονόμηση (Radiometric Calibration)</u>

Οι εικόνες SAR 1^{ου} επιπέδου περιέχουν ραδιομετρικό σφάλμα, καθώς δεν έχουν υποστεί τις απαραίτητες διορθώσεις. Για να διασφαλιστεί η ακρίβεια των δεδομένων, εφαρμόζεται η ραδιομετρική βαθμονόμηση, ώστε οι τιμές των εικονοστοιχείων να αντιστοιχούν στις πραγματικές τιμές του αισθητήρα ραντάρ. Στο στάδιο αυτό, εφαρμόζεται η διαδικασία βαθμονόμησης ώστε να μετατραπούν οι τιμές των εικονοστοιχείων από ακέραιους ψηφιακούς αριθμούς (Digital Number, DN) σε συντελεστές οπισθοσκέδασης (Sigma nought).

Για να επιτευχθεί ο σκοπός αυτός, επιλέγεται:

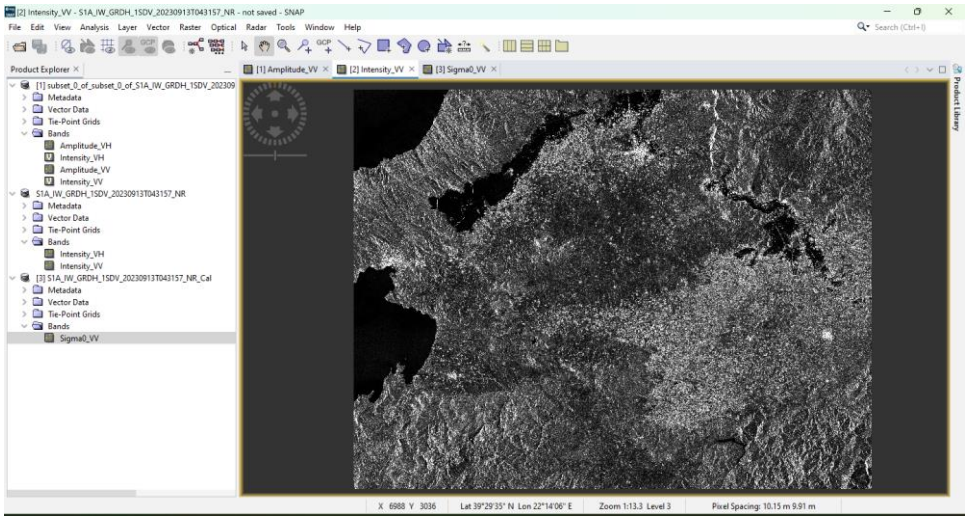
Radar -> Radiometric -> Calibrate.

Στο αναδυόμενο παράθυρο που εμφανίζεται, στην καρτέλα (I/O Paraments) επιλέγεται το προϊόν εξόδου από την αφαίρεση του θερμικού θορύβου, (στην περίπτωσή μας με το επίθημα _NIR) και στην καρτέλα (Processing Paraments), επιλέγεται στο (Polarisations) η πόλωση «VV».



Εικόνα 46: «Ρυθμίσεις βαθμονόμησης: επιλογή προϊόντος εισόδου και πόλωσης VV».

Στην συνέχεια πατώντας εκτέλεση (Run) δημιουργείται η ζώνη του προϊόντος εξόδου όπου πλέον ονομάζεται «Sigma0_VV», που αντιστοιχεί στον συντελεστή οπισθοσκέδασης (Sigma nought).

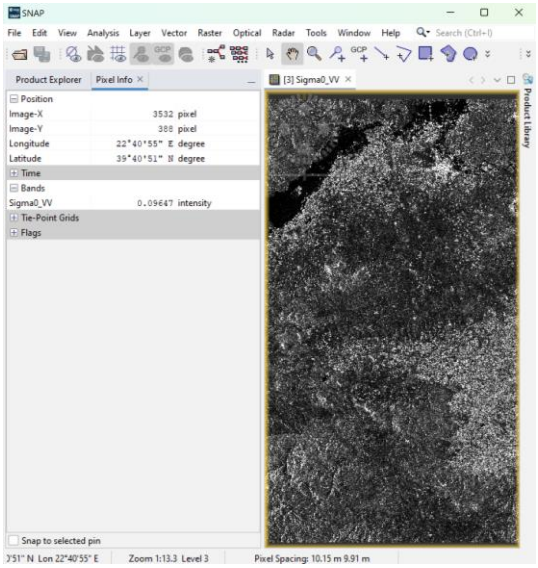


Εικόνα 47: «Οπτικοποίηση του νέου προϊόντος, μετά την ραδιομετρική διόρθωση».

Με την διαδικασία:

View -> Tool Windows -> Pixel info

Υπάρχει η δυνατότητα προβολής των τιμών εικονοστοιχείων από το παράθυρο «Pixel info».



Εικόνα 48: «Πίνακας πληροφοριών εικονοστοιχείων εικόνας».

Οι τιμές που υπολογίστηκαν σε αυτό το βήμα εκφράζουν τους συντελεστές οπισθοσκέδασης, γνωστούς και ως μηδενικό sigma. Αυτοί περιγράφουν τη σχέση μεταξύ της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια και εκείνης που ανακλάται πίσω προς τον δέκτη, αναλογικά με τη μονάδα επιφάνειας σε οριζόντιο επίπεδο.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η τοπογραφία μπορεί να επηρεάσει τόσο την οπισθοσκέδαση όσο και την ακριβή θέση των ανακλαστών, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονες υψομετρικές διαφοροποιήσεις. Εφόσον η περιοχή ενδιαφέροντος που έχει επιλεχθεί είναι σχετικά επίπεδη, επιλέγεται ως έξοδος της βαθμονόμησης το «sigma nought». Σε περίπτωση ύπαρξης σημαντικών υψομετρικών διαφοροποιήσεων, προτιμάται το «beta nought», οπού εφαρμόζεται τελεστής ισοπέδωσης εδάφους «Terrain Flattening», για την διόρθωση των ραδιομετρικών αλλοιώσεων.

<u>Φιλτράρισμα θορύβου (Speckle Filtering)</u>

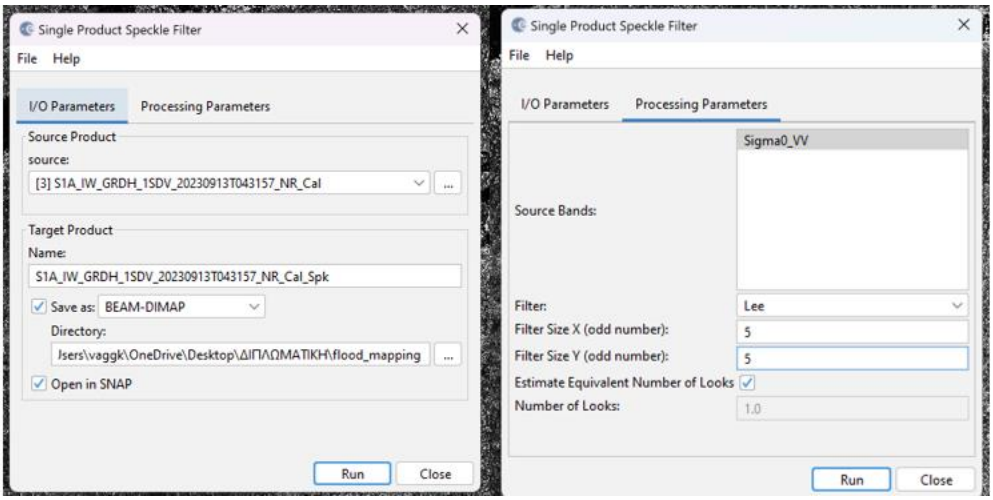
Μετά την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης της δορυφορικής εικόνας, ακολουθεί η εφαρμογή φίλτρων για την βελτίωση της ποιότητάς της. Οι εικόνες από αισθητήρα ραντάρ συχνά εμφανίζουν θόρυβο, δίνοντας τους μια χαρακτηριστική κοκκώδη όψη, γνωστή ως «salt and pepper effect». Τα μικροκυμματικά σήματα που ανιχνεύει ο δορυφόρος μπορεί να είναι είτε σε φάση είτε εκτός φάσης, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία μεμονωμένων εικονοστοιχείων με έντονη χωρική ετερογένεια στις SAR εικόνες. Αυτός ο θόρυβος μειώνει την ποιότητα της εικόνας, αλλοιώνοντας την χωρική πληροφορία και δυσχεραίνοντας την οπτική ερμηνεία, προκαλώντας υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων ανάλυσης. Το φιλτράρισμα εφαρμόζεται για να περιορίσει αυτές τις αλλοιώσεις και να βελτιώσει την αξιοπιστία των δεδομένων.

Για να εφαρμοστεί το φιλτράρισμα στο λογισμικό SNAP, επιλέγεται:

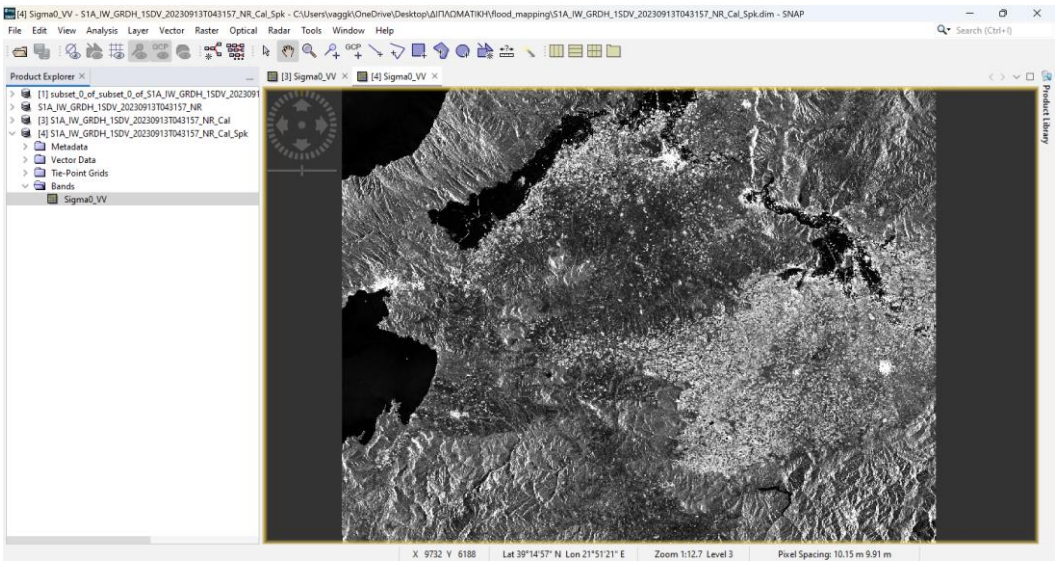
Radar -> Speckle Filtering -> Single Product Filter.

Στο αναδυόμενο παράθυρο που εμφανίζεται, στην καρτέλα «I/O Parameters» ορίζεται το αρχείο εισόδου (η βαθμονομημένη εικόνα),το όνομα, την τοποθεσία αποθήκευσης και τον τύπο αρχείου (BEAM-DIMAP).

Στην συνέχεια, στην καρτέλα Processing Parameters, επιλέγεται η πηγή (Source Bands) και το φίλτρο που θα εφαρμοστεί, στην περίπτωσή μας «Lee 5×5». Πατώντας εκτέλεση (Run) ξεκινάει η διαδικασία και μόλις ολοκληρωθεί, το φιλτραρισμένο αρχείο θα εμφανιστεί στο Product Explorer.



Εικόνα 49: «Εφαρμογή φίλτρου Lee 5×5 για μείωση του θορύβου στην εικόνα ραντάρ».



Εικόνα 50: «Οπτικοποίηση του νέου προϊόντος, μετά την εφαρμογή φίλτρου».

Εφαρμογή ακριβούς τροχιάς δορυφόρου (Apply Orbit File)

Στα περιληπτικά μεταδεδόμενα (Abstracted_Metadata) του προϊόντος περιλαμβάνεται μια λίστα με 16 Διανύσματα Κατάστασης Τροχιάς. Κάθε ένα από αυτά αποτελείται από δυο σημεία (x,y,z), τα οποία χρησιμεύουν στη διαμόρφωση μιας γραμμής για τον υπολογισμό της τροχιάς. Η πληροφορία αυτή είναι απαραίτητη για τη διόρθωση εδάφους της εικόνας, η οποία αναλύεται στο επόμενο στάδιο, ώστε να γίνει μετατροπή των συντεταγμένων από το δορυφορικό σύστημα αναφοράς σε ένα γεωγραφικό σύστημα.

Η χρήση ακριβέστερων τροχιών μπορεί να βελτιώσει τα αποτελέσματα, ιδίως για τη μείωση γεωμετρικών παραμορφώσεων και τη σύγκριση εικόνων που έχουν ληφθεί σε διαφορετικές ημερομηνίες.

Εφόσον οι ακριβείς τροχιές είναι διαθέσιμες, ανακτώνται αυτόματα από το διαδίκτυο. Για την εφαρμογή τους, επιλέγεται η εντολή:

Radar -> Apply Orbit File

Στο αναδυόμενο παράθυρο, ως προϊόν πηγής καθορίζεται η έξοδος του φίλτρου στίγματος, ενώ διατηρούνται οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις. Μετά την ολοκλήρωσή της, το νέο προϊόν εξόδου περιλαμβάνει μεγαλύτερο αριθμό διανυσμάτων κατάστασης τροχιάς, συνήθως 22, ανάλογα με το μέγεθος του υποσυνόλου.

Όταν η ακριβής τροχιά δεν είναι διαθέσιμη στο αρχικό προϊόν, καθώς υπολογίζεται λίγες ημέρες μετά τη λήψη της εικόνας, τότε η διαδικασία αποτυγχάνει. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αποκατεστημένη τροχιά, επιλέγοντας “Sentinel Restituted (Αυτόματη λήψη)” στην καρτέλα (Παράμετροι επεξεργασίας). Οι ακριβείς τροχιές έχουν ακρίβεια ±5cm, ενώ οι αποκατεστημένες ±10cm.

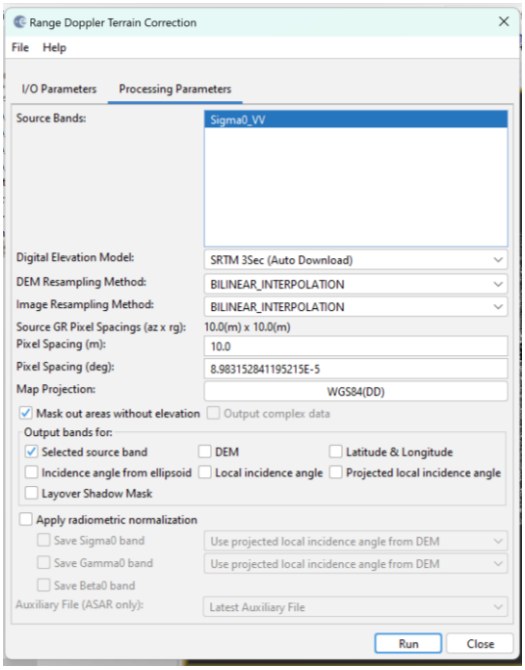
Γεωαναφορά και διόρθωση ανάγλυφου (Terrain Correction)

Η διόρθωση ανάγλυφου εφαρμόζεται ώστε τα εικονοστοιχεία να προβάλλονται από το δορυφορικό σύστημα αναφοράς σε ένα γεωγραφικό. Το δορυφορικό σύστημα αναφοράς, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή ορίζεται από την τροχιά του δορυφόρου. Επιπλέον, η διόρθωση ανάγλυφου (γνωστή και ως Γεωκωδικοποίηση (geocoding) ή ορθοδιόρθωση (orthorectification), χρησιμοποιείται για την διόρθωση γεωμετρικών παραμορφώσεων οι οποίες οφείλονται στη γεωμετρία του SAR και την τοπογραφία του εδάφους. Η γεωκωδικοποίηση βασίζεται στη διαθεσιμότητα ενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου (DEM).

Η διαδικασία πραγματοποίησης στο SNAP είναι:

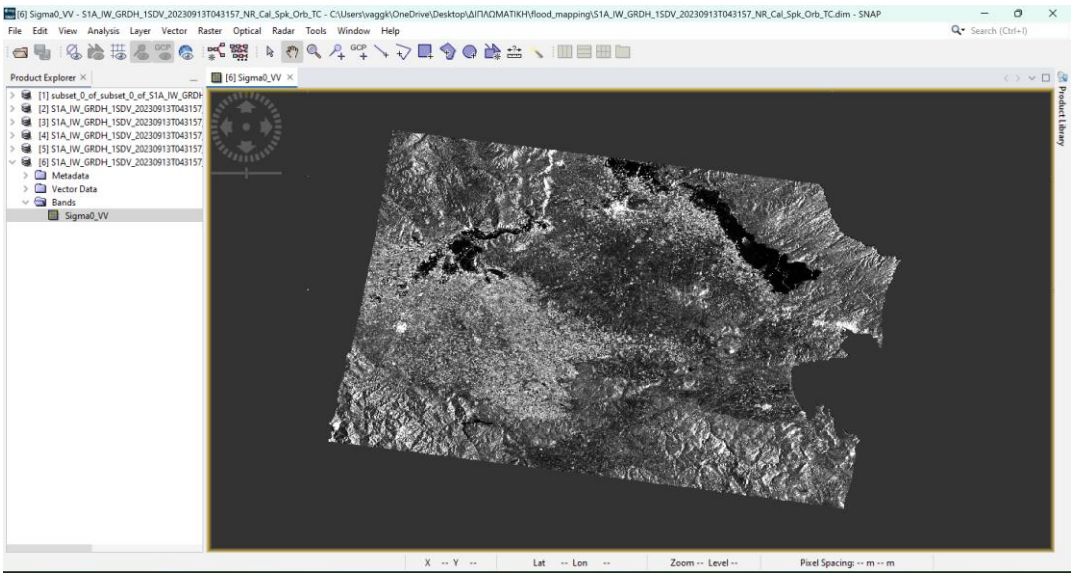
Radar -> Geometric -> Terrain Correction -> Range-Doppler Terrain Correction

Στο αναδυόμενο παράθυρο που εμφανίζεται, επιλέγεται το προϊόν ακριβούς τροχιάς ως πηγή και διατηρούνται οι προεπιλεγμένες παράμετροι. Τα εικονοστοιχεία προβάλλονται στο γεωγραφικό σύστημα αναφοράς WGS8, ενώ οι πραγματικές αποστάσεις υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Shuttle Radar Topography Mission - SRTM).



Εικόνα 51: «Διόρθωση εδάφους Range Doppler».

Με την επιλογή (Run), δημιουργείται ένα νέο προϊόν που περιλαμβάνει μια ζώνη Sigma0_VV, όπου η περιοχή ενδιαφέροντος προβάλλεται πλέον σε ένα γεωγραφικό σύστημα αναφοράς.



Εικόνα 52: «Οπτικοποίηση του νέου προϊόντος, μετά την εφαρμογή διόρθωσης ανάγλυφού».

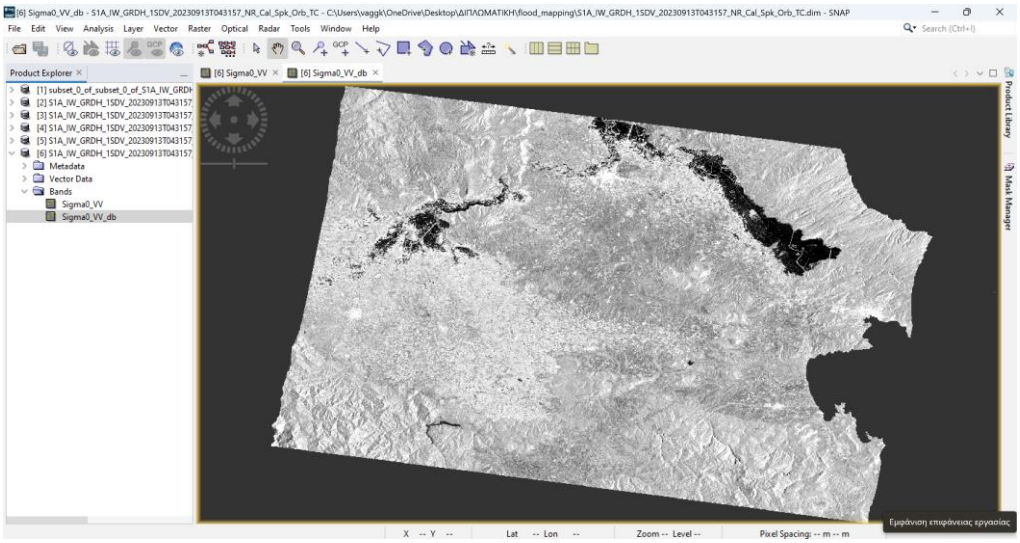
Στην επιλεγμένη περιοχή, η τοπογραφία είναι σχετικά επίπεδη, με αποτέλεσμα οι γεωμετρικές παραμορφώσεις λόγω της πλευρικής γεωμετρίας του ραντάρ και της μορφολογίας του εδάφους να μην είναι έντονα εμφανείς. Ωστόσο, σε άλλη περιοχή, όπου οι παραμορφώσεις είναι πιο ορατές, αυτές εμφανίζονται ως κλίση των ορεινών σχηματισμών προς τα αριστερά, λόγω της γωνίας θέασης του SAR. Μετά τη γεωμετρική διόρθωση, η ίδια περιοχή προβάλλεται σωστά στο γεωγραφικό σύστημα αναφοράς, ενώ το φαινόμενο της κλίσης έχει εξαλειφθεί.

6.3.3 Εντοπισμός και Ταξινόμηση Πλημμυρισμένων Περιοχών

Μετατροπή σε λογαριθμική κλίμακα (Linear to dB)

Οι εικόνες των ραντάρ είναι αρκετά σκοτεινές, καθώς η πλειονότητα των εικονοστοιχείων έχει χαμηλές τιμές οπισθοσκέδασης, με λίγα να παρουσιάζουν υψηλές τιμές. Για καλύτερη διαχείριση των δεδομένων, συνιστάται η μετατροπή των γραμμικών τιμών σε λογαριθμικές ή ντεσιμπέλ (dB). Με αυτόν το τρόπο, η κατανομή των τιμών γίνεται πιο κατανοητή και ευκολότερη στον χειρισμό.

Με δεξί κλικ στη ζώνη επιλέγεται η μετατροπή «Linear to/from dB». Στην συνέχεια, θα κατασκευαστεί μια μάσκα, δηλαδή μια δυαδική εικόνα των πλημμυρισμένων περιοχών, χρησιμοποιώντας απλές αριθμητικές πράξεις στις τιμές των εικονοστοιχείων. Η διαδικασία διευκολύνεται με την χρήση των τιμών backscatter σε ντεσιμπέλ (dB). Η αποθήκευση της νέας ζώνης πραγματοποιείται με δεξί κλικ και την επιλογή «Convert Band».



Εικόνα 53: «Οπτικοποιηση του νέου προϊόντος, μετά την μετατροπή σε λογαριθμική κλίμακα».

Καθορισμός κατωφλίου (Thresholding)

Για τη διάκριση των πλημμυρισμένων και μη περιοχών, εφαρμόζεται η τεχνική της κατωφλίωσης (Thresholding) του ιστογράμματος της ψηφιακής εικόνας. Ο στόχος αυτής της

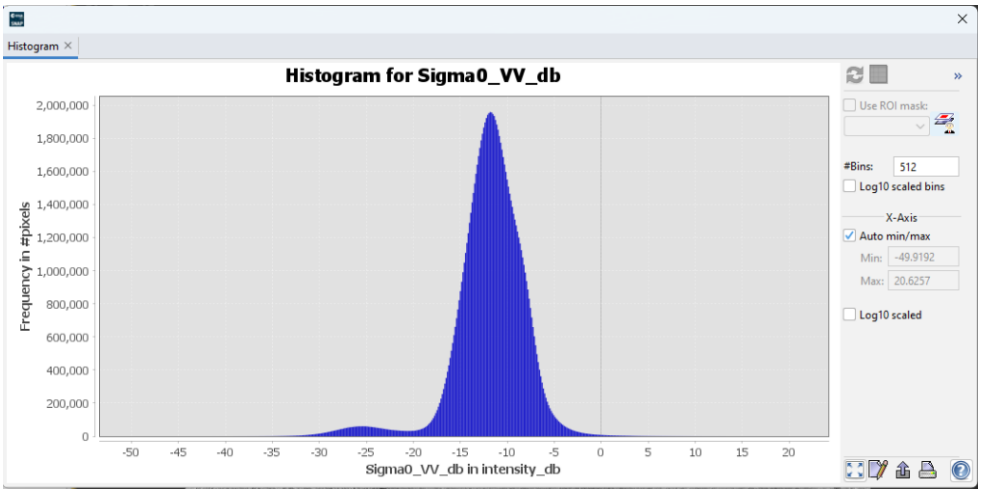
τεχνικής είναι να οριστεί ένα όριο, κάτω από το οποίο τα εικονοστοιχείων να ανήκουν σε πλημμυρισμένες περιοχές, ενώ εκείνα με υψηλότερες τιμές να αντιστοιχούν σε μη πλημμυρισμένες περιοχές.

Το βέλτιστο όριο καθορίζεται μέσω της ανάλυσης του ιστογράμματος της εικόνας, το οποίο, ιδανικά εμφανίζει δυο διακριτές κορυφές: μία που αντιστοιχεί στις χαμηλές τιμές οπισθοσκέδασης των πλημμυρισμένων περιοχών και μια για τις υπόλοιπες επιφάνειες.

Για τη δημιουργία του ιστογράμματος, ορίζεται η ζώνη (Sigma0_VV), και στην συνέχεια ακολουθείται η διαδρομή:

Analysis -> Histogram

Στο αναδυόμενο παράθυρο επιλέγεται «Ανανέωση προβολής», πρώτου απενεργοποιηθεί η επιλογή «Log 10 scaled bins», καθώς τα δεδομένα βρίσκονται ήδη σε ντεσιμπέλ (dB).



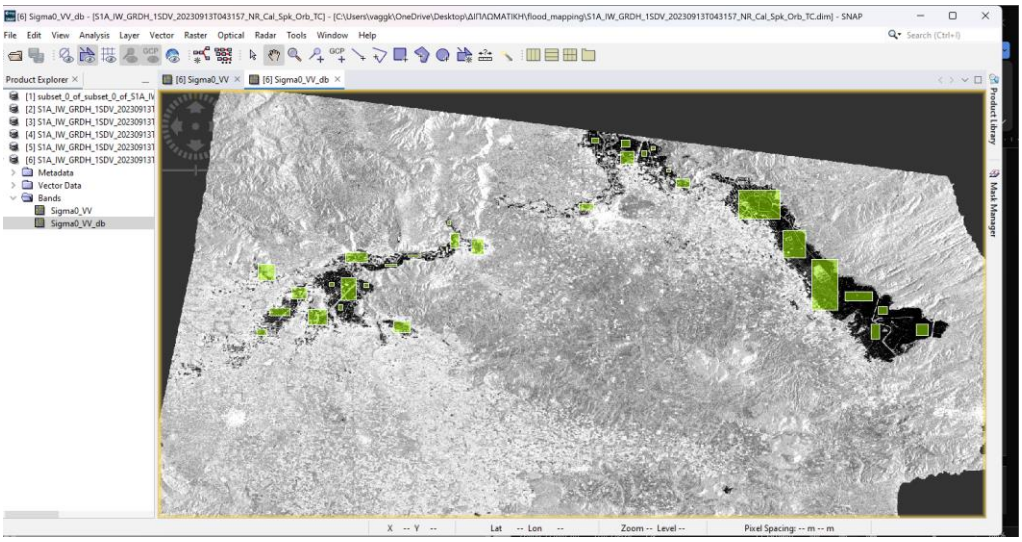
Εικόνα 54: «Ιστόγραμμα της ζώνης Sigma0_VV_db».

Στην περίπτωση μας, η κατανομή των τιμών δεν εμφανίζει ξεκάθαρη μορφή με δύο διακριτές κορυφές, καθώς η εικόνα περιλαμβάνει εκτεταμένες μη πλημμυρισμένες περιοχές, οι οποίες δυσχεραίνουν τον εντοπισμό ενός σαφούς ορίου μεταξύ πλημμυρισμένων και μη πλημμυρισμένων περιοχών. Για να κατανοηθεί καλύτερα η κατανομή των τιμών στις πλημμυρισμένες περιοχές, δίνετε έμφαση στις σκοτεινές περιοχές της εικόνας.

Το SNAP επιτρέπει τη δημιουργία γεωχωρικών διανυσματικών δεδομένων, όπως ορθογώνια και πολύγωνα, διευκολύνοντας την επιλογή συγκεκριμένων περιοχών ενδιαφέροντος. Η διαδικασία ξεκινά με την δημιουργία ενός Vector Data Container, όπου αποθηκεύονται τα διανυσματικά δεδομένα. Στη συνέχεια, επιλέγεται το προϊόν με διορθωμένα δεδομένα εδάφους και ακολουθεί η διαδρομή:

Vector -> New Vector Data Container

Στο αναδυόμενο παράθυρο εισάγεται το όνομα των διανυσματικών δεδομένων, για παράδειγμα «Πλημμυρισμένες_ζώνες», και επιβεβαιώνεται η επιλογή. Στη συνέχεια, μέσω του Εργαλείου σχεδίασης ορθογωνίου, πραγματοποιείται μεγέθυνση στη ζώνη Sigma0_VV και σχεδιάζονται ορθογώνια στις σκοτεινές περιοχές που αντιστοιχούν στις πλημμυρισμένες ζώνες.

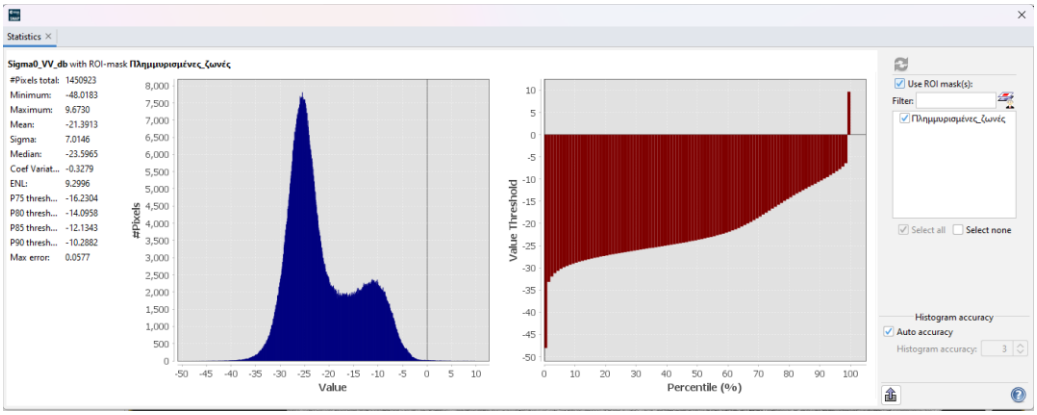


Εικόνα 55: «Σχεδίαση ορθογωνίων στις σκοτεινές περιοχές που αντιστοιχούν στις πλημμυρισμένες ζώνες».

Τα διανυσματικά δεδομένα περιλαμβάνουν πλέον τα επιλεγμένα ορθογώνια, επιτρέποντας τη στατιστική ανάλυση της κατανομής των τιμών των εικονοστοιχείων. Για την απεικόνιση του ιστογράμματος και των στατιστικών δεδομένων, ακολουθείται η διαδρομή:

Analysis -> Statistics

Στο αναδυόμενο παράθυρο επιλέγονται οι παράμετροι «Use ROI mask» και «Πλημμυρισμένες_ζώνες», ενώ με την επιλογή «Ανανέωσης προβολής», προβάλλονται τα στατιστικά στοιχεία και η κατανομή των τιμών στην περιοχή ενδιαφέροντος.



Εικόνα 56: «Στατιστικά στοιχεία εικονοστοιχείων στην περιοχή ενδιαφέροντος».

Πλέον η κατανομή των τιμών εμφανίζεται με δύο διακριτές κορυφές, με την αριστερή κορυφή να εντοπίζεται στα -25,5dB και μια απότομη πτώση στα -16dB. Η τιμή -16 μπορεί να οριστεί ως κατώφλι για τη δημιουργία δυαδικών εικόνων που θα διαχωρίζουν τις πλημμυρισμένες περιοχές.

Για τη διαδικασία αυτή, ακολουθείται η διαδρομή:

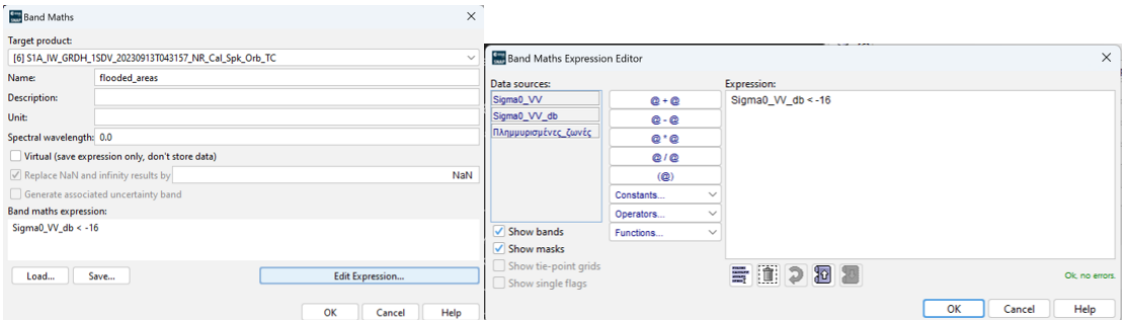
Raster -> Band Maths

Στο αναδυόμενο παράθυρο επιλέγεται το προϊόν διορθωμένου εδάφους, ορίζεται η ονομασία της νέας ζώνης (στην περίπτωση μας «flooded_areas») και απενεργοποιείται η επιλογή «Virtual», ώστε η δυαδική εικόνα να αποθηκευτεί στο σύστημα αρχείων.

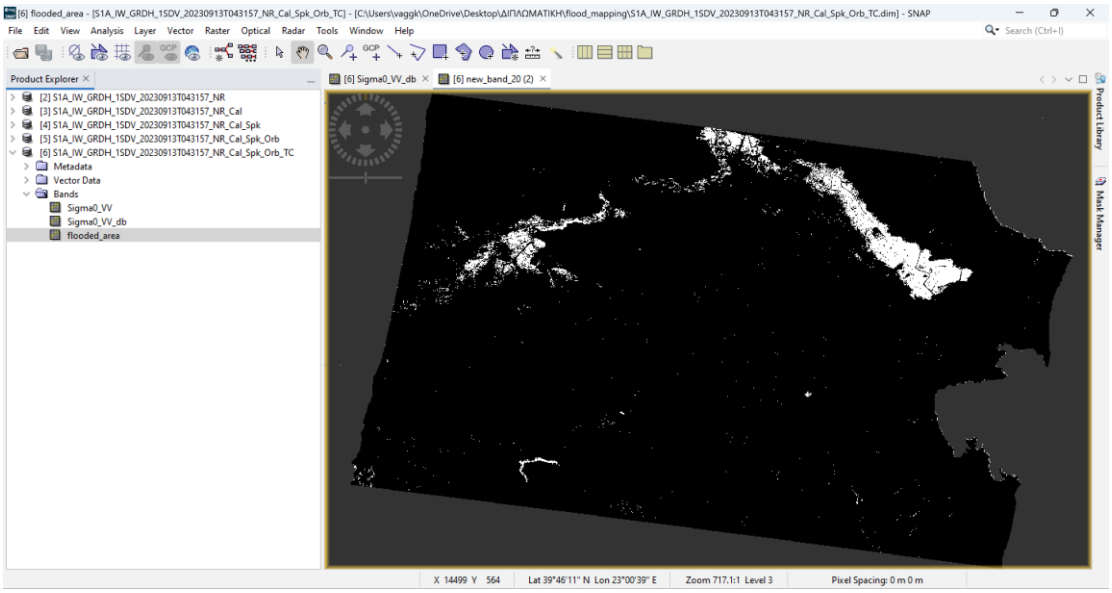
Τέλος εισάγεται η αντίστοιχη μαθηματική έκφραση:

Sigma0_VV_db < -16

Ώστε να διαχωριστούν τα εικονοστοιχείων που αντιστοιχούν σε πλημμυρισμένες περιοχές.



Εικόνα 57: «Εφαρμογή Band Maths για τον εντοπισμό των πλημμυρισμένων περιοχών με κατώφλι -16 dB».



Εικόνα 58: «Οπτικοποίηση της δυαδικής εικόνας πλημμυρισμένων περιοχών μετά την εφαρμογή του κατωφλίου -16db ».

Διαχωρισμός πλημμυρισμένων περιοχών από τα μόνιμα υδάτινα σώματα.

Σε αυτό το στάδιο, απαιτείται η επανάληψή της διαδικασίας προ-επεξεργασίας εικόνας για μια δεύτερη δορυφορική εικόνα της περιοχής, τραβηγμένη πριν από τις πλημμύρες (27/07/2023). Η σύγκριση των δύο εικόνων επιτρέπει την ακριβή ανίχνευση των πλημμυρισμένων εκτάσεων.

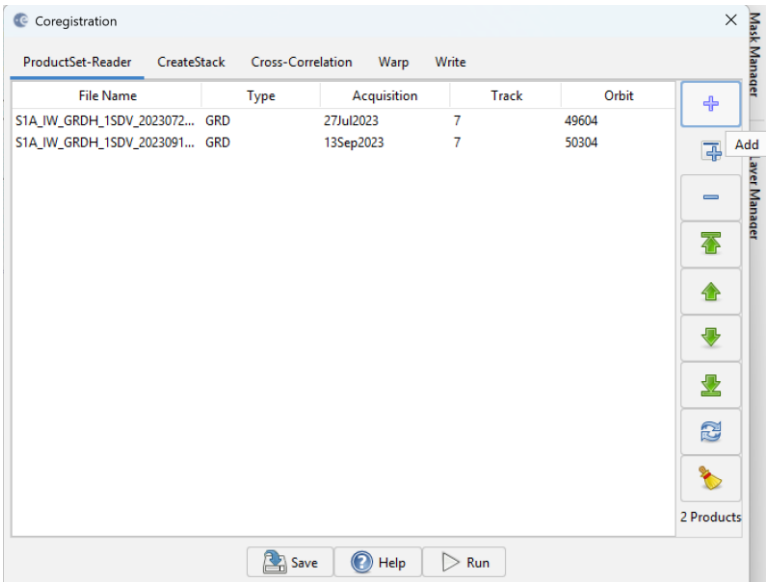
Καθώς η δεύτερη εικόνα έχει υποστεί την ίδια προ-επεξεργασία, υπάρχουν πλέον δύο δυαδικές εικόνες που έχουν ληφθεί με τον δορυφόρο στην ίδια γεωμετρική διαμόρφωση, τροχιά και γωνία πρόσπτωσης. Έτσι, κάθε εικονοστοιχείο και στις δύο εικόνες αντιστοιχεί στο ίδιο γεωγραφικό σημείο. Για να διαχωριστούν οι πλημμυρισμένες περιοχές, πραγματοποιείται αφαίρεση των δύο εικόνων.

Για την διευκόλυνση αυτής της διαδικασίας, δημιουργείται η ένωση των δυο εικόνων σε ένα αρχείο.. Το αρχείο αυτό επιτρέπει την επεξεργασία και τον οπτικό διαχωρισμό των πλημμυρισμένων περιοχών.

Για την διαδικασία αυτή επιλέγεται

Radar -> Coregistration -> Stack Tools -> Create Stack

Στο αναδυόμενο πίνακα που εμφανίζεται, προστίθενται τα δύο προϊόντα πατώντας το κουμπί «Add».



Εικόνα 59: «Εισαγωγή των δύο δυαδικών εικόνων στο αναδυόμενο παράθυρο Coregistration».

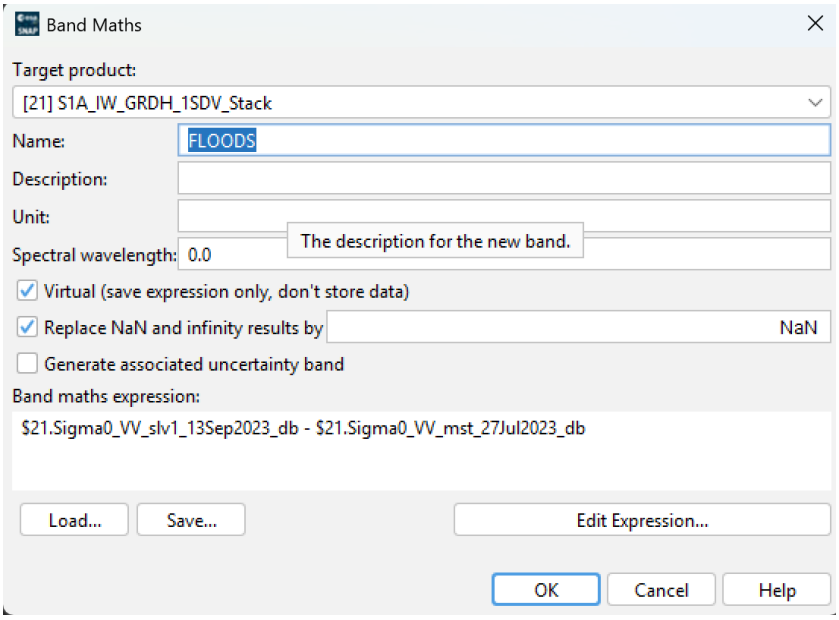
Αφού επιβεβαιωθεί ότι οι δύο εικόνες έχουν την ίδια χωρική αναφορά, πραγματοποιείται εκτέλεση «Run», για την δημιουργία του αρχείου το οποίο παίρνει την κατάληξη «_Stack».

Στην διαδικασία διαχωρισμού των πλημμυρισμένων περιοχών, επιλέγεται από το μενού:

Raster -> Band Maths

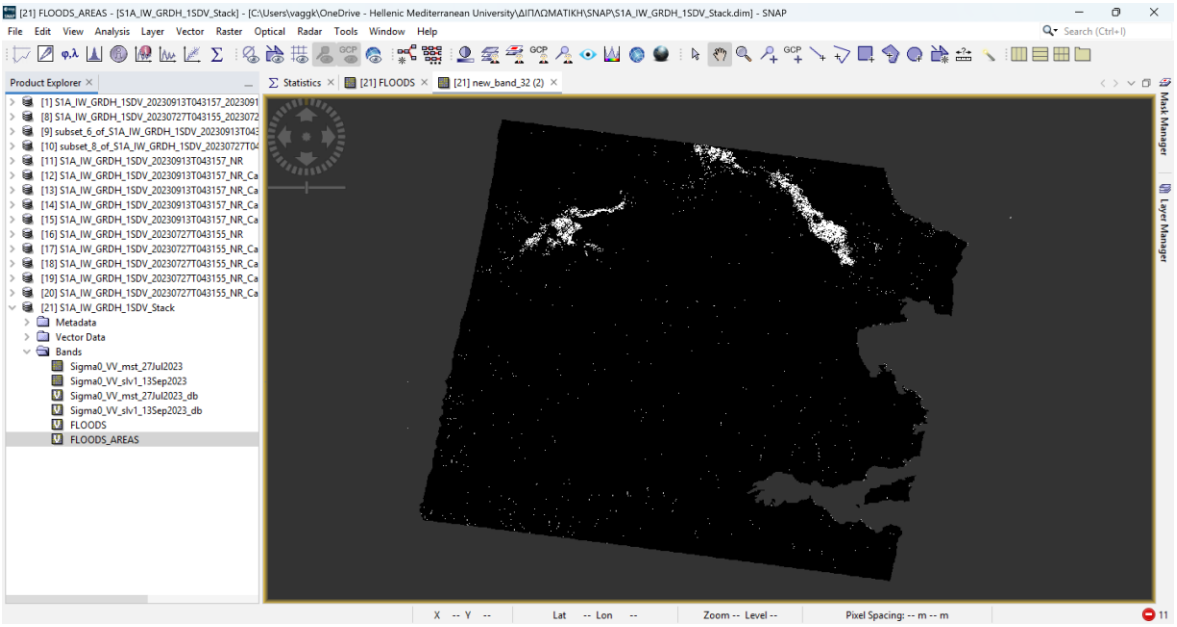
Στο αναδυόμενο παράθυρο επιλέγεται το προϊόν κρίσης (στην περίπτωση μας: S1A_IW_GRDH_1SDV_Stack). Εν συνεχεία, ορίζεται το όνομα της νέα ζώνης (π.χ. FLOODS), και εισάγεται στο «Edit Expression…» την μαθηματική έκφραση:

($21.Sigma0_VV_slv1_13Sep2023_db - $21.Sigma0_VV_mst_27Jul2023_db).



Εικόνα 60: «Εισαγωγή κατάλληλων παραμέτρων για τον διαχωρισμό των πλημμυρισμένων περιοχών από τα μόνιμα υδάτινα σώματα».

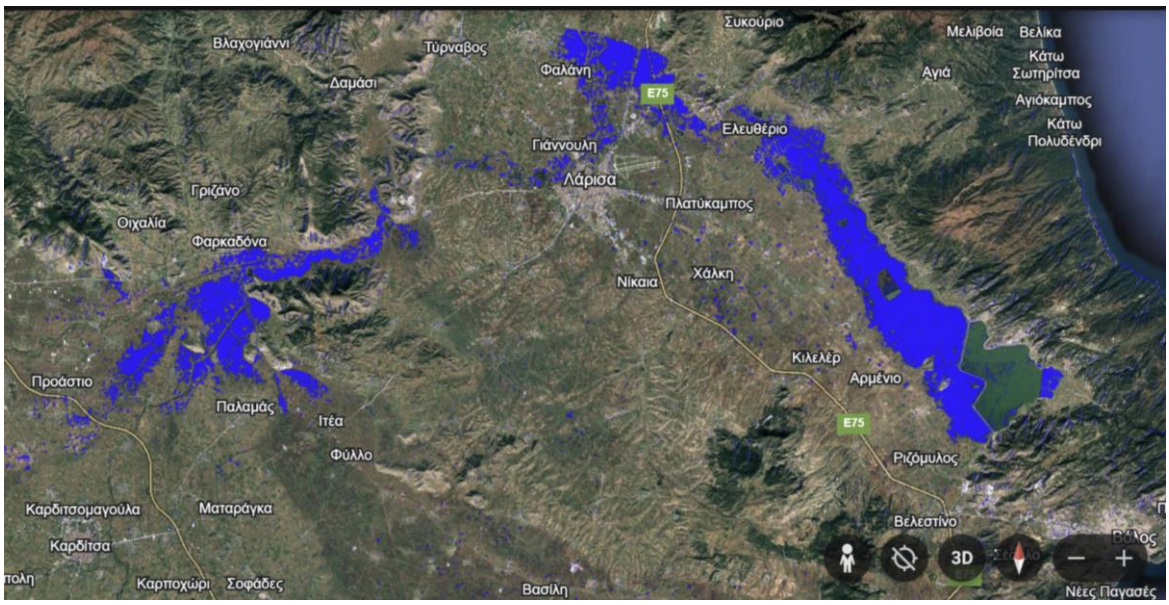
Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας, εξάγεται η τελική εικόνα που περιέχει μόνο τις Πλημμυρισμένες περιοχές, χωρισμένες από τα μόνιμα υδάτινα σώματα.



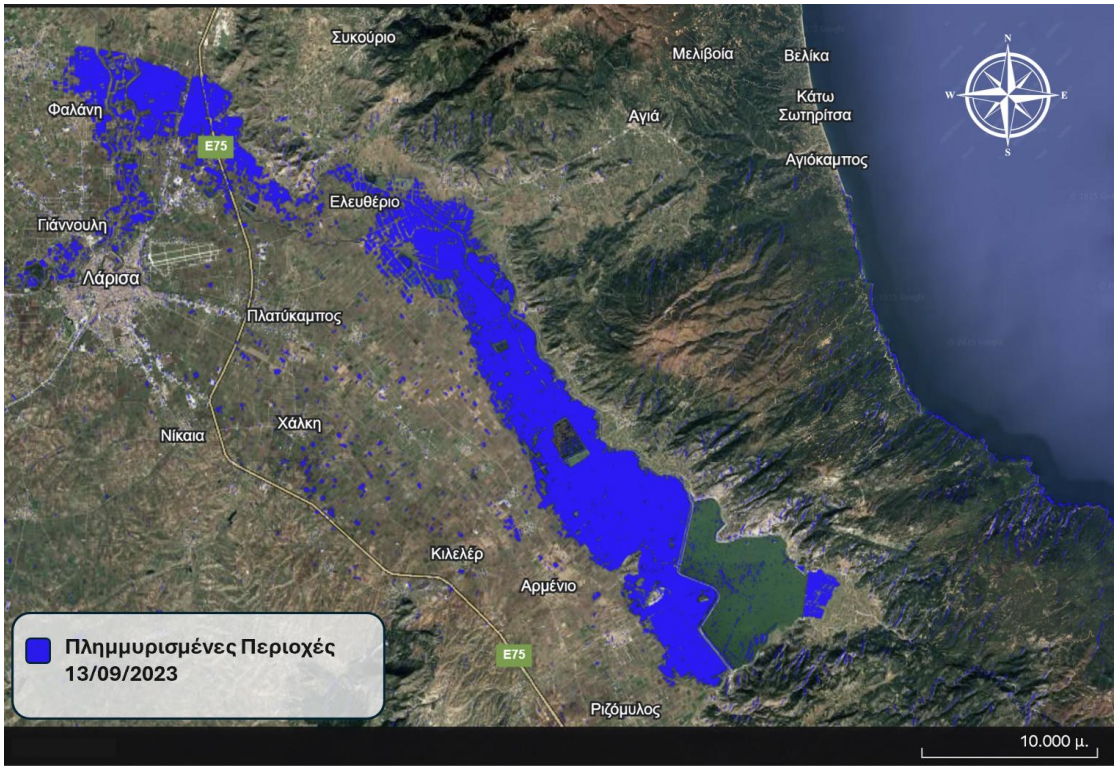
Εικόνα 61: «Οπτικοποίηση τελικού προϊόντος πλημμυρισμένων περιοχών από τα μόνιμα υδάτινα σώματα».

6.1 Οπτικοποίηση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Για να γίνει πιο ευδιάκριτο το αποτέλεσμα και το μέγεθος της καταστροφής υπάρχει η δυνατότητα να προβληθεί η δυαδική εικόνα «floods_areas» στο Google Earth. Αρχικά, πρέπει να αφαιρεθεί το μαύρο φόντο της τελικής εικόνας χρησιμοποιώντας το εργαλείο «Colour Manipulation» και επιλέγοντας «none» στο πίνακα επεξεργασίας. Στην συνέχεια, εξάγεται η δυαδική εικόνα πραγματοποιώντας δεξί κλικ πάνω της και επιλέγοντας (Export View as Google Earth KMZ). Μόλις το αρχείο αποθηκευτεί υπάρχει η δυνατότητα να προστεθεί στο Google Earth ως “Layer” για την τελική οπτικοποίηση.



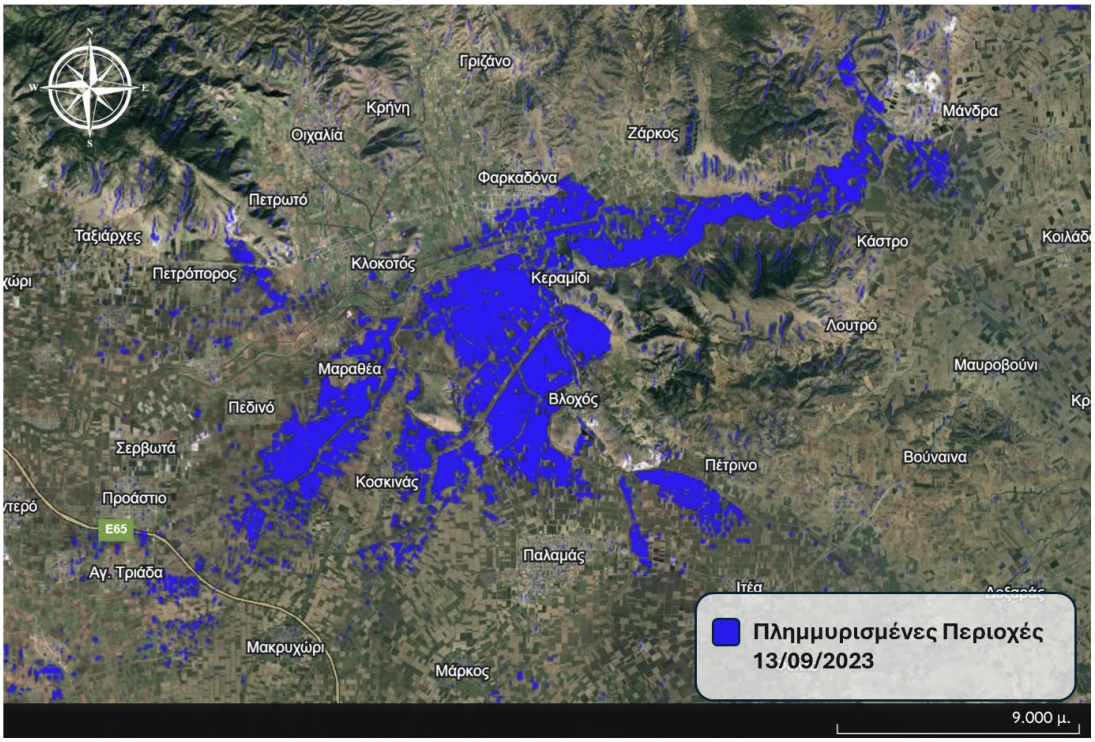
Εικόνα 62: «Τελική οπτικοποίηση των πλημμυρισμένων περιοχών στη Θεσσαλία μέσω Google Earth».



Εικόνα 63: «Πλημμυρισμένες περιοχές στον κάμπο της Λάρισας, με έντονα επηρεασμένες τις περιοχές Φαλάνη, Ελευθέριο, Πλατύκαμπο, Κιλελέρ και Αρμένιο».

Στην «**Εικόνα 63**» παρατηρούνται εκτεταμένες πλημμυρικές ζώνες, η οποίες αποτυπώνονται με μπλε χρώμα, και εκτείνονται από την Λάρισα μέχρι τις αγροτικές περιοχές ανατολικά της. Πιο συγκεκριμένα, ο ποταμός Πηνειός φαίνεται να έχει υπερχειλίσει, προκαλώντας μεγάλες πλημμύρες ανατολικά της Λάρισας. Ο αυτοκινητόδρομος Ε75, που διασχίζει την περιοχή, φαίνεται να επηρεάζεται εξίσου σε συγκεκριμένα σημεία. Επίσης οι αγροτικές εκτάσεις που

αποτελούν ζωτικό μέρος της τοπικής οικονομίας φαίνεται να έχουν υποστεί εκτεταμένες καταστροφές.



Εικόνα 64: «Πλημμυρισμένες εκτάσεις στις περιοχές Φρακαδόνα, Παλαμά και των γύρω αγροτικών περιοχών».

Στην «Εικόνα 64» παρατηρείται η πλημμυρική κατάσταση δυτικότερα, Οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις γύρω από τον Παλαμά και την Φαρκαδόνα έχουν πλημμυρίσει σε μεγάλο βαθμό. Οι υδάτινες μάζες εκτείνονται μέχρι τα όρια της Καρδίτσας, κάτι που υποδηλώνει την ένταση του φαινομένου. Η πλημμύρα φαίνεται να προέρχεται από τους παραποτάμους του Πηνειού, οι οποίοι δεν μπόρεσαν να αποστραγγίσουν επαρκώς τα υδάτινα φορτία. Οι ορεινές περιοχές στα βόρεια (Οιχαλία, Κρήνη, Γριζάνο) φαίνεται να έχουν υποστεί περιορισμένη επίδραση από την πλημμύρα, υποδηλώνοντας ότι πρόκειται κυρίως για φαινόμενο που προέρχεται από πεδινές υπερχειλίσεις.

6.2 Διαδικασία Δημιουργίας RGB Εικόνων στο LEOWorks

Οι δορυφορικές εικόνες του Sentinel-2 καταγράφουν δεδομένα σε πολλαπλά φασματικά κανάλια (bands), τα οποία μπορούν να συνδυαστούν για τη δημιουργία σύνθετων ψευδέγχρωμων εικόνων (RGB composite). Αυτές οι εικόνες βοηθούν στην οπτική ανάλυση του τοπίου και τη χαρτογράφηση φαινομένων, ανάλογα με την επιλογή των φασματικών ζωνών.

Τα RGB (Red-Green-Blue) σύνθετα είναι εικόνες που δημιουργούνται από τη συνδυασμένη απεικόνιση τριών διαφορετικών φασματικών καναλιών, κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχίζεται σε ένα από τα βασικά χρώματα της Τηλεπισκόπησης (κόκκινο, πράσινο, μπλε). Η επιλογή των καναλιών

(Bands), καθορίζει το είδος της απεικόνισης, επιτρέποντας είτε φυσική απεικόνιση του τοπίου είτε τη δημιουργία ψευδοχρωματικών συνθέσεων, που ενισχύουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της εικόνας, όπως η βλάστηση ή η υγρασία του εδάφους.

Για την δημιουργία RGB εικόνων στο LEOWorks, ακολουθείται μια απλή διαδικασία που περιλαμβάνει τη φόρτωση των επιμέρους καναλιών (Bands) της δορυφορικής εικόνας και τον συνδυασμό τους σε μια σύνθετη απεικόνιση.

Τα βήματα είναι τα εξής:

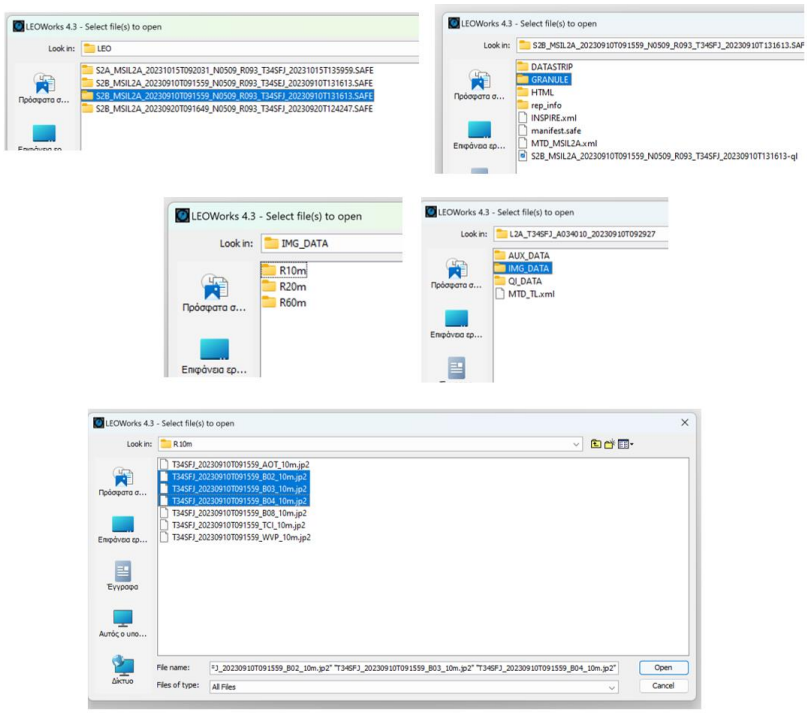
Άνοιγμα δεδομένων στο LEOWorks:

- Από το μενού επιλέγεται: File -> Open ->Multiple Files

  (για την εισαγωγή πολλαπλών αρχείων εικόνας).

Επιλογή των κατάλληλων αρχείων εικόνας:

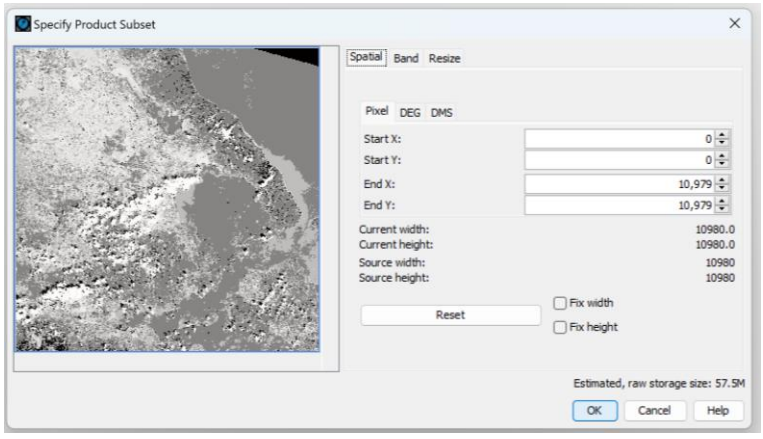
- Στους φακέλους των δεδομένων Sentinel-2, εντοπίζεται ο φάκελος (IMG_DATA), όπου περιέχονται οι μπάντες (Bands) των εικόνων με διαφορετικές χωρικές αναλύσεις (10m, 20m, 60m).
- Στην παρούσα ανάλυση, επιλέχθηκε η χωρική ανάλυση των 10m καθώς παρέχει μεγαλύτερη λεπτομέρεια, η οποία είναι σημαντική για την ανάλυση της πλημμυρισμένης περιοχής.
- Στην συνέχεια, πραγματοποιείται η επιλογή των κατάλληλων φασματικών καναλιών (Bands) για τη σύνθεση της RGB εικόνας.



Εικόνα 65: «Διαδικασία επιλογής και εισαγωγής των κατάλληλων «Bands» δορυφορικής εικόνας».

Ορισμός περιοχής ενδιαφέροντος:

- Με την προσθήκη κάθε μπάντας ξεχωριστά εμφανίζεται το παράθυρο (Specify Product Subset), όπου ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει ένα συγκεκριμένο τμήμα της εικόνας (Spatial) ή να προσαρμόσει το μέγεθός της, με βάση την περιοχή ενδιαφέροντος.



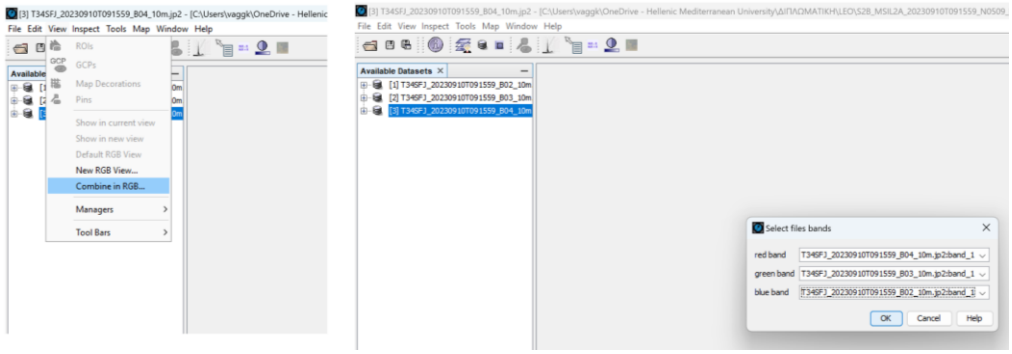
Εικόνα 66: «Παράθυρο (Specify Product Subset) για τον ορισμό της περιοχής ενδιαφέροντος».

Δημιουργία RGB εικόνων:

- Μετά την προσθήκη των απαραίτητων μπαντών, ακολουθεί η διαδικασία δημιουργίας της RGB εικόνας μέσω της διαδρομής:

  Μενού -> View -> Combine RGB… .

- Στο παράθυρο (Select Files Bands) που εμφανίζεται, πραγματοποιείται η επιλογή της κατάλληλης μπάντας για κάθε χρωματικό κανάλι (κόκκινο, πράσινο, μπλε), ανάλογα με τον τύπο της σύνθετης εικόνας (π.χ. True Color ή False Color).



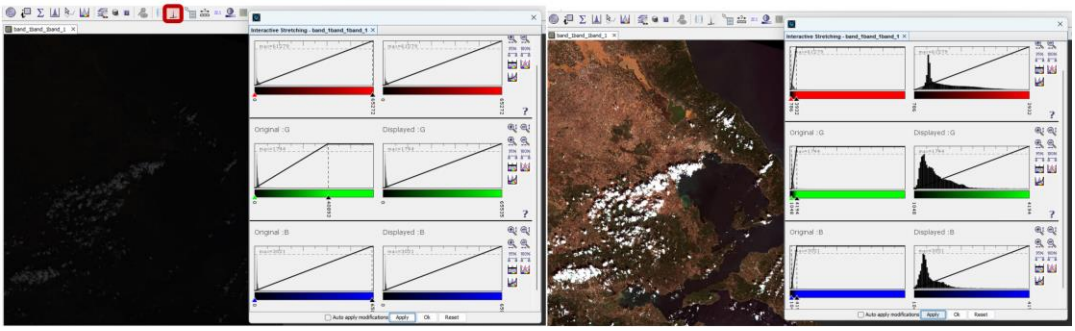
Εικόνα 67: «Διαδικασία δημιουργίας RGB εικόνας (true color)».

Προσαρμογή αντίθεσης και φωτεινότητας:

- Αρχικά, η RGB εικόνα ενδέχεται να εμφανίζεται σκοτεινή και δυσανάγνωστη.
- Για την βελτίωση της οπτικοποίησής της, γίνεται βελτίωση της αντίθεσης και της φωτεινότητας της, μέσω της διαδρομής:

  Μενού -> Interactive Stretching.

  όπου προσαρμόζεται το ιστόγραμμα κάθε μπάντας ξεχωριστά, χρησιμοποιώντας τους διαθέσιμους δείκτες (cursors).



Εικόνα 68: «Διαδικασία ρύθμισης ιστογραμμάτων για την βέλτιστη απεικόνιση του RGB».

6.2.1 Διαδικασία Υπολογισμού του NDVI στο LEOWorks

Ο Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) αποτελεί ένας από τους πιο γνωστούς δείκτες της Τηλεπισκόπησης για την ανάλυση της υγείας και της πυκνότητας της βλάστησης. Ο NDVI υπολογίζεται με βάση τη διαφορά της ανακλαστικότητας μεταξύ του Εγγύς Υπέρυθρου (Near Infrared-NIR) και του κόκκινου (Red) φασματικού καναλιού, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\mathrm{NDVI} = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Όπου:

- NIR (Near Infrared): Η ανακλαστικότητα της επιφάνειας στη ζώνη του εγγύς υπέρυθρου (Band 8 του Sentinel-2).
- RED: Η ανακλαστικότητα στη ζώνη του κόκκινου φωτός (Band 4 του Sentinel-2).
- Ο δείκτης NDVI δυνητικά παίρνει τιμές από -1 έως +1, όπου υψηλές τιμές (0.6-1.0) υποδεικνύουν υγιή βλάστηση, ενώ αρνητικές τιμές ή κοντά στο 0 αντιστοιχούν σε γυμνά εδάφη, νερό ή κατεστραμμένη βλάστηση.

Ο NDVI χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση των επιπτώσεων των φυσικών καταστροφών, όπως οι πλημμύρες, μέσω της σύγκρισης δορυφορικών εικόνων πριν και μετά το φαινόμενο. Οι περιοχές που καλύπτονται από νερό εμφανίζουν χαμηλές ή αρνητικές τιμές NDVI, καθώς το νερό έχει χαμηλή ανακλαστικότητα στο υπέρυθρο φάσμα. Μέσω αυτής της ανάλυσης, μπορεί να προσδιοριστεί η έκταση της πλημμύρας και να αξιολογηθεί η απώλεια βλάστησης λόγω της καταστροφής. Για τον υπολογισμό του NDVI μέσω του λογισμικού LEOWorks, ακολουθούνται τα εξής βήματα :

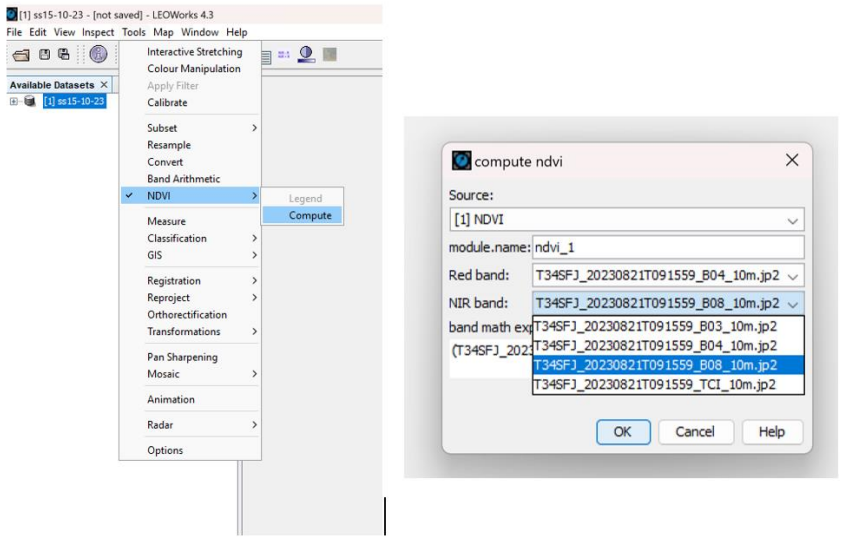
Επιλογή εργαλείου NDVI :

- Από τη γραμμή μενού, επιλέγεται: Tools -> NDVI -> Compute

Ορισμός μπαντών για τον υπολογισμό NDVI και εκτέλεση υπολογισμού:

- Στο παράθυρο «Compute NDVI» που εμφανίζεται, ορίζεται:
  - Ως Red Band το **Band 4** (Red).
  - Ως NIR Band το **Band 8** (NIR).

Με την επιλογή OK, το λογισμικό δημιουργεί το NDVI χάρτη της περιοχής.



Εικόνα 69: «Διαδικασία υπολογισμού NDVI στο λογισμικό LEO».

6.2.1 Οπτικοποίηση και Ερμηνεία των Εικόνων

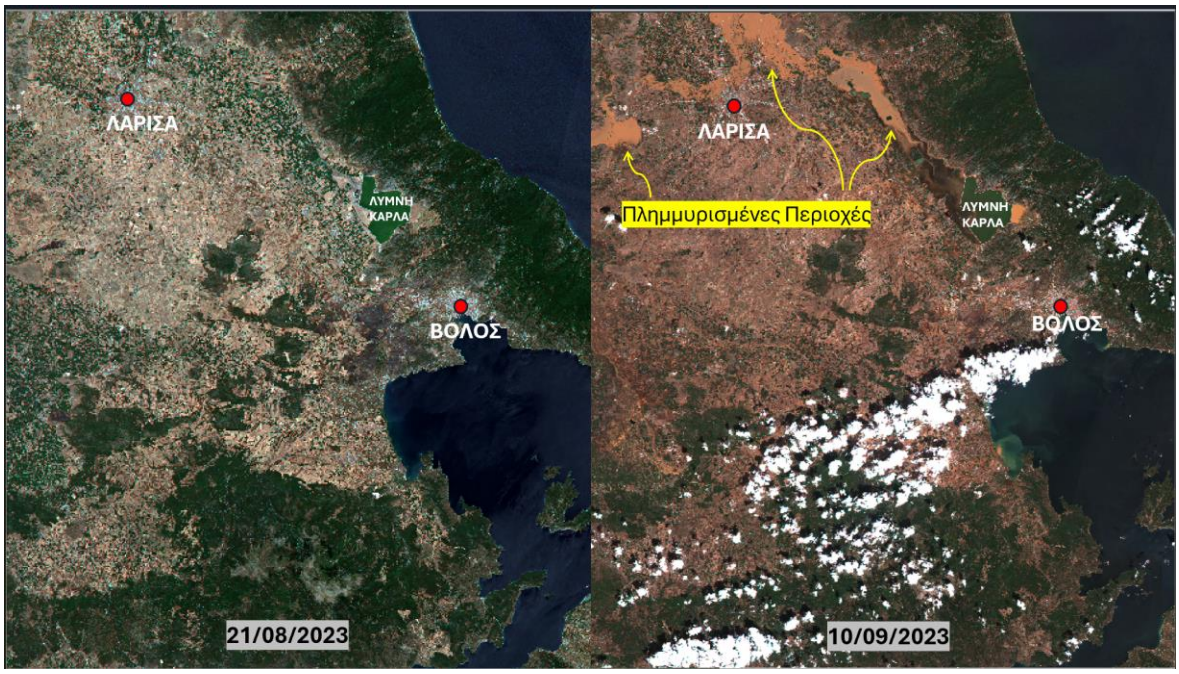
Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας δημιουργίας RGB εικόνων και του υπολογισμού του δείκτη NDVI μέσω του λογισμικού LEOWorks, ακολουθεί η αποτύπωση του μεγέθους της καταστροφής με βάση τα παραγόμενα δεδομένα. Η ανάλυση βασίζεται στη σύγκριση των δορυφορικών εικόνων της περιοχής πριν και μετά την πλημμύρα, αξιοποιώντας τρία διαφορετικά σύνθετα RGB, καθένα από τα οποία παρέχει ξεχωριστές πληροφορίες σχετικά με τις αλλαγές στο τοπίο και τη χρήση Γης. Στον «Πίνακας 6» αναγράφονται τα RGB σύνθετα που δημιουργήθηκαν.

Πίνακας 6: «Σύνθετα RGB και Ερμηνεία τους»

Σύνθετο RGB	Κανάλια (Bands)	Ερμηνεία
Φυσικό έγχρωμο (True Color Composite)	4 (Red), 3 (Green), 2 (Blue)	Απεικονίζει την περιοχή όπως την αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο μάτι. Επιτρέπει τη σαφή αναγνώριση του τοπίου και των αλλαγών σε αυτό. Χρησιμοποιείται για οπτική αξιολόγηση των φυσικών καταστροφών.
Ψευδοχρωματικό σύνθετο (False Color Composite)	8 (Near Infrared - NIR), 4 (red), 3 (Green)	Το εγγύς υπέρυθρο (NIR) ενισχύει τη διαφοροποίηση της βλάστησης. Τα υγιή φυτά εμφανίζονται με έντονο κόκκινο, ενώ οι πλημμυρισμένες περιοχές ξεχωρίζουν λόγω της χαμηλής ανακλαστικότητα στο υπέρυθρο. Χρήσιμο για την

		ανάλυση επιπτώσεων στην φυτοκάλυψη της περιοχής.
Ψευδοχρωματικό σύνθετο (False Color Composite)	12&11 (Short-Wave Infrared - SWIR), 4 (Red)	Αξιοποιεί το βραχέων κυμάτων υπέρυθρο (SWIR) για την ανίχνευση υγρασίας στο έδαφος και των πλημμυρισμένων περιοχών. Το κανάλι 12 είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στην παρουσία νερού, επιτρέποντας την ακριβέστερη χαρτογράφηση των πλημμυρισμένων περιοχών.

Ανάλυση σύνθετων RGB:

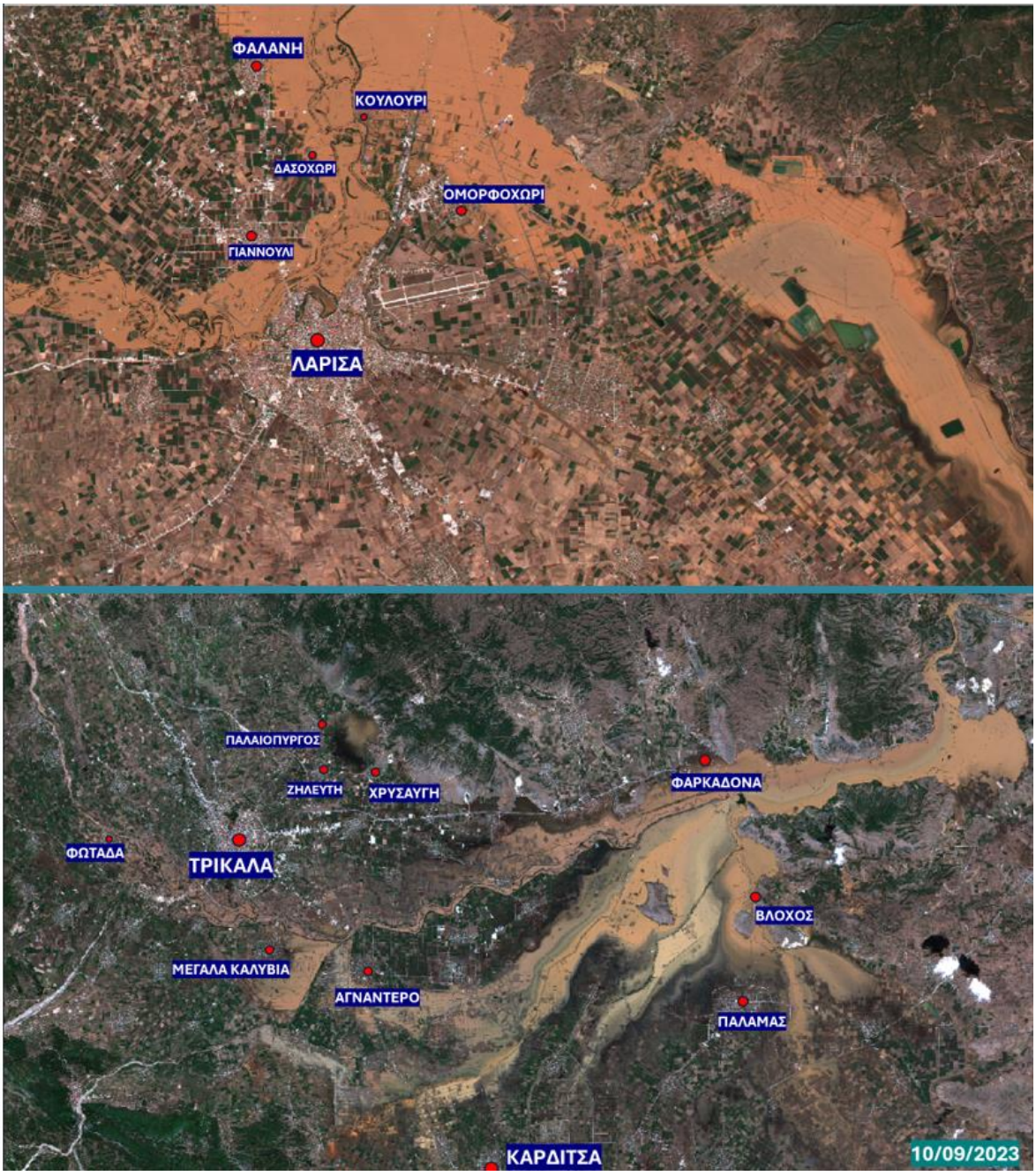


Εικόνα 70: «Συγκριτική δορυφορική απεικόνιση της Θεσσαλίας πριν και μετά την κακοκαιρία Daniel (Σύνθετο RGB (4,3,2))».

Στην «**Εικόνα 70**» παρουσιάζονται δυο χρονικά διακριτές δορυφορικές απεικονίσεις της Θεσσαλίας:

- **Απεικόνιση Προ-Καταστροφής – Αριστερή Εικόνα (21/08/2023):** Η περιοχή παρουσιάζει τη φυσική της κατάσταση, με τον Πηνειό ποταμό να μη διακρίνεται εύκολα λόγω της φυσιολογικής του ροής και τη λίμνη Κάρλα να εμφανίζει περιορισμένη έκταση. Η βλάστηση και το έδαφος εμφανίζονται με σκούρο πράσινο και καφετί χρώμα, αντίστοιχα, υποδηλώνοντας τη φυσιολογική υδρολογική κατάσταση της περιοχής.

- **Απεικόνιση Μετά-Καταστροφής – Δεξιά Εικόνα (10/09/2023):** Καταγράφεται η δραματική αύξηση των υδάτινων επιφανειών, με κυρίαρχο το καφέ/πορτοκαλί χρώμα που υποδηλώνει την παρουσία νερού και ιζημάτων. Εμφανής είναι η υπερχείλιση του Πηνειού ποταμού, με τα νερά να κατακλύζουν μεγάλες εκτάσεις εκατέρωθεν της κοίτης του. Η λίμνη Κάρλα έχει επεκταθεί σημαντικά, καταλαμβάνοντας περιοχές που προηγούμενος ήταν στεριά.



Εικόνα 71: «Έκταση πλημμυρισμένων περιοχών (Σύνθετο RGB (4,3,2))».

Η δορυφορική εικόνα που καταγράφηκε στις 10/09/2023 (βλ. **Εικόνα 71**), αποκαλύπτει την κλίμακα της καταστροφής. Η περιοχή γύρο από την Λάρισα, όπως και οι γειτονικοί νομοί Καρδίτσας και

Τρικάλων, έχουν μετατραπεί σε μια τεράστια λίμνη, με το καφέ/πορτοκαλί χρώμα να υποδηλώνει την παρουσία νερού και λάσπης.

- **Νομός Λάρισας**: Οικισμοί όπως η Φαλάνη, το Κουλούρι, το Δασοχώρι, το Ομορφοχώρι και η Γιαννούλη επηρεάστηκαν σημαντικά.
- **Νομός Καρδίτσας:** Η κωμόπολη του Παλαμά, καθώς και οι οικισμοί Βλοχός, Αγνάντερο και Μεγάλα Καλύβια επλήγησαν σοβαρά, με εκτεταμένες καταστροφές.
- **Νομός Τρικάλων:** Περιοχές όπως η Φαρκαδόνα, η Φωτάδα, ο Παλαιόπυργος η Ζηλευτή και η Χρυσαυγή αντιμετώπισαν εκτεταμένες πλημμύρες.

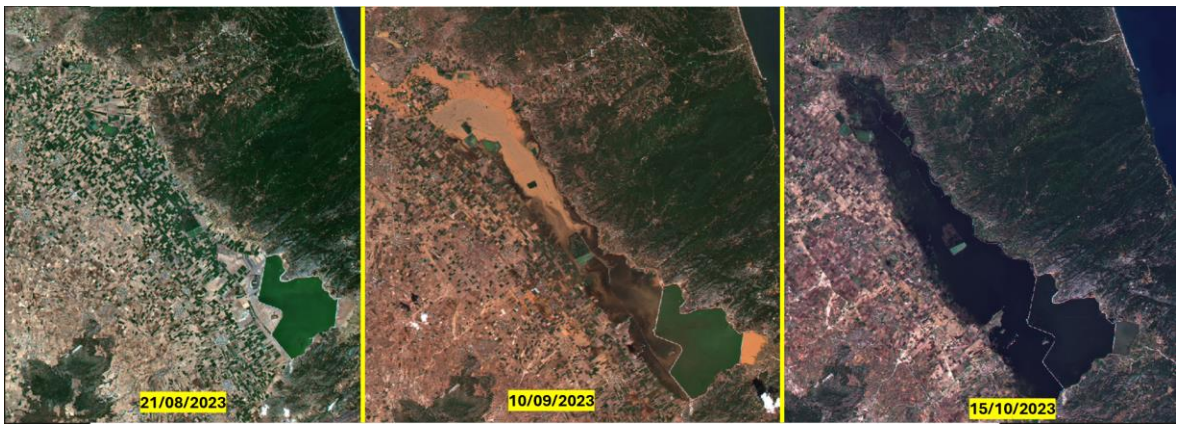


Εικόνα 72: MSI «Δορυφορική απεικόνιση Θεσσαλίας (15/10/2023) με εστίαση στη λίμνη Κάρλα (Σύνθετο RGB (4,3,2))».

Ένα μήνα μετά την καταστροφή (βλ. **Εικόνα 72**), παρατηρείται ότι έχει ξεκινήσει η αποκατάσταση της περιοχής. Η βλάστηση επανεμφανίζεται, υποδεικνύοντας την ανάκαμψη του οικοσυστήματος. Ωστόσο, η λίμνη Κάρλα παραμένει σημαντικά διευρυμένη, λόγω του τεράστιου όγκου νερού που δέχτηκε.

Στην «**Εικόνα 73**» απεικονίζεται ξεκάθαρα η χρονική εξέλιξη της λίμνης Κάρλα, μέσω των τριών δορυφορικών απεικονίσεων:

- προ-πλημμύρας (**21/08/2023**)
- κατά τη διάρκεια της πλημμύρας (**10/09/2023**)
- μετά την πλημμύρα (**15/09/2023**)

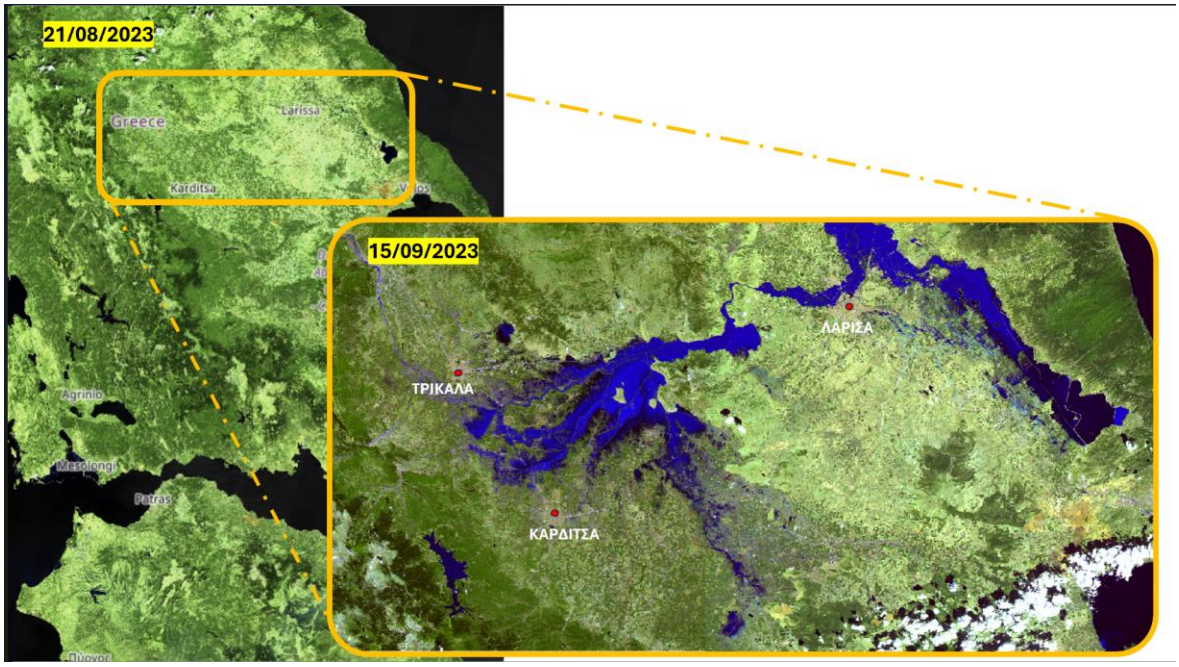


Εικόνα 73: «Συγκριτική δορυφορική απεικόνιση της λίμνης Κάρλας πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τις πλημμύρες (21/08/2023, 10/09/2023, 15/10/2023),(Σύνθετο RGB (4,3,2))».

Προ-πλημμύρας (21/08/2023): Η λίμνη εμφανίζεται με τη φυσιολογική της έκταση και τα περιβάλλοντα αγροτικά εδάφη δεν έχουν πλημμυρίσει

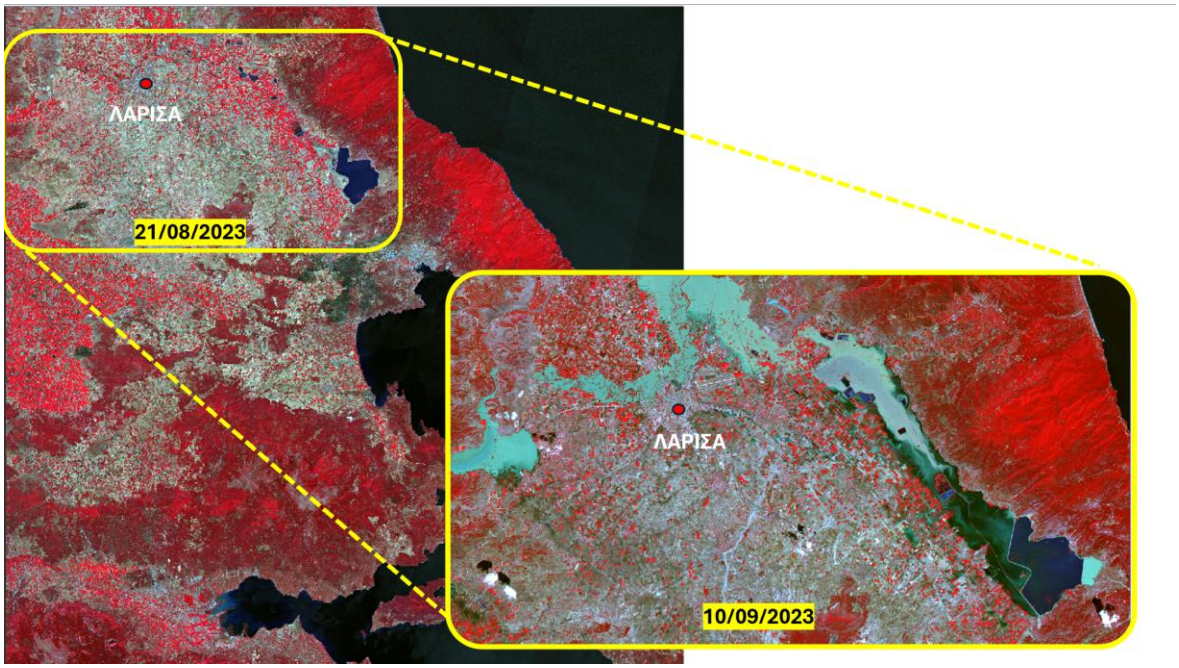
Κατά τη διάρκεια της πλημμύρας (10/09/2023): Η έκταση της λίμνης έχει αυξηθεί σημαντικά λόγω των έντονων καιρικών φαινομένων, καταλαμβάνοντας μεγάλες εκτάσεις Γης.

Μετά την πλημμύρα (15/10/2023): Παρότι τα ύδατα έχουν αρχίσει να υποχωρούν, η λίμνη εξακολουθεί να καλύπτει σημαντική έκταση.



Εικόνα 74: «Δορυφορική απεικόνιση της Θεσσαλίας με εστίαση στις πλημμυρισμένες περιοχές (15/09/2023) (σύνθετο RGB (12,11,4))».

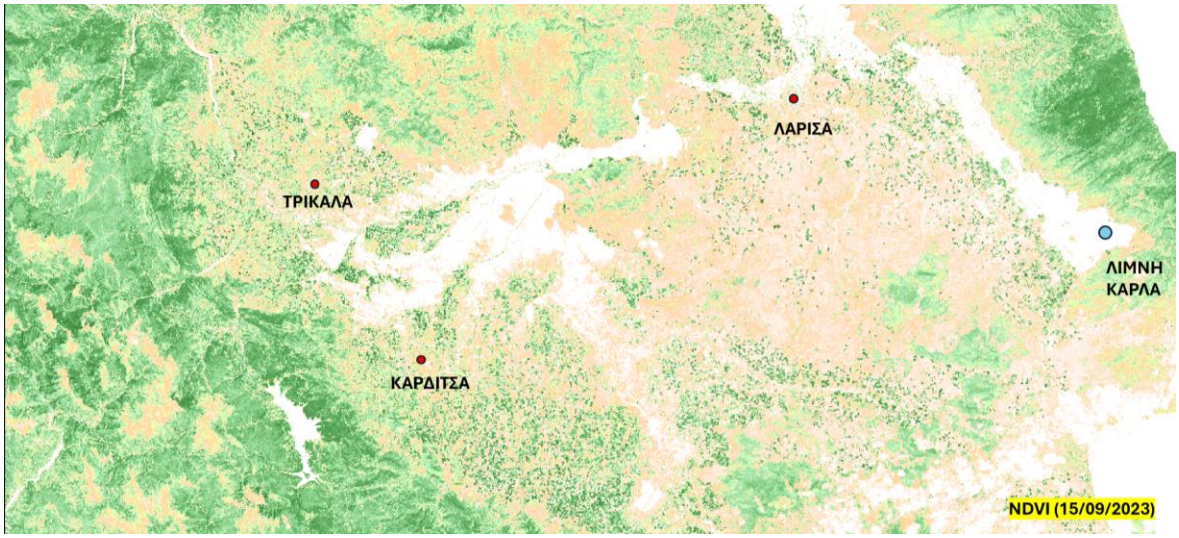
Η «Εικόνα 74» βασίζεται σε έγχρωμο σύνθετο RGB (12 11 4) το οποίο διευκολύνει την ανίχνευση των πλημμυρισμένων περιοχών. Οι πλημμυρισμένες ζώνες, επισημασμένες με μπλε, καταδεικνύουν την εκτεταμένη καταστροφή σε αγροτικές και μη εκτάσεις.



Εικόνα 75: «Δορυφορική απεικόνιση του νομού Λάρισας πριν και μετά την κακοκαιρία Daniel,(σύνθετο RGB (8, 4, 3)) ».

Η «Εικόνα 75» χρησιμοποιεί σύνθετο RGB (8 4 3), επιτρέποντας την εύκολη αναγνώριση των αλλαγών στη βλάστηση. Η σημαντική μείωση του κόκκινου χρώματος (δείκτη υγιούς βλάστησης) και η αύξηση των κυανών/μπλε αποχρώσεων υποδεικνύουν την καταστροφή των καλλιεργειών και την παρουσία στάσιμων υδάτων.

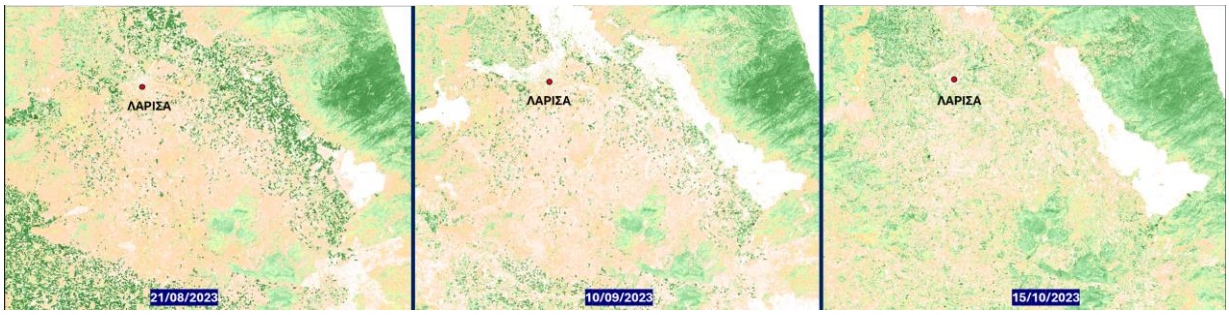
Ανάλυση του δείκτη NDVI:



Εικόνα 76: «Χάρτης NDVI για Λάρισα, Τρίκαλα και Καρδίτσας (15/09/2023) - Απεικόνιση μεταβολών βλάστησης μετά τις πλημμύρες».

Ο δείκτης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) στην «Εικόνα 76» επιτρέπει την ποσοτική αξιολόγηση της υγείας της βλάστησης και την εκτίμηση των επιπτώσεων των πλημμυρών. Οι περιοχές με υψηλές τιμές NDVI (έντονο πράσινο χρώμα) αντιστοιχούν σε υγιή βλάστηση και

φαίνεται να έχουν επηρεαστεί λιγότερο από τις πλημμύρες, πιθανώς λόγω της γεωμορφολογίας τους. Αντίθετα, οι πλημμυρισμένες περιοχές παρουσιάζουν χαμηλές τιμές NDVI, καθώς το νερό και η λάσπη περιορίζουν τη βλάστηση. Ιδιαίτερα μειωμένες τιμές NDVI καταγράφονται στις περιοχές γύρω από τις πόλεις της Λάρισας των Τρικάλων και της Καρδίτσας, αποτυπώνοντας την έκταση της καταστροφής.



Εικόνα 77: «Χρονική εξέλιξη του δείκτη NDVI στον νομό Λάρισας και στην περιοχή της λίμνης Κάρλας, πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την κακοκαιρία Daniel».

Η «Εικόνα 77» παρουσιάζει τρεις διαχρονικά διακριτές απεικονίσεις του δείκτη NDVI για την περιοχή της Λάρισας και της λίμνης Κάρλα.

Αριστερή Απεικόνιση (21/08/2023): Η περιοχή παρουσιάζει υψηλές τιμές NDVI (πράσινο χρώμα), υποδεικνύοντας υγιή βλάστηση σε ολόκληρο τον νομό, συμπεριλαμβανομένης της περιοχής της λίμνης Κάρλας. Η λίμνη Κάρλα εμφανίζεται με αρνητικές τιμές NDVI (λευκό χρώμα), υποδεικνύοντας το υδάτινο περιβάλλον.

Μεσαία Απεικόνιση (10/09/2023): Παρατηρείται δραματική μείωση των τιμών NDVI σε ολόκληρο τον νομό, με επικράτηση του ανοιχτού πράσινου και του καφέ χρώματος. Η μείωση του NDVI υποδεικνύει την καταστροφή της βλάστησης σε ολόκληρο τον νομό, συμπεριλαμβανομένων των αγροτικών εκτάσεων και των περιοχών γύρω από τη λίμνη Κάρλα. Οι πλημμυρισμένες περιοχές, συμπεριλαμβανομένης της λίμνης Κάρλας, εμφανίζουν τις χαμηλότερες τιμές NDVI (λευκό χρώμα).

Δεξιά Απεικόνιση (15/10/2023): Παρατηρείται μια μικρή ανάκαμψη των τιμών NDVI σε ολόκληρο τον νομό, με την εμφάνιση περισσότερου πράσινου χρώματος. Η ανάκαμψη του NDVI υποδεικνύει την αρχή της αποκατάστασης της βλάστησης σε ολόκληρο τον νομό, συμπεριλαμβανομένων των περιοχών γύρω από τη λίμνη Κάρλα. Η λίμνη Κάρλα εξακολουθεί να εμφανίζει χαμηλές τιμές NDVI, υποδεικνύοντας την παρατεταμένη παρουσία νερού και λάσπης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΕΚΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ

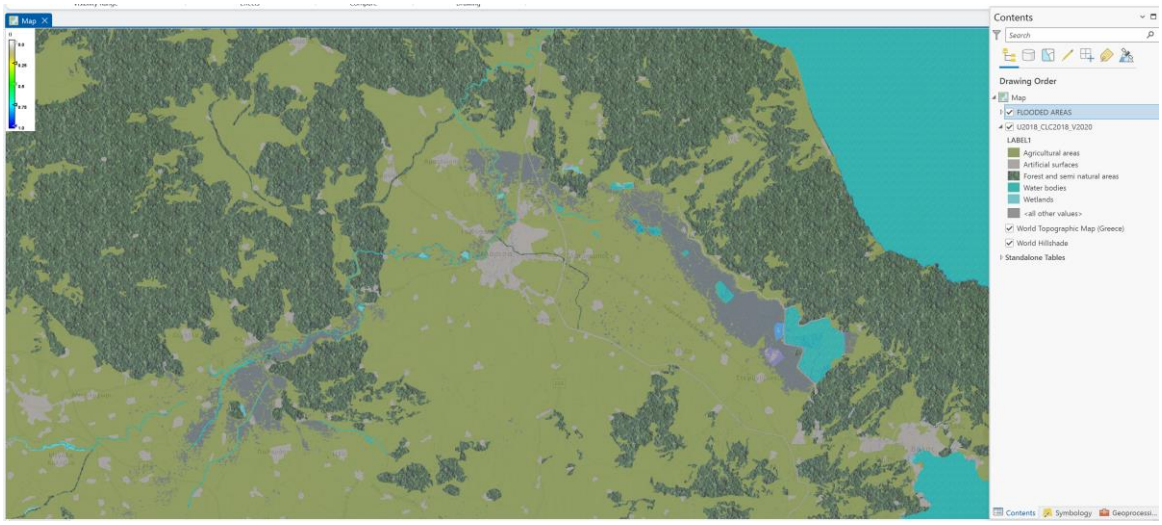
Η ολοκληρωμένη εκτίμηση των επιπτώσεων ενός πλημμυρικού φαινομένου σε μια γεωγραφική περιοχή προϋποθέτει, πέρα από τον εντοπισμό των πλημμυρισμένων εκτάσεων, και την ανάλυση της χωρικής κατανομής τους ως προς τις υφιστάμενες χρήσεις γης.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η χαρτογράφηση των πλημμυρισμένων περιοχών στον Θεσσαλικό κάμπο, όπως προέκυψε από την ανάλυση δορυφορικών δεδομένων, καθώς και η συσχέτισή τους με τις κατηγορίες χρήσεων γης βάσει του ευρωπαϊκού συστήματος Corine Land Cover (CLC), στο πλαίσιο του προγράμματος Copernicus. Η ένταξη των πλημμυρισμένων εκτάσεων σε περιβάλλον Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (GIS) κατέστησε δυνατή την ακριβή χωρική ανάλυση και την ποσοτική αποτίμηση των επιπτώσεων στις γεωργικές εκτάσεις, στις φυσικές περιοχές και στις ανθρωπογενείς υποδομές. Η συσχέτιση αυτή είναι ουσιαστική, καθώς συμβάλλει όχι μόνο στην κατανόηση της έκτασης της καταστροφής, αλλά και στη χάραξη στρατηγικών για τη μελλοντική διαχείριση των πλημμυρικών κινδύνων.

7.1 Ανάλυση Χωρικής κατανομής των Χρήσεων Γης

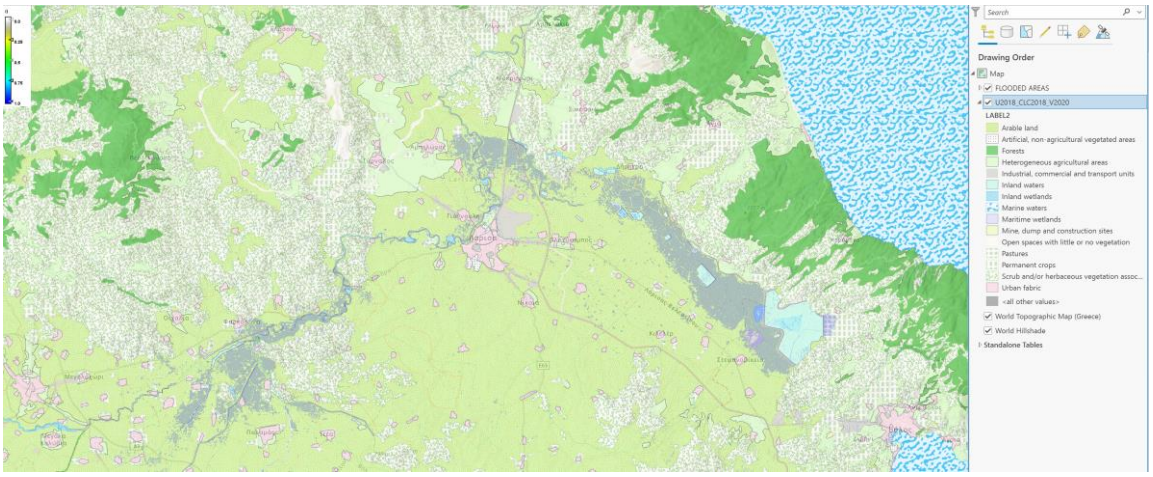
Η χωρική ανάλυση των πλημμυρικών εκτάσεων ανέδειξε ότι οι περισσότερο επηρεαζόμενες περιοχές περιλαμβάνουν:

- Γεωργική γη (κυρίως αρδευόμενες και μη αρδευόμενες καλλιέργειες).
- Φυσικές εκτάσεις όπως λιβάδια και πεδινές εκτάσεις κατά μήκος ποταμών.
- Δευτερευόντως ανθρωπογενείς ζώνες, κυρίως αστικός ιστός και υποδομές.



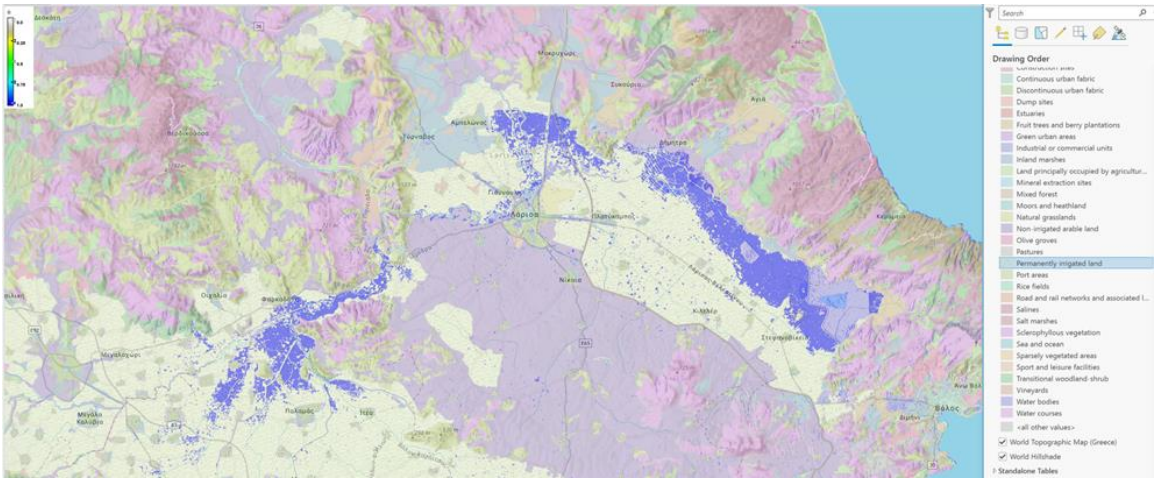
Εικόνα 78: «Χάρτης με την έκταση πλημμύρας (γκρι περιοχές), όπως εντοπίστηκε από δορυφορικές εικόνες Sentinel-1 (SAR). Ως υπόβαθρο, φαίνονται οι χρήσεις γης (γεωργικές, αστικές κ.λπ.) που επλήγησαν από το φαινόμενο.»

Η **«Εικόνα 78»** δείχνει ότι οι πλημμυρισμένες περιοχές (με γκρι χρώμα) εντοπίζονται κυρίως σε γεωργικές εκτάσεις (σε ανοιχτό πράσινο), γεγονός που υποδηλώνει πως ο αγροτικός τομέας επλήγη περισσότερο από την πλημμύρα.



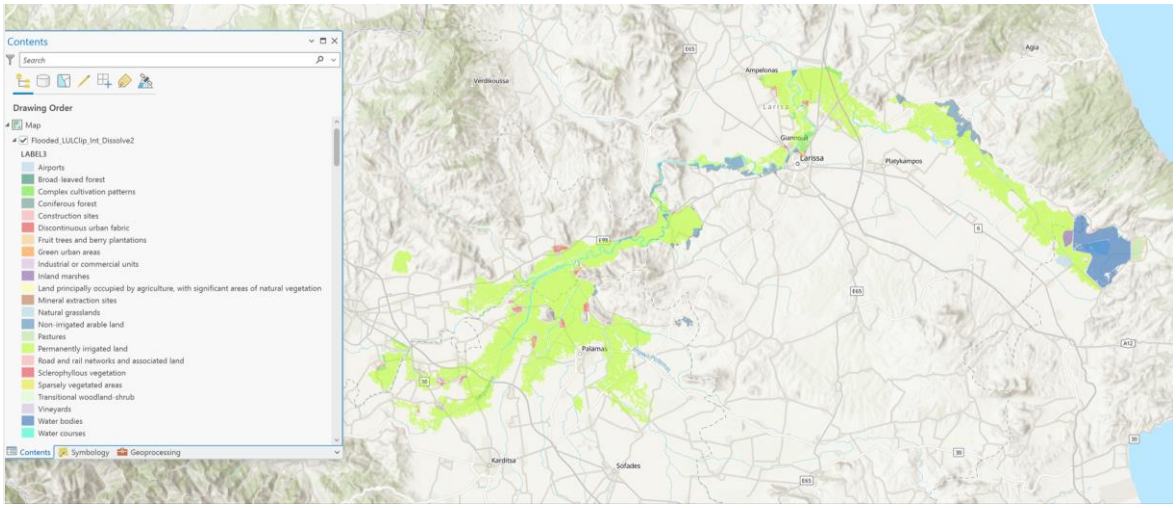
Εικόνα 79: «Χάρτης με την έκταση πλημμύρας (γκρι περιοχές), όπως εντοπίστηκε από δορυφορικές εικόνες Sentinel-1 (SAR). Ως υπόβαθρο, απεικονίζονται αναλυτικά οι χρήσεις γης βάσει του χάρτη Corine (π.χ. μόνιμα αρδευόμενες καλλιέργειες, φυσικές και αστικές εκτάσεις), επιτρέποντας την εκτίμηση των επιπτώσεων του φαινομένου ανά κατηγορία γης.»

Στην **«Εικόνα 79»** φαίνεται ότι η εξάπλωση των υδάτων ακολουθεί τη φυσική τοπογραφία και τα υδρογραφικά δίκτυα της περιοχής, επηρεάζοντας επιπλέον και φυσικά οικοσυστήματα (δάση, εσωτερικούς υγροτόπους), καθώς και ορισμένες βιομηχανικές και αστικές ζώνες, οι οποίες αν και μικρής έκτασης, εντοπίζονται κοντά στα σημεία που πλημμύρισαν, γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα εκτεθειμένες σε αντίστοιχους κινδύνους στο μέλλον.



Εικόνα 80: «Χάρτης με την κατανομή των μόνιμα αρδευόμενων εκτάσεων (ανοιχτό πράσινο), βάσει των δεδομένων χρήσεων γης Corine. Φαίνεται η συσχέτισή τους με άλλες γεωργικές και φυσικές καλύψεις γης στην ευρύτερη περιοχή.»

Η **«Εικόνα 80»** εστιάζει στην κατανομή των μόνιμα αρδευόμενων εκτάσεων (ανοιχτό πράσινο) οι οποίες εντοπίζονται σε πεδινές ζώνες και κοντά σε υδρογραφικά δίκτυα. Η πυκνότητά τους και η εγγύτητά τους στις πλημμυρικές ζώνες επιβεβαιώνουν τη στενή σχέση της γεωργικής παραγωγής με τις πλημμυρικές επιπτώσεις.



Εικόνα 81: :«Πλημμυρισμένες περιοχές βάσει δορυφορικών δεδομένων NDVI, σε διαχωρισμό ανά κατηγορία χρήσης γης (CORINE). Απεικονίζονται οι κυριότερες επηρεαζόμενες εκτάσεις, όπως γεωργικές, βοσκοτόπια και αστικός ιστός.»

Στην **«Εικόνα 81»** αποτυπώνονται οι χρήσεις γης που επηρεάστηκαν από τη συγκεκριμένη πλημμύρα, με βάση την ανάλυση δορυφορικών δεδομένων και την εφαρμογή του δείκτη NDVI. Η πλημμυρική ζώνη απομονώθηκε χωρική, ώστε να αναδειχθούν οι κατηγορίες γης που υπέστησαν τις μεγαλύτερες επιπτώσεις.

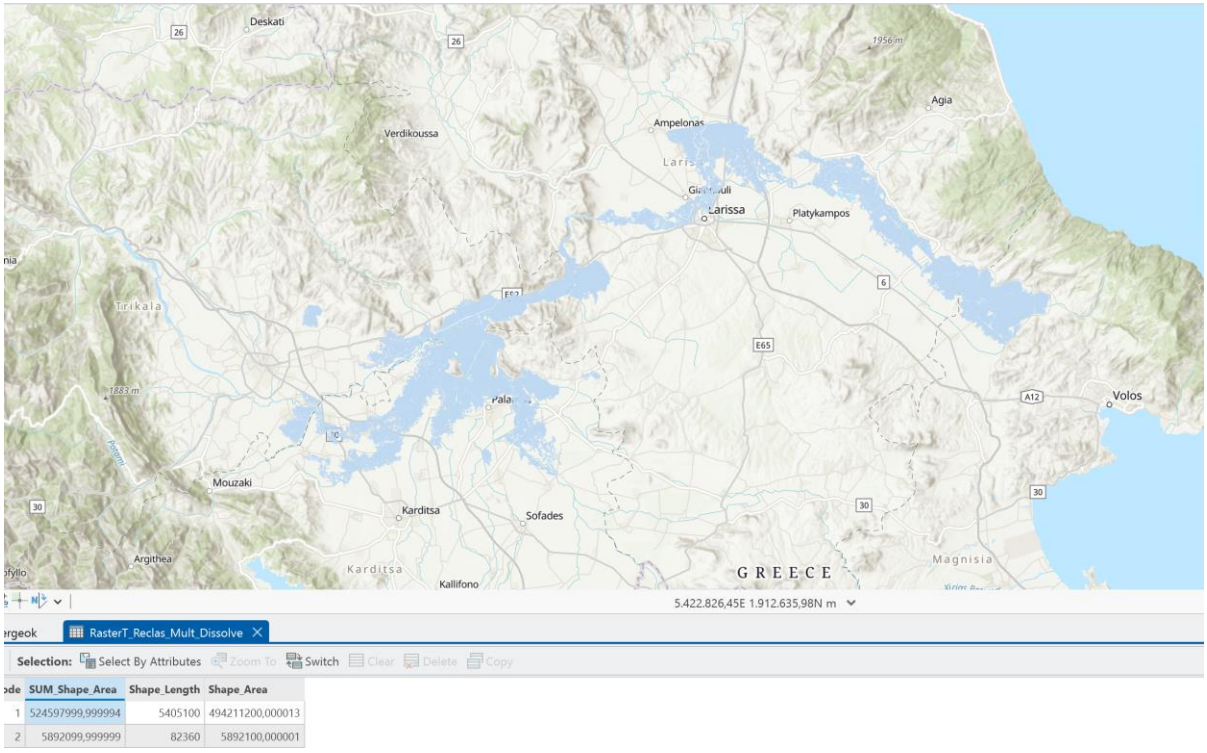
Όπως φαίνεται στον χάρτη, η κυρίαρχη κατηγορία εντός της πλημμυρισμένης περιοχής είναι οι «Μονίμως αρδευόμενες εκτάσεις» (Permanently irrigated land), οι οποίες απεικονίζονται με

ανοιχτό πράσινο χρώμα. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει τις σοβαρές επιπτώσεις στην αγροτική παραγωγή και ιδιαίτερα σε περιοχές εντατικής καλλιέργειας.

Επιπλέον, παρατηρείται επικάλυψη με εκτάσεις βοσκοτόπων, σύνθετων καλλιεργειών και τοπικά με ασυνεχή αστικό ιστό, κυρίως γύρω από τον οικισμό Παλαμά, γεγονός που δείχνει πως το φαινόμενο επηρέασε και κατοικημένες περιοχές.

7.2 Ποσοτική Αποτίμηση των Επιπτώσεων

Αφού εντοπίστηκαν οι επιμέρους κατηγορίες χρήσεων γης που επηρεάστηκαν από την πλημμύρα, το επόμενο βήμα της ανάλυσης ήταν να υπολογιστεί η συνολική έκταση της πλημμυρισμένης περιοχής. Όπως φαίνεται και στον σχετικό χάρτη **«Εικόνα 82»**, όλες οι μεμονωμένες πλημμυρισμένες περιοχές ενώθηκαν σε ένα ενιαίο γεωγραφικό πολυγωνικό διανυσματικό επίπεδο (polygon), το οποίο απεικονίζει συνολικά την πλήρη χωρική έκταση της πλημμύρας.



Εικόνα 82: «Η συνολική χωρική κάλυψη της πλημμύρας στον Θεσσαλικό κάμπο, όπως αποτυπώνεται στο τελικό, ενοποιημένο γεωγραφικό πολύγωνο που προέκυψε από την ανάλυση.»

Μέσω της γεωχωρικής επεξεργασίας, διαπιστώθηκε ότι η έκταση που κατακλύστηκε από τα νερά ανέρχεται περίπου σε 524.598 στρέμματα, γεγονός που δείχνει καθαρά τη μεγάλη κλίμακα της καταστροφής.

Για την ακριβή ποσοτική αποτίμηση των επιπτώσεων, η συνολική αυτή έκταση αναλύθηκε περαιτέρω ώστε να υπολογιστεί η κατανομή της ανά κατηγορία χρήσης γης. Τα αναλυτικά αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας παρατίθενται στον (Πίνακας 7).

Πίνακας 7: «Πλημμυρισμένες εκτάσεις ανά κατηγορία γης (σε στρέμματα).»

Κατηγορία Γης	**Πλημμυρισμένα Στρέμματα**
Μόνιμα αρδευόμενη γη	**395.269,405**
Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	**17.152,0935**
Βοσκότοποι	**13.050,70263**
Πολύπλοκα αγροτικά μοτίβα	**5.182,436445**
Αστικός ιστός με διάσπαρτη δόμηση	**5.060,800813**
Βιομηχανικές ή εμπορικές μονάδες	**4.201,126886**
Έλη ενδοχώρας	**2.942,737911**
Αεροδρόμια	**2.133,225923**
Φυσικά λιβάδια	**1.245,0998**
Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα και συναφείς εκτάσεις	**825,0725976**
Αστικοί πράσινοι χώροι	**594,0888939**
Αγροτική γη με σημαντικές περιοχές φυσικής βλάστησης	**450,9068464**
Δενδροκαλλιέργειες και καλλιέργειες μούρων	**445,9766554**
Οικοδομικές εκτάσεις	**253,5847954**
Σκληρόφυλλη βλάστηση	**219,511451**
Περιοχές εξόρυξης ορυκτών	**88,52399797**
Αμπελώνες	**84,73617977**
Περιοχές με αραιή βλάστηση	**60,47567638**
Πλατύφυλλα δάση	**50,21541005**
Μεταβατική θαμνώδης/δασική βλάστηση	**27,63057422**
Κωνοφόρα δάση	**0,043284068**

Από τα στοιχεία του πίνακα φαίνεται ξεκάθαρα ότι η «Μόνιμα αρδευόμενη γη» είναι η κατηγορία που επηρεάστηκε περισσότερο, με 395.269 στρέμματα να έχουν κατακλυστεί, δηλαδή σχεδόν το ένα τρίτο της συνολικής πλημμυρισμένης περιοχής. Στη συνέχεια, ακολουθούν:

- η «Μη αρδευόμενη γεωργική γη» με 17.152 στρέμματα,
- οι «Βοσκότοποι» με 13.050 στρέμματα,
- ο «Αστικός ιστός με διάσπαρτη δόμηση» με 5.060 στρέμματα,
- και οι «Βιομηχανικές ή εμπορικές μονάδες» με 4.201 στρέμματα.

Αυτή η ποσοτική προσέγγιση έχει καθοριστική σημασία, αφού μετατρέπει τη χωρική πληροφορία σε σαφή και μετρήσιμα δεδομένα. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται δυνατή όχι μόνο μια πιο αντικειμενική εκτίμηση των ζημιών, αλλά και ο σχεδιασμός στοχευμένων μέτρων αποκατάστασης. Επιπλέον, τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν για τη χάραξη στρατηγικών που θα μειώσουν τον κίνδυνο από μελλοντικές πλημμύρες, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή τρωτότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη ανέδειξε τη σημασία της Τηλεπισκόπησης και των δορυφορικών δεδομένων ως βασικών εργαλείων για την αποτύπωση και ανάλυση πλημμυρικών φαινομένων, με εφαρμογή στις πλημμύρες του Σεπτεμβρίου 2023 στον Θεσσαλικό κάμπο. Η αξιοποίηση δεδομένων από τους δορυφόρους Sentinel-1 και Sentinel-2, σε συνδυασμό με προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας, επέτρεψε την ακριβή χαρτογράφηση των πληγεισών περιοχών, την αποτίμηση των επιπτώσεων στις γεωργικές εκτάσεις και τη βλάστηση, καθώς και την εξαγωγή κρίσιμων πληροφοριών για τη διαχείριση των συνεπειών της καταστροφής.

Η εφαρμογή τεχνικών συνθετικής απεικόνισης ραντάρ (SAR) από τον Sentinel-1 παρείχε αξιόπιστα δεδομένα για την ταχεία ανίχνευση των πλημμυρισμένων εκτάσεων, ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών και νεφοκάλυψης. Παράλληλα, η ανάλυση πολυφασματικών εικόνων από τον Sentinel-2, μέσω έγχρωμων συνθέσεων RGB και του δείκτη βλάστησης (NDVI), συνέβαλε ουσιαστικά στην αξιολόγηση των επιπτώσεων της πλημμύρας στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον.

Η διασταύρωση των πλημμυρισμένων εκτάσεων με δεδομένα χρήσεων γης (CORINE Land Cover) αποκάλυψε σημαντικές απώλειες σε κρίσιμες γεωργικές κατηγορίες. Οι μόνιμα αρδευόμενες εκτάσεις αποτέλεσαν την κύρια πληγείσα κατηγορία, με περισσότερα από 395.000 στρέμματα να έχουν πλημμυρίσει, ενώ ζημιές καταγράφηκαν επίσης σε αρόσιμες καλλιέργειες, βοσκοτόπια, αστικές περιοχές, καθώς και σε βιομηχανικές και μεταφορικές υποδομές. Η πολυεπίπεδη αυτή ανάλυση ενισχύει την κατανόηση των πραγματικών συνεπειών της καταστροφής, τόσο στο επίπεδο της παραγωγής όσο και στον χωρικό σχεδιασμό.

Το πρόγραμμα Copernicus, μέσω της παροχής δωρεάν και ανοιχτών δεδομένων υψηλής ανάλυσης, διευκόλυνε τη συλλογή και επεξεργασία πληροφοριών που αξιοποιήθηκαν στην παρούσα ανάλυση.

Τα αποτελέσματα της μελέτης επιβεβαιώνουν τον καθοριστικό ρόλο της Τηλεπισκόπησης στη διαχείριση φυσικών καταστροφών, προσφέροντας επίκαιρα, αξιόπιστα και χωρικά ακριβή δεδομένα που υποστηρίζουν τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων από τους αρμόδιους φορείς. Η δυνατότητα ταχείας και στοχευμένης αποτύπωσης των επιπτώσεων μπορεί να συμβάλει

ουσιαστικά τόσο στην άμεση διαχείριση κρίσεων, όσο και στον μελλοντικό σχεδιασμό προληπτικών δράσεων.

8.2 Προοπτικές και Προτάσεις για το Μέλλον

Η εξέλιξη της Τηλεπισκόπησης και των δορυφορικών αισθητήρων προσφέρει σημαντικές προοπτικές για την βελτίωση της παρακολούθησης και διαχείρισης φυσικών καταστροφών. Με την ενσωμάτωση υπερφασματικών αισθητήρων, αισθητήρων μικροδορυφόρων και δορυφορικών αστερισμών αναμένεται να αυξηθεί η χωρική και χρονική ανάλυση των δεδομένων, επιτρέποντας την ακριβέστερη αποτύπωση των πλημμυρικών φαινομένων.

Παράλληλα, η συνδυαστική χρήση δεδομένων από διαφορετικούς δορυφόρους θα ενισχύσει τη δυνατότητα ανίχνευσης και εκτίμησης των επιπτώσεων ακραίων καιρικών γεγονότων. Επιπλέον, η αυτοματοποίηση των διαδικασιών ανάλυσης, μέσω τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης μπορεί να συμβάλει στην ταχύτερη και ακριβέστερη ανίχνευση πλημμυρών μειώνοντας την ανάγκη για χρονοβόρες επεξεργασίες.

Τέλος, η διασύνδεση δορυφορικών δεδομένων με επίγειες μετρήσεις, αισθητήρες Lot και μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs) μπορεί να προσφέρει μια ολοκληρωμένη εικόνα της εξέλιξης των φαινομένων, βελτιώνοντας την αξιοπιστία των προβλέψεων και των μέτρων απόκρισης.

Βιβλιογραφία - Αναφορές

[1] European Space Agency. (n.d.). Τι είναι η Τηλεπισκόπηση. European Space Agency. https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_GR/SEM9G7WO1FG_0.html

[2] Καρτάλης Κ., & Φειδάς Χ. (2013). Αρχές και εφαρμογές δορυφορικής Τηλεπισκόπησης. ΤΖΙΟΛΑ.

[3] Jensen, J. R. (2009). Remote sensing of the environment: An earth resource perspective 2/e. Pearson Education India.

[4] Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). Remote Sensing and Image Interpretation (7th ed.). Wiley

[5] Goody, R. M., & Yung, Y. L. (1995). Atmospheric radiation: theoretical basis. Oxford university press.

[6] Liang, S. (2005). Quantitative remote sensing of land surfaces. John Wiley & Sons.

[7] Vardiampasi, A. A. (2024). Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στον άνθρωπο, πρόληψη από τις συνέπειες της, στάσεις και αντιλήψεις του πληθυσμού της Δυτικής Μακεδονίας ως μελέτη περίπτωσης. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Νοσηλευτικής, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: Ειδίκευση Οργάνωση και Διοίκηση Υπηρεσιών Υγείας.

[8] Mobley, C. D. (1994). Light and water: radiative transfer in natural waters. (No Title).

[9] Kirk, J. T. O. (2011). Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems (3rd ed.). Cambridge University Press.

[10] Jerlov, N. G. (1976). Marine optics (Vol. 14). Elsevier.

[11] Goetz, A. F., Vane, G., Solomon, J. E., & Rock, B. N. (1985). Imaging spectrometry for earth remote sensing. science, 228(4704), 1147-1153.

[12] European Space Agency. (n.d). Φασματικές υπογραφές. Ανακτήθηκε από: https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_GR/SEMF3S4PVFG_0.html

[13] Ustin, S. L., & Middleton, E. M. (2024). Current and Near-Term Earth-Observing Environmental Satellites, Their Missions, Characteristics, Instruments, and Applications. Sensors, 24(11), 3488.

[14] Περάκης, Κ., Μωυσιάδης, Α., & Φαρασλής, Ι. (2015). Η Τηλεπισκόπηση σε 13 ενότητες [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-822

[15] Jensen, J. R. (2007). Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.

[16] Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). Introduction to Remote Sensing (5th ed.). Guilford Press.

[17] Adhikari, G., Halder, S., Banerjee, S., & Chaudhuri, S. S. (2021, February). An effective use of synthetic aperture radar imaging technique over optical remote sensing and real aperture radar for mapping of Earth surface features. In 2021 Innovations in Energy Management and Renewable Resources (52042) (pp. 1-6). IEEE.

[18] L'Abbate, M., Germani, C., Torre, A., Campolo, G., Cascone, D., Bombaci, O., ... & Federici, S. (2015, April). Compact SAR and micro satellite solutions for Earth observation. In 31st space symposium (Vol. 1).

[19] Jutz, S., & Milagro-Perez, M. P. (2018). Comprehensive Remote Sensing, Missions and Sensors, 1.06.1 A European Earth Observation Program at Global Scale.

[20] Copernicus Marine Environment Monitoring Service. (n.d.). Copernicus marine service. Ανακτήθηκε από https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services/marine

[21] Copernicus Security Service. (n.d.). Copernicus security service. Ανακτήθηκε από https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services/security.

[22] Copernicus Land Monitoring Service. (n.d.). Copernicus land monitoring service. Ανακτήθηκε από https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services/land

[23] Copernicus Emergency Management Service. (n.d.). Copernicus emergency management service. Ανακτήθηκε από https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services/emergency

[24] Copernicus Atmosphere Monitoring Service. (n.d.). Copernicus atmosphere monitoring service. Ανακτήθηκε από https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services/climate-change

[25] Copernicus Climate Change Service. (n.d.). Copernicus climate change service. Ανακτήθηκε από https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services/climate-change

[26] sentiwiki.copernicus.eu. (n.d.). S1 mission. Ανακτήθηκε από https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s1-mission

[27] Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., ... & Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. Remote Sensing of Environment, 120, 9–24.

[28] sentiwiki.copernicus.eu. (n.d.). S2 mission. Ανακτήθηκε από https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission

[29] Nguyen, N. L., Anger, J., Davy, A., Arias, P., & Facciolo, G. (2023). L1BSR: Exploiting detector overlap for self-supervised single-image super-resolution of Sentinel-2 L1b imagery. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 2012-2022)

[30] Safecrete.gr. (n.d.). Natural disaster. Ανακτήθηκε από https://www.safecrete.gr/natural-disaster/

[31] Rentschler, J., Salhab, M., & Jafino, B. A. (2022). Flood exposure and poverty in 188 countries. Nature communications, 13(1), 3527.

[31] Our World in Data. (n.d.). Natural disasters by type. Ανακτήθηκε από https://ourworldindata.org/grapher/natural-disasters-by-type

[32] Popandopulo, G., Illarionova, S., Shadrin, D., Evteeva, K., Sotiriadi, N., & Burnaev, E. (2023). Flood extent and volume estimation using remote sensing data. Remote Sensing, 15(18), 4463.

[33] Konapala, G., Kumar, S. V., & Ahmad, S. K. (2021). Exploring Sentinel-1 and Sentinel-2 diversity for flood inundation mapping using deep learning. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 180, 163-173

[34] Zhang, H., Qi, Z., Li, X., Chen, Y., Wang, X., & He, Y. (2021). An urban flooding index for unsupervised inundated urban area detection using Sentinel-1 polarimetric SAR images. Remote Sensing, 13(22), 4511.

[35] Global Flood Awareness System. (n.d.). GloFAS & GFM technical information. Ανακτήθηκε από https://global-flood.emergency.copernicus.eu/technical-information/glofas-gfm/

[36] Van Westen, C. J. (2000). Remote sensing for natural disaster management. International archives of photogrammetry and remote sensing, 33(B7/4; PART 7), 1609-1617

[37] Δρ. Μπαλούτσου, (2020). Ακραίες πλημμύρες και ορεινές υδρολογικές λεκάνες στην Ελλάδα. Περιοδικό «ΔΗΜΗΤΡΑ» του ΕΛΓΟ/ΔΗΜΗΤΡΑ τεύχος (28).

[38] in.gr. (2023, 29 Ιανουαρίου). Έρευνα: Ελλάδα τέταρτη σε καταστροφικές πλημμύρες στην Ανατολική Μεσόγειο κατά την περίοδο 1882-2021. Ανακτήθηκε από0 https://www.in.gr/2023/01/29/in-science/perivallon-b-science/ereyna-ellada-tetarti-se-katastrofikes-plimmyres-stin-anatoliki-mesogeio-kata-tin-periodo-1882-2021/

[39] Newsbomb. (n.d.). Ελλάδα: Οι 7 πιο φονικές πλημμύρες στην ιστορία της χώρας. Ανακτήθηκε από https://www.newsbomb.gr/ellada/story/1466767/ellada-oi-7-pio-fonikes-plimmyres-stin-istoria-tis-xoras

[40] Παπαβασιλείου, Γ., & Λαγουβάρδος, Κ. (2023, 3 Σεπτεμβρίου). Ψυχρή λίμνη στην ανώτερη ατμόσφαιρα θα προκαλέσει ισχυρές βροχές και καταιγίδες - Επικινδυνότητα

Επεισοδίου Βροχόπτωσης Κατηγορίας 5. Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών - meteo.gr. Ανακτήθηκε από https://www.meteo.gr/article_view.cfm?entryID=2908

[41] Ντάφης, Σ., Κύρος, Γ., & Λαγουβάρδος, Κ. (2023, 5 Σεπτεμβρίου). Κακοκαιρία Daniel: Καταρρίφθηκε το ρεκόρ ημερήσιου ύψους βροχής στη χώρα μας. Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών - meteo.gr. Ανακτήθηκε από https://www.meteo.gr/article_view.cfm?entryID=2913

[42] Eudaric, J., Kreibich, H., Camero, A., Rafiezadeh Shahi, K., Martinis, S., & Zhu, X. X. (2024). A satellite imagery-driven framework for rapid resource allocation in flood scenarios to enhance loss and damage fund effectiveness. Scientific Reports, 14(1), 19290.

[43] He, K., Yang, Q., Shen, X., Dimitriou, E., Mentzafou, A., Papadaki, C., ... & Anagnostou, E. N. (2024). Brief communication: Storm Daniel flood impact in Greece in 2023: Mapping crop and livestock exposure from synthetic-aperture radar (SAR). Natural Hazards and Earth System Sciences, 24(7), 2375-2382.

[44] Wang, X., Ruan, Y., & Zhang, X. (2023). Accuracy improvement of high-resolution wide-swath spaceborne synthetic aperture radar imaging with low pule repetition frequency. Remote Sensing, 15(15), 3811.

[45] Xu, G., Zhang, B., Yu, H., Chen, J., Xing, M., & Hong, W. (2022). Sparse synthetic aperture radar imaging from compressed sensing and machine learning: Theories, applications, and trends. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 10(4), 32-69.

[46] Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. P. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. IEEE Geoscience and remote sensing magazine, 1(1), 6-43.

[47] European Space Agency (ESA). (n.d.). SNAP – ESA Sentinel Application Platform. Ανακτήθηκε από https://eo4society.esa.int/resources/snap/

[48] Copernicus Sentinels. (n.d.). ESA releases new and improved version of SNAP. Ανακτήθηκε από https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/-/esa-releases-new-and-improved-version-of-snap

[49] European Space Agency (ESA). (n.d.). LEOWorks – Educational remote sensing software. Ανακτήθηκε από https://eo4society.esa.int/resources/leoworks/

Uddin, K., Matin, M. A., & Meyer, F. J. (2019). Operational flood mapping using multi-temporal Sentinel-1 SAR images: A case study from Bangladesh. Remote Sensing, 11(13), 1581.