



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

**Χαρτογράφηση του πλημμυρικού φαινομένου στο σύστημα ταμιευτήρα -
ορεινής λεκάνης στην κεντρική Κρήτη με τη χρήση διαστημικών δεδομένων
παρατήρησης της Γης**

Πτυχιακή εργασία

Μανωλιτσάκη Αναστασία



Αθήνα, 2022



HAROKOPIO UNIVERSITY

SCHOOL OF ENVIRONMENT, GEOGRAPHY & APPLIED
ECONOMICS

DEPARTMENT OF GEOGRAPHY

**Mapping flood event in the system of reservoir – basin at central Crete using
Earth Observation Data**

Bachelor thesis

Manolitsaki Anastasia



Αθήνα, 2022

Σελίδα 2 από 126



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ**

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Παρχαρίδης Ισαάκ (Επιβλέπων)

Καθηγητής, Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Καρύμπαλης Ευθύμιος

Καθηγητής, Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Κατσαφάδος Πέτρος

Καθηγητής, Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Η Αναστασία Μανωλιτσάκη,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

- 1)** Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.
- 2)** Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.
- 3)** Όπου υφίστανται δικαιώματα άλλων δημιουργών έχουν διασφαλιστεί όλες οι αναγκαίες άδειες χρήσης ενώ το αντίστοιχο υλικό είναι ευδιάκριτο στην υποβληθείσα εργασία.

Κάλλιστον κόσμος, ποίημα γαρ Θεού / Θαλής ο Μιλήσιος

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ ιδιαιτέρως τον Δρ. Παρχαρίδη Ισαάκ για την πολύτιμη συμβολή του στην παρούσα εργασία. Οι διαλέξεις του στο προπτυχιακό αποτέλεσαν την εναρκτήρια δύναμη ανάπτυξης γόνιμης “αγωνίας” για ενασχόληση με το αντικείμενο της Τηλεπισκόπησης. Η Τηλεπισκόπηση επιλύει πάσης φύσεως προβλήματα του σύγχρονου κόσμου, από την αποτίμηση των επιπτώσεων μιας φυσικής καταστροφής έως την στατικότητα μηχανικών κατασκευών.

Στο πλαίσιο αυτό, είμαι ευγνώμων για την πνευματική πρόοδο που αναγνωρίζω πως συντελέστηκε στο διάστημα φοίτησης μου στο Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, μέσα από την παρότρυνση διερεύνησης των πολύπλευρων πτυχών της Γεωγραφίας και τις στοχευμένες ερευνητικές εργασίες των διδασκόντων.

Ακόμη, την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος ESA για την ανοικτή δωρεάν παροχή του λογισμικού επεξεργασίας SNAP και δορυφορικών δεδομένων παρατήρησης της γης.

Δεν θα μπορούσαν να απουσιάζουν από το χωρίο αυτό, οι ευχαριστίες προς όλο το διοικητικό προσωπικό για τη φροντίδα που περιβάλλει τους φοιτητές και τη συνδρομή του, στην εξέλιξη του προγράμματος και των εγκαταστάσεων.

Περιεχόμενα

Περίληψη	9
ABSTRACT.....	10
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	15
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	16
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	17
2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	19
2.1 Φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά	19
2.1.1 Το Οροπέδιο Λασιθίου.....	19
2.1.2 Υδρολογικά χαρακτηριστικά	21
2.2 Ανθρωπο-Γεωγραφικά χαρακτηριστικά.....	26
2.3 Φράγμα Αποσελέμη και ο Υδάτινος Ταμιευτήρας.....	29
3 ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	34
3.1 Ορισμοί	34
3.2 Το πλημμυρικό φαινόμενο στην Ελλάδα και στο Οροπέδιο	34
3.3 Σχέδια διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας.....	35
3.4 Επιπτώσεις και εκτιμήσεις.....	37
3.5 Αντιμετώπιση	37
3.6 Τηλεπισκόπηση.....	39

3.7	Ενεργά δορυφορικά συστήματα SAR.....	44
3.7.1	Δορυφόροι που φέρουν όργανα SAR και εξέλιξη οργάνων SAR	49
3.8	Πρόγραμμα Copernicus.....	63
3.8.1	Copernicus Sentinel 1 Mission	67
3.9	Υπηρεσία χαρτογράφησης εκτάκτων αναγκών του Copernicus	72
4	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	74
5	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	84
5.1	Γεωχωρικά δεδομένα.....	84
5.2	Δορυφορικά δεδομένα	85
5.3	Μετεωρολογικά δεδομένα.....	86
5.4	Λογισμικά.....	91
5.5	Μεθοδολογία	92
5.5.1	Ανάκτηση δορυφορικών εικόνων	93
5.5.2	Προεπεξεργασία εικόνων SAR	95
5.5.3	Επεξεργασία.....	99
5.5.4	Οπτικοποίηση σε ΣΓΠ και Google Earth	104
6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	106
6.1	Χαρτογράφηση Πλημμυρικού Φαινομένου	106
6.2	Χαρτογράφηση μεταβολής στάθμης ύδατος την τεχνητή λίμνη Αποσελέμη	110
7	ΣΥΖΗΤΗΣΗ	112
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	113
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	114

Περίληψη

Η Τηλεπισκόπηση μπορεί να παρέχει άμεση και αποτελεσματική παρακολούθηση των πλημμυρών, που είναι ένα από τα συνηθέστερα καταστροφικά φαινόμενα με δυσμενείς επιπτώσεις στην κοινωνία, την οικονομία και το περιβάλλον. Τα απαραίτητα δορυφορικά δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προς αυτό το σκοπό διατίθενται ελεύθερα από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος ESA, στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Copernicus. Για την απεικόνιση και την αναπαραγωγή των αποτελεσμάτων χρήσιμο εργαλείο αποτελούν τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ), από τα οποία είναι δυνατή η δημιουργία μικρών και εύκολων στη χρήση και τη μεταφορά αρχείων που μπορούν να εισαχθούν απευθείας στο Google Earth.

Στην παρούσα πτυχιική εργασία επίκεντρο αποτέλεσαν τα πλημμυρικά φαινόμενα του έτους 2020 που συνέβησαν στο οροπέδιο Λασιθίου. Η ανάλυση στηρίχθηκε σε δορυφορικές εικόνες Sentinel 1 GRD IW, σαφώς για την εκτίμηση της επιφάνειας που εκτέθηκε σε πλημμυρικά νερά, αλλά και για την κατανόηση της μεταβολής της στάθμης της τεχνητής λίμνης Αποσελέμη, που μπορεί να συμβάλει στην εξέταση του ρόλου της στο φαινόμενο. Το ελεύθερο λογισμικό SNAP προσέφερε τη βάση, στην οποία εφαρμόστηκε στο σύνολό της η μεθοδολογία της πλημμυρικής χαρτογράφησης. Κεντρικό ρόλο κατέχει η δυαδοποίηση των λήψεων, δηλαδή η απόδοση της τιμής 1 στα εικονοστοιχεία που καλύπτονται από νερό και 0 σε όλα τα υπόλοιπα, που προϋποθέτει τον ακριβή καθορισμό κατωφλίου. Ακολούθως, έγινε εισαγωγή στο Qgis απ' όπου δημιουργήθηκαν τα χαρτογραφικά αποτελέσματα και τα προϊόντα εισόδου KML του Google Earth.

Τα αποτελέσματα δείχνουν με σαφήνεια τον τρόπο με τον οποίο εξελίχθηκαν τα φαινόμενα και στις τρεις διακριτές περιόδους. Η μεγαλύτερη έκταση αγροτικών εκτάσεων καλυμμένων με νερό που μετρήθηκε ανέρχεται σε 2,067 km², ενώ του ταμιευτήρα σε 1,382 km² και αφορά στο γεγονός του Απριλίου και συγκεκριμένα την 8/4/2020. Τον Ιανουάριο η διάρκεια παραμονής των στάσιμων υδάτων υπήρξε μεγαλύτερη, ενώ τους υπόλοιπους μήνες ήταν σχεδόν ανύπαρκτη.

Λέξεις κλειδιά: Πλημμύρα, Κρήτη, Αποσελέμη, οροπέδιο, κατώφλι.

ABSTRACT

Remote sensing can provide immediate and effective flood monitoring, which is one of the most common catastrophic phenomena with adverse effects on society, the economy and the environment. The necessary satellite data that can be used for this purpose are freely made available by the ESA European Space Agency, within the framework of the European Copernicus Programme. For the visualization and reproduction of the results, a useful tool is the Geographic Information Systems (GIS), from which it is possible to create small and easy-to-use and transfer files that can be imported directly into Google Earth.

In this thesis, the focus was on the flooding phenomena of the year 2020 that occurred on the Lasithi plateau. The analysis was based on Sentinel 1 GRD IW satellite images, clearly for the estimation of the surface exposed to floodwater, but also for the understanding of the change in the level of the artificial lake Aposelemis, which can contribute to the examination of its role in the phenomenon. The free SNAP software provided the basis on which the methodology of flood mapping was applied in its entirety. A central role is played by the dualization of shots, i.e. the attribution of the value 1 to pixels covered by water and 0 to all the others, which presupposes the precise determination of a threshold. Subsequently, Qgis was introduced from where the maps and KML input products of Google Earth were created.

The results clearly show how the phenomena evolved in all three distinct periods. The largest area of agricultural areas covered with water measured amounts to 2,067 km², while that of the reservoir to 1,382 km² and concerns the event of April and specifically on 8/4/2020. In January the duration of stay of stagnant water was longer, while in the remaining months it was almost non-existent.

Keywords: Flood, Crete, Sentinel 1, SAR, Satellite Earth Observation Systems.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Εντοπίζοντας στο χάρτη: βόρεια την Υδατοδεξαμενή του Φράγματος Αποσελέμη και το φράγμα. Στο κέντρο το οροπέδιο Λασιθίου και τον μετεωρολογικό σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου (Πηγή: Google Earth,, METEO Εθνικού Αστεροσκοπείου https://www.meteo.gr/).....	18
Εικόνα 2: Οι οροσειρές της Κρήτης (Πηγή: www.lib.aegean.gr/)	19
Εικόνα 3: Τοποθεσία των κορυφών της οροσειράς Δίκτη, του οροπεδίου Λασιθίου, του οροπεδίου Καθαρού, του υδάτινου ταμιευτήρα, κύριων οικισμών και ρεμάτων (Πηγή: Εθνικό Κτηματολόγιο, Open Street Map).....	20
Εικόνα 4: Υδρολογικές λεκάνες Κρήτης και Υπολεκάνες Τζερμιάδων – Αποσελέμης.....	22
Εικόνα 5: Το ρέμα Χαυγά, οι εκβολές ποταμού Αποσελέμη, ο Χώνος, η τεχνητή σήραγγα, η τεχνητή λίμνη Αποσελέμη και τα διυλιστήρια νερού Αποσελέμη (Πηγή: Google Earth).....	23
Εικόνα 6: Η φυσική καταβόθρα του Χώνου στο οροπέδιο Λασιθίου. Με κίτρινα βέλη σημειώνεται το σημείο εγκοπής, μεταξύ του εδάφους και του επικλινούς βράχου, από το οποίο τα ύδατα οδηγούνται στον υπόγειο υδροφορέα (Πηγή: προσωπικό αρχείο)	24
Εικόνα 7: Υδρολιθολογικός χάρτης υπολεκάνης Τζερμιάδων (Πηγή: Ειδική Γραμματεία Υδάτων - Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας https://floods.ypreka.gr/).....	25
Εικόνα 8: Καλύψεις γης κατά Corine Land Cover 2018 (Πηγή: Copernicus Land Monitoring Service 2018 https://land.copernicus.eu/)	26
Εικόνα 9: Δήμος Οροπεδίου Λασιθίου και όμοροι Δήμοι (Πηγή: http://geodata.gov.gr/).....	27
Εικόνα 10: Οδικό δίκτυο σύνδεσης μεταξύ των οικισμών του οροπεδίου Λασιθίου και οδοί επικοινωνίας με τη Χερσόνησο και τη Νεάπολη (Πηγή: Google Earth, https://earth.google.com/)	28
Εικόνα 11: Το φράγμα και η υδατοδεξαμενή του Αποσελέμη ποταμού (Πηγή: Google Earth)	29
Εικόνα 12: Τα κόστη ολοκλήρωσης του έργου ανά τομέα όπως παρουσιάστηκαν από την ΕΥΔΥΕ (Πηγή: Παρουσίαση διαθέσιμη από https://slideplayer.gr/slide/2613064/)	31
Εικόνα 13: Τυπική διατομή φράγματος Αποσελέμη: 1)Πυρίνας, 2) Φίλτρο, 3) Στραγγιστήριο, 4α) Σώματα στήριξης (αποσαθρωμένος φυλλίτης), 4β) Σώματα στήριξης (βραχώδη προϊόντα φυλλίτη), 5) Ζώνη	

κυματοπροστασίας, 5α) Μεταβατική ζώνη, 6) Ζώνη προστασίας κατάντη πρανούς, 7) Στέψη (βάση και ασφαλτικές στρώσεις) (Πηγή: Νιφάκου & Σαρλά, 2013).....	32
Εικόνα 14: Έργα εκτροπής οροπεδίου Λασιθίου μεταξύ του Χώνου και της τεχνητής σήραγγας (Πηγή: Αγαπάκης, 2015)	32
Εικόνα 15: Κατανομή των πλημμυρικών γεγονότων για το διάστημα 2000-2020 (Πηγή: ΜΕΤΕΟ Εθνικού Αστεροσκοπίου)	35
Εικόνα 16: Εντοπισμός της Ζώνης Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (ΖΔΥΚΠ) «Χαμηλή ζώνη λεκάνης οροπεδίου Λασιθίου» στο μορφολογικό χάρτη (Πηγή: Εθνικό Κτηματολόγιο, Open Street Map, ΥΠΕΚΑ).....	36
Εικόνα 17: Το τοπίο του νερού – η διατύπωση των ροών του υδάτινου κύκλου σε μετρήσιμες παραμέτρους (Πηγή: Mehta et al., 2019)	38
Εικόνα 18: Η κυματική φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Πηγή: Σταγάκης, 2012)	41
Εικόνα 19: Τα κανάλια του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που χρησιμοποιούνται από την Τηλεπισκόπηση και τα συστήματα SAR (Πηγή: Dell’Amore, 2019; Pettorelli et al., 2018).	42
Εικόνα 20: Η εξάρτηση της τραχύτητας από το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Κατοπτρική ανάκλαση σε λεία επιφάνεια – Ανάκλαση σε επιφάνεια μέτριας τραχύτητας – Διάχυση σε πολύ τραχιά επιφάνεια (Πηγή: Flores et al., 2019).....	43
Εικόνα 21: Ο τρόπος λειτουργίας των παθητικών και των ενεργητικών δορυφορικών συστημάτων (Πηγή: https://nptel.ac.in/)	44
Εικόνα 22: Βασικό διάγραμμα συστήματος RADAR (Πηγή: Chan & Koo, 2008)	45
Εικόνα 23: Η γεωμετρία των λήψεων κατά τη σύνθεση μίας εικόνας SAR (Πηγή: Δεληκαράογλου, 2005)	46
Εικόνα 24: Η γεωμετρία των SAR συστημάτων Πηγή: (Villano, 2016)	47
Εικόνα 25: Ο τρόπος λειτουργίας του PALSAR-2 (Πηγή: https://global.jaxa.jp/)	56
Εικόνα 26: Οι δίδυμοι δορυφόροι TerraSAR-X και TanDEM-X (Πηγή: DLR https://www.dlr.de/)	57
Εικόνα 27: Η γεωμετρία ενός burst του SIRAL σε LRM (Πηγή: https://earth.esa.int/)	60

Εικόνα 28: Η γεωμετρία πολλαπλών bursts του SIRAL σε LRM (Πηγή: https://earth.esa.int/)	61
Εικόνα 29: Οι υπηρεσίες του Copernicus (Πηγή: https://www.copernicus.eu/el)	65
Εικόνα 30: Το σύστημα πρόσβασης των δεδομένων Sentinel (Πηγή: Knowelden, 2019).....	66
Εικόνα 31: Το ευρύ φάσμα εφαρμογών που προσφέρει ο Sentinel 1 (Πηγή: ESA https://www.esa.int/)	68
Εικόνα 32: C-band Synthetic Aperture Radar (Πηγή: ESA https://www.esa.int/)	69
Εικόνα 33: Sentinel-1 Acquisition Modes (Πηγή: Collecte Localisation Satellites (CLS), 2016)	70
Εικόνα 34: Διάγραμμα των προϊόντων Sentinel 1	71
Εικόνα 35: Αναλυτική παρουσίαση των δεδομένων του μετεωρολογικού σταθμού (Πηγή: http://penteli.meteo.gr/stations/tzermiado/)	87
Εικόνα 36: Ροή της πτυχιακής εργασίας	92
Εικόνα 37: Ροή ανάκτησης δορυφορικών εικόνων από το Copernicus Open Access Hub	93
Εικόνα 38: Ορισμός κριτηρίων αναζήτησης (Πηγή: https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home)	94
Εικόνα 39: Δυνατότητες - χαρακτηριστικά (Πηγή: https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home).....	95
Εικόνα 40: Η ροή (προ-)επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων SAR.....	96
Εικόνα 41: Η ροή των εντολών που εφαρμόζονται μέσω του GraphBuilder	96
Εικόνα 42: Εργαλείο μαζικής επεξεργασίας “Bach Processing”	97
Εικόνα 43: Εργαλείο δημιουργίας γραφήματος αλυσιδωτών εντολών επεξεργασίας “Graph Builder”..	98
Εικόνα 44: Παραμετροποίηση ιστογράμματος προς τον εντοπισμό του κατωφλιού	100
Εικόνα 45: Δημιουργία εξίσωσης στο “Band Math”	101
Εικόνα 46: Διαδικασία επιλογής κατάλληλου κατωφλιού.....	102
Εικόνα 47: Διαδικασία εισαγωγής στο Qgis και εξαγωγής σε KML	105
Εικόνα 48: Εξέλιξη πλημμυρικού φαινομένου στο οροπέδιο Λασιθίου κατά την περίοδο 3/1/2020 έως 10/1/2020.....	107

<i>Εικόνα 49: Εξέλιξη πλημμυρικού φαινομένου στο οροπέδιο Λασιθίου κατά την περίοδο 3/4/2020 έως 9/4/2020.....</i>	<i>108</i>
<i>Εικόνα 50: Εξέλιξη πλημμυρικού φαινομένου στο οροπέδιο Λασιθίου κατά την περίοδο 4/11/2020 έως 11/11/2020.....</i>	<i>109</i>
<i>Εικόνα 51: Χάρτης μεταβολής στάθμης ύδατος στην τεχνητή λίμνη Αποσελέμη κατά την περίοδο 3/1/2020 έως 10/1/2020</i>	<i>110</i>
<i>Εικόνα 52: Χάρτης μεταβολής στάθμης ύδατος στην τεχνητή λίμνη Αποσελέμη κατά την περίοδο 3/4/2020 έως 9/4/2020</i>	<i>111</i>
<i>Εικόνα 53: Χάρτης μεταβολής στάθμης ύδατος στην τεχνητή λίμνη Αποσελέμη κατά την περίοδο 4/11/2020 έως 11/11/2020</i>	<i>111</i>

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Υψομετρικά στοιχεία κορυφών της οροσειράς Δίκη 20	20
Πίνακας 2: Γεωχωρικά δεδομένα..... 84	84
Πίνακας 3: Δορυφορικές εικόνες που ανακτήθηκαν (Πηγή: https://scihub.copernicus.eu/) 86	86
Πίνακας 4: Απώλεια δεδομένων του μετεωρολογικού σταθμού λόγω βλάβης, κατά τις ημερομηνίες λήψης των δορυφορικών εικόνων Ιανουαρίου και Απριλίου (Πηγή: http://penteli.meteo.gr/stations/tzermiado/)..... 87	87
Πίνακας 5: Μετεωρολογικά στοιχεία του σταθμού Τζερμιάδων Λασιθίου για τον μήνα Ιανουάριο του 2020 (Πηγή: http://penteli.meteo.gr/stations/tzermiado/)..... 88	88
Πίνακας 6: Μετεωρολογικά στοιχεία του σταθμού Τζερμιάδων Λασιθίου για τον μήνα Απρίλιο του 2020 (Πηγή: http://penteli.meteo.gr/stations/tzermiado/) 89	89
Πίνακας 7: Μετεωρολογικά στοιχεία του σταθμού Τζερμιάδων Λασιθίου για τον μήνα Νοέμβριο του 2020 (Πηγή: http://penteli.meteo.gr/stations/tzermiado/)..... 90	90
Πίνακας 8: Τιμές κατωφλιού που επιλέχθηκαν για τη δυαδοποίηση των δορυφορικών εικόνων 103	103
Πίνακας 9: Τιμές κατωφλιού που επιλέχθηκαν για τη δυαδοποίηση των δορυφορικών εικόνων 103	103
Πίνακας 10: Τιμές κατωφλιού που επιλέχθηκαν για τη δυαδοποίηση των δορυφορικών εικόνων 104	104

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

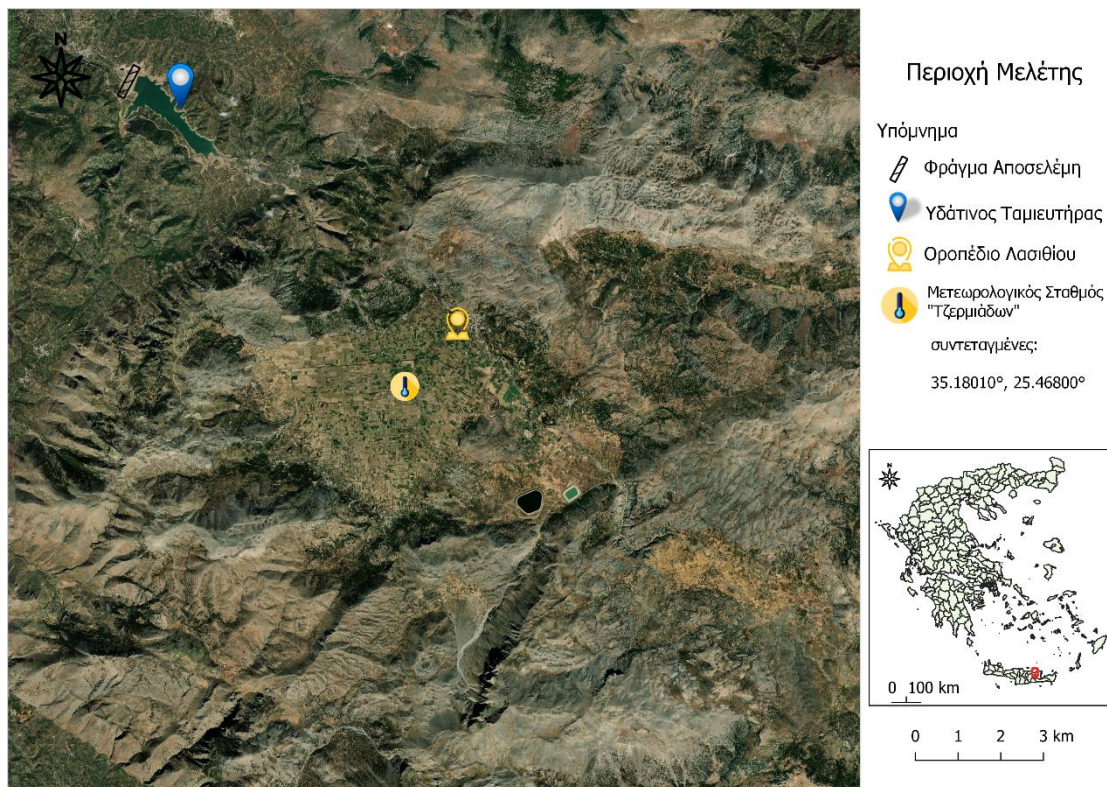
QGIS	Ελεύθερο Πρόγραμμα Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών
CEMS	Copernicus Emergency Management System
CLC	Corine Land Cover
CSA	Canadian Space Agency
DEM	Digital Elevation Model
EE	Ευρωπαϊκή Ένωση
EEA	European Environmental Agency
Eionet	Ευρωπαϊκό Δίκτυο Πληροφοριών και Παρατηρήσεων για το Περιβάλλον
ESA	European Space Agency
FOS	Flight Operations Segment
GEOSS	Global Earth Observation System of Systems
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GRD	Ground Range Detected
IW	Interferometric Wide swath
NDWI	Modified Normalised Difference Water Index
PDGS	Payload Data Ground Segment
RAR	Real Aperture RADAR
SAFE	Standard Archive Format for Europe
SAR	Synthetic Aperture Radar
SLAR	Side Looking Airborne Radar
SNAP	Sentinel Application Platform
ΓΓΠΠ	Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας
ΕΟΔ	Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος
ΕΥΔΕ	Ειδική Υπηρεσία Δημοσίων Έργων
ΖΔΥΚΠ	Ζώνη Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας
ΙΠΣΥ	Ινστιτούτο Πληροφοριακών Συστημάτων
ΙΤΥΣ	Ιδιαιτέρως Τροποποιημένα υδατικά συστήματα
Ο.Α.Κ. Α.Ε	Οργανισμός Ανάπτυξης Κρήτης Α.Ε
ΣΓΠ	Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών
ΣΓΠ	Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών
ΥΠΟΜΕΔΙ	Υπουργείο Υποδομών Μεταφορών και Δικτύων
ΨΜΕ	Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επιστήμη της τηλεπισκόπησης αναπτύσσεται με ιδιαίτερο ρυθμό, ενώ όλο και μεγαλύτερη είναι η ανάγκη παροχής μέτρων προστασίας και αποκατάστασης για τους κινδύνους και τα καταστροφικά γεγονότα που σημειώνονται, συνήθως μετά από την εκδήλωση ακραίων καιρικών φαινομένων. Στην Ελλάδα είναι σημαντική η εκπόνηση παρόμοιων μελετών, καθώς συμβάλλει στην ενίσχυση βάσεων δεδομένων σε επίπεδο περιοχής και στην δόμηση ενός ιστορικού διαθέσιμου αρχείου. Είναι περιορισμένος ο αριθμός των μονάδων διοικητικής διαίρεσης που διαθέτουν γεωπύλες δεδομένων ακόμη. Ωστόσο, υφίσταται γεωπύλη αποκεντρωμένης διοίκησης Κρήτης. Η μέθοδος της τηλεπισκόπησης για τον εντοπισμό, την αποτύπωση και την παρακολούθηση επιφανειακών υδάτων, υδάτινων δεξαμενών και πλημμυρών έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποδοτική, ακριβής και γρήγορη, στην περίοδο που συνεργούν η κλιματική αλλαγή και η αύξηση του πληθυσμού (Liuzzo et al., 2020; Yao et al., 2019; Zeng et al., 2017).

Το πλημμυρικό φαινόμενο στο οροπέδιο Λασιθίου δεν είναι πρόσφατο γεγονός. Από την περίοδο της Ενετοκρατίας για την επίλυση του φαινομένου, που οδηγούσε στην καταρράκωση των καλλιεργητικών διαδικασιών, δημιουργήθηκαν οι Λίνιες. Πρόκειται για “αυλάκια” που κατευθύνουν τα ύδατα στο Χώνο, φυσική καταβόθρα προς τον υπόγειο υδροφορέα (Κουγιουμουτζή, 2021). Πλημμυρικά γεγονότα έχουν λάβει χώρα κατ’ επανάληψη στην ίδια περιοχή. Το 2012 δημιουργήθηκε φράγμα, το οποίο δημιούργησε τον υδάτινο ταμιευτήρα Αποσελέμη με διττό ρόλο. Την υδροδότηση της πόλης του Ηρακλείου και την αντιπλημμυρική προστασία του οροπεδίου.

Το αντικείμενο της εργασίας αυτής έχει δύο άξονες, αυτόν της χαρτογράφησης πρώτον του πλημμυρικού φαινομένου και δεύτερον της μεταβολής της στάθμης στον υδάτινο ταμιευτήρα του φράγματος Αποσελέμη, που βρίσκεται βορειοδυτικά του οροπεδίου (Εικόνα 1), σε περίοδο έντονων βροχοπτώσεων. Οι παραπάνω στόχοι βασίστηκαν στη χρήση διαστημικών δεδομένων παρατήρησης της Γης Sentinel 1 του προγράμματος Copernicus. Επίσης γίνεται προσπάθεια διερεύνησης του τρόπου συμπεριφοράς του ταμιευτήρα σε σχέση με την εκδήλωση του φαινομένου. Δηλαδή, αν έχει ρόλο αποτρεπτικό, βοηθητικό ή ουδέτερο και πώς αυτός καθορίζεται.



Εικόνα 1: Εντοπίζοντας στο χάρτη: θόρεια την Υδατοδεξαμενή του Φράγματος Αποσελέμη και το φράγμα. Στο κέντρο το οροπέδιο Λασιθίου και τον μετεωρολογικό σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου (Πηγή: Google Earth,, ΜΕΤΕΟ Εθνικού Αστεροσκοπείου <https://www.meteo.gr/>)

Στη διάρκεια του έτους 2020 σημειώθηκαν τρεις διακριτές πλημμύρες, στις αρχές των μηνών Ιανουαρίου, Απριλίου και Νοεμβρίου. Το τελευταίο γεγονός καταγράφηκε στις 7/11/2020 με 314 mm βροχής και συγκαταλέγεται στα συνολικά πεντακόσια δεκατρία καταγεγραμμένα καιρικά επεισόδια, που επηρέασαν την κοινωνία και την οικονομία σε εθνικό επίπεδο στην εικοσαετή περίοδο 2000-2020, όπως αναφέρεται στον κόμβο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, ΜΕΤΕΟ. Λόγω των ισχυρών βροχοπτώσεων προκλήθηκαν και κατολισθήσεις.

Η συγκεκριμένη περιοχή έχει αρκετές ιδιαιτερότητες, έντονο ανάγλυφο και αποτελείται κυρίως από καλλιεργήσιμη γη. Στην ουσία η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στο οροπέδιο και στον υδάτινο ταμιευτήρα.

2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά

2.1.1 Το Οροπέδιο Λασιθίου

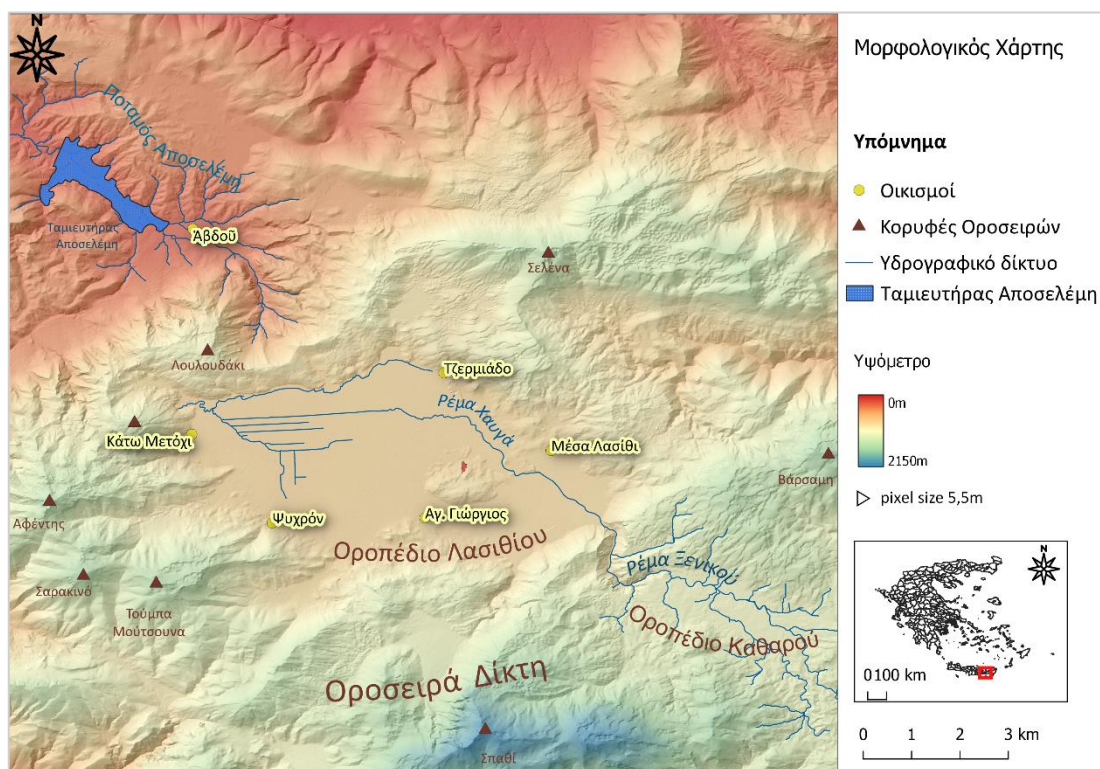
Η μορφολογία της περιοχής είναι έντονη με πληθώρα βουνοκορφών και οροπεδίων. Επικρατούν μεγάλες μορφολογικές κλίσεις και πυκνή ορεινότητα. Στην Κρήτη κυριαρχούν τρεις οροσειρές, των Λευκών Όρεων, της Ίδης και της Δίκτης (Εικόνα 2). Το οροπέδιο Λασιθίου βρίσκεται σε υψόμετρο 840 μέτρων, στο κέντρο της οροσειράς της Δίκτης. Πρόκειται για το μεγαλύτερο σε έκταση οροπέδιο της Κρήτης συγκριτικά με τα εγγύς (οροπέδιο Λιμνάκαρο και οροπέδιο Καθαρού). Εκτείνεται στη διεύθυνση Ανατολής Δύσης με μήκος 10 χιλιομέτρων και Βορρά Νότου με πλάτος 5 χιλιομέτρων. Διχοτομείται σε Ανατολικό και Δυτικό λόγω του λόφου Κεφάλαι του βρίσκεται στο εσωτερικό του. Στο μεγαλύτερο μέρος του (δυτικό) τα υπόγεια ύδατα βρίσκονται σε αφθονία (βάθος 8-16-18 μ). Αποτελεί Ειδική ζώνη διατήρησης του Ευρωπαϊκού οικολογικού δικτύου Natura 2000 (με κωδικό GR4320002), καλύπτεται από τον ευρύτερο βιότοπο CORINE (με κωδικό A00010073: Όρος Δίκη και όρος Σελένα) και αποτελεί Τοπίο Ιδιαίτερου Φυσικού Κάλλους (με κωδικό AT6011054: Οροπέδιο Λασιθίου) (Βεληβασάκης, 2014; ΥΠΕΚΑ, 2018).



Εικόνα 2: Οι οροσειρές της Κρήτης (Πηγή: www.lib.aegean.gr/)

Στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 3) αποτυπώνονται οι ψηλότερες κορυφές της οροσειράς Δίκη που οριοθετούν το οροπέδιο, καθώς και το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής μελέτης, του

φράγματος και των οροπεδίων Λασιθίου και Καθαρού. Παράχθηκε με τη δημιουργία μωσαϊκού Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους του Εθνικού Κτηματολογίου σε περιβάλλον ΣΓΠ (QGIS).



Εικόνα 3: Τοποθεσία των κορυφών της οροσειράς Δίκτη, του οροπεδίου Λασιθίου, του οροπεδίου Καθαρού, του υδάτινου ταμιευτήρα, κύριων οικισμών και ρεμάτων (Πηγή: Εθνικό Κτηματολόγιο, Open Street Map)

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 1) δίνονται τα υψομετρικά στοιχεία των υψηλότερων κορυφών της οροσειράς Δίκτη που περιβάλλουν το Οροπέδιο Λασιθίου.

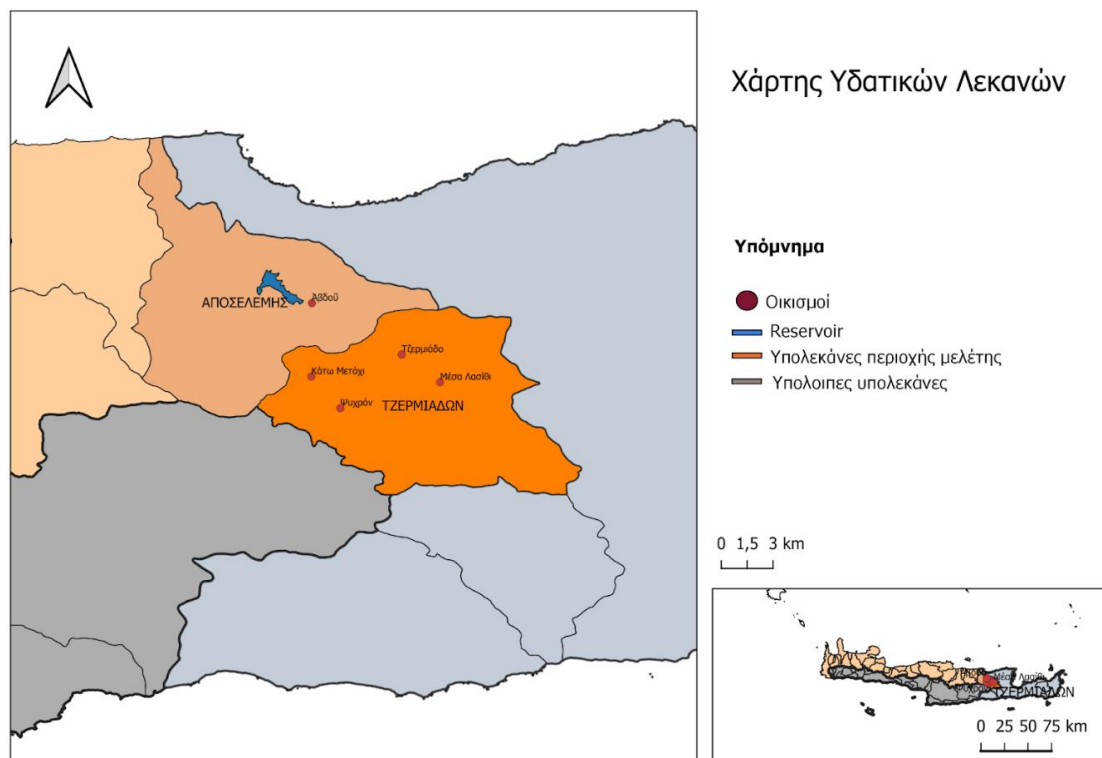
Πίνακας 1: Υψομετρικά στοιχεία κορυφών της οροσειράς Δίκτη

Νότια	Σπαθί 2.148 m , Αφέντης Χριστός 2141 m
Ανατολικά	Τζίβη ή Αλίοδα 1.664 m
Βόρεια	Σελένα 1.559 m
Βορειοδυτικά	Λουλουδάκι 1.160 m
Δυτικά	Σκλόκα 1.298 m
Νοτιοδυτικά	Σαρακινό 1.586 m, Τούμπα Μούτσουνα 1536 m, Βιργιωμένο 1.414 m, Μαγερεύτρα 1.462 m

2.1.2 Υδρολογικά χαρακτηριστικά

Προς την απόκτηση μιας ολοκληρωτικής κατανόησης των διαδικασιών που συμβάλλουν στη δημιουργία των πλημμυρών είναι απαραίτητο να σκιαγραφηθούν τα υδατικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Στο παρόν υποκεφάλαιο περιγράφονται οι συνθήκες που επικρατούν ως προς τη ροή και την πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, καθώς και τη λιθολογία στην οποία αναπτύσσεται.

Τα υδατικά διαμερίσματα της χώρας και οι λεκάνες απορροής, όπως ορίζονται σε εθνικό επίπεδο από τη Γενική Γραμματεία Υδάτων, είναι διαθέσιμα από το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής στην αντίστοιχη ιστοσελίδα (<https://ypen.gov.gr/>). Μέσω της οπτικοποίησης τους στην εθνική ανοιχτή πύλη γεωχωρικών δεδομένων (<https://geodata.gov.gr/>) γίνεται αντιληπτό, πως στην Κρήτη υφίστανται τρεις υδρολογικές λεκάνες. Συγκεκριμένα, στα ανατολικά βρίσκεται η λεκάνη «Ρεμάτων Ανατολικής Κρήτης». Από το κεντρικό τμήμα της νήσου ως τα δυτικά, με νότια τοποθέτηση, εκτείνεται η «Ρεμάτων Νοτίου Τμήματος Χανίων-Ρεθύμνου-Ηρακλείου», ενώ από τα κεντρικά με βόρεια κατεύθυνση η λεκάνη, που τοποθετείται η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας, υπό την ονομασία «Ρεμάτων Βορείου Τμήματος Χανίων-Ρεθύμνου-Ηρακλείου». Η υδρολογική λεκάνη διαιρείται σε περισσότερες μικρότερες υδρολογικές υπολεκάνες. Στην περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας απαντώνται οι υπολεκάνες “Τζερμιάδων” και “Αποσελέμης” (Εικόνα 4).



Εικόνα 4: Υδρολογικές λεκάνες Κρήτης και Υπολεκάνες Τζερμιάδων – Αποσελέμης

(Πηγή: <http://geodata.gov.gr/>)

Η λεκάνη Τζερμιάδων, στην οποία βρίσκεται το οροπέδιο Λασιθίου, δέχεται, εκτός από υδατικά κατακρημνίσματα, τα ύδατα που απορρέουν από τις οροσειρές που την ορίζουν, με σημαντικότερη την παροχή του ρέματος Χαυγά (Εικόνα 5). Προερχόμενο από σημείο υψομετρικά ανώτερο, διέρχεται από το Οροπέδιο Καθαρού (Εικόνα 5), που βρίσκεται ελαφρώς νοτιότερα, έχοντας την ονομασία «Ρέμα Ξενικού». Η είσοδος του ρέματος συναντάται στο Ανατολικό άκρο του οροπεδίου, από όπου και μετονομάζεται σε Ρέμα Χαυγά. Στη συνέχεια η πορεία του ρέματος Χαυγά συνεχίζεται κατά μήκος του βόρειου τμήματος του οροπεδίου, εμπλουτίζοντας και αρδευτικά αυλάκια «Λίνιες», ως την φυσική κατάληξη στην καταβόθρα του Χώνου (Εικόνα 5 και Εικόνα 6) στο δυτικό άκρο του, δίπλα στον οικισμό Κάτω Μετόχι. Η ροή, μετέπειτα, συνεχίζεται υπογείως, εμπλουτίζοντας τον υδροφόρο, καθώς και πολλές πηγές που βρίσκονται στα Λασιθιώτικα βουνά (Τσιούνια, 2012).

Οι επονομαζόμενες Λίνιες, λοιπόν, είναι ευθύγραμμες εκσκαφές τύπου δικτύου που απαντώνται το εσωτερικό του οροπεδίου με μήκος στο σύνολο τους περίπου 130 km². Κατασκευάστηκαν από τους Ενετούς (Λίνιες στα Λατινικά σημαίνει γραμμές) και κατόρθωσαν να μετατρέψουν τον τότε άγονο τόπο με τα λιμνάζοντα νερά, στον πιο εύφορο κάμπο της

Κρήτης, και χρησιμοποιούνται ακόμη έως και σήμερα. Έχουν ως λειτουργικό σκοπό την διασφάλιση της ύπαρξης σωστής υγρασίας του εδάφους. Μέσω των διόδων αυτών τα ύδατα οδηγούνται στο Χώνο, καρστική καταβόθρα στο Β.Δ τμήμα του οροπεδίου, μέσω της οποίας καταλήγουν στον Αποσελέμη ποταμό (Τσιούνια, 2012; ΥΠΕΚΑ, 2018).

Ο Χώνος βρίσκεται δίπλα στον οικισμό Κάτω Μετόχι (Εικόνα 5), στο χαμηλότερο υψομετρικά σημείο του οροπεδίου. Η επίγεια επανεμφάνιση των υδάτων, που εισέρχονται υπόγεια από το Χώνο, γίνεται κοντά στην Κασταμονίτσα (Εικόνα 5). Στη συνέχεια, μέσω του ποταμού Αποσελέμη οδηγούνται στην τεχνητή λίμνη Αποσελέμη (Δήμος Οροπεδίου Λασιθίου, 2022). Λόγω των έργων εκτροπής, στο ανώτερο σημείο του οροπεδίου, μέρος των υδάτων, που στην πλειοψηφία τους συγκεντρώνονται τη χειμερινή περίοδο στο Β.Δ τμήμα του και φυσικώς κατευθύνονται προς την καταβόθρα του Χώνου (Εικόνα 6), στρέφονται προς αναστροφή και συγκέντρωση σε τραπεζοειδείς τάφρους, που βρίσκονται πλησίον της εισόδου του αγωγού (Εικόνα 5). Μέσω της τεχνητής σήραγγας μήκους 3.425 m διοχετεύονται στον ταμιευτήρα του Φράγματος Αποσελέμη (ΥΠΕΚΑ, 2018).



Εικόνα 5: Το ρέμα Χαυγά, οι εκβολές ποταμού Αποσελέμη, ο Χώνος, η τεχνητή σήραγγα, η τεχνητή λίμνη Αποσελέμη και τα διυλιστήρια νερού Αποσελέμη (Πηγή: Google Earth)



Εικόνα 6: Η φυσική καταβόθρα του Χώνου στο οροπέδιο Λασιθίου. Με κίτρινα βέλη σημειώνεται το σημείο εγκοπής, μεταξύ του εδάφους και του επικλινούς βράχου, από το οποίο τα ύδατα οδηγούνται στον υπόγειο υδροφόρα (Πηγή: προσωπικό αρχείο)

Στη νήσο Κρήτη γενικώς απαντώνται εδάφη με το χαρακτηριστικό της υψηλής υδατοπερατότητας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ορεινότητα της, καθώς στην έκταση της αποτελείται από μεγάλους ορεινούς όγκους σε ποσοστό σχεδόν 50%. Στη σύσταση των οροσειρών επικρατούν κυρίως ανθρακικά πετρώματα, που επιτρέπουν την εισχώρηση μεγάλων ποσοτήτων βρόχινου ύδατος προς τον υπόγειο υδροφόρα. Στη διάρκεια του έτους, η υπόγεια διακίνηση ανέρχεται $2233 \times 106 \text{ m}^3$. Τα υπόγεια υδατικά συστήματα είναι 91 στο σύνολο τους, εκ των οποίων 47 καρστικά, 35 πορώδη και 8 ρωγμώδη (ΥΠΕΚΑ, 2018).

Πιο συγκεκριμένα το υπόγειο υδατικό σύστημα του οροπεδίου έχει την ονομασία «Πορώδες Οροπεδίου Λασιθίου». Κατέχοντας έκταση $27,02 \text{ km}^2$ και μέγιστη ικανότητα αποδοχής 5 εκ. m^3 νερού, αξιοποιείται από τα 15.000 πηγάδια αρδευτικού σκοπού της μόνιμα αρδευόμενης γης του οροπεδίου, όπως αναφέρεται (βλ. ενότητα 2.2) (ΥΠΕΚΑ, 2018).

Σε αντίθεση με την υψηλή εδαφική διαπερατότητα της νήσου, στο οροπέδιο Λασιθίου η διαπερατότητα είναι μικρή (*Εικόνα 7*). Στη συγκεκριμένη περιοχή η κατείσδυση λοιπόν είναι μια διαδικασία που γίνεται με αργό ρυθμό. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την απουσία εδαφικών κλίσεων δρα επιβαρυντικά, αυξάνοντας την πιθανότητα συγκέντρωσης στάσιμων επιφανειακών υδάτων σε περιόδους που υφίσταται έντονη βροχόπτωση εντός μικρού χρονικού διαστήματος (ΥΠΕΚΑ, 2018).

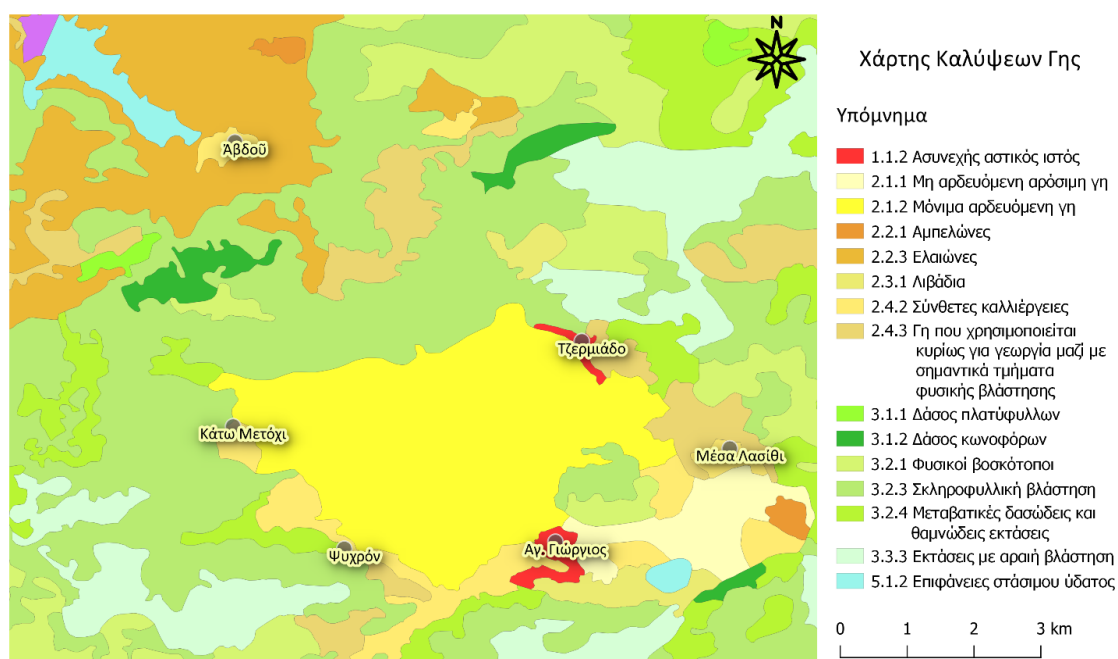


Εικόνα 7: Υδρολιθολογικός χάρτης υπολεκάνης Τζερμιάδων (Πηγή: Ειδική Γραμματεία Υδάτων - Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας <https://floods.ypeka.gr/>)

Η επιμήκης λεκάνη απορροής Αποσελέμη (Εικόνα 4) καλύπτει 118,6 km² (Τσιούνια, 2012). Ο Αποσελέμης ποταμός σχηματίζει δενδριτικό δίκτυο, το οποίο διακρίνεται απλουστευτικά από δύο κύριους κλάδους. Ο πρώτος εμφανίζεται στην περιοχή της Κασταμονίτσας και ο έτερος στο φαράγγι Άμπελος στο νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης, το οποίο χαρακτηρίζεται από έντονα καρστικοποιημένους ασβεστόλιθους. Από τη συνένωση των δύο κλάδων δημιουργείται κλάδος μεγαλύτερης τάξης στο κεντρικό τμήμα, στο οποίο επικρατούν ήπιες κλίσεις ψαμμιτών και σχιστόλιθων (Τσιούνια, 2012). Τα ύδατα οδηγούνται στην προστατευόμενη περιοχή των εκβολών και καταλήγουν στον μεγαλύτερο υδάτινο υποδοχέα, τη θάλασσα. Στην υδρολογική αυτή λεκάνη βρίσκεται και το φράγμα Αποσελέμη που έχει δημιουργήσει την ομώνυμη τεχνητή λίμνη (Εικόνα 11).

2.2 Ανθρωπο-Γεωγραφικά χαρακτηριστικά

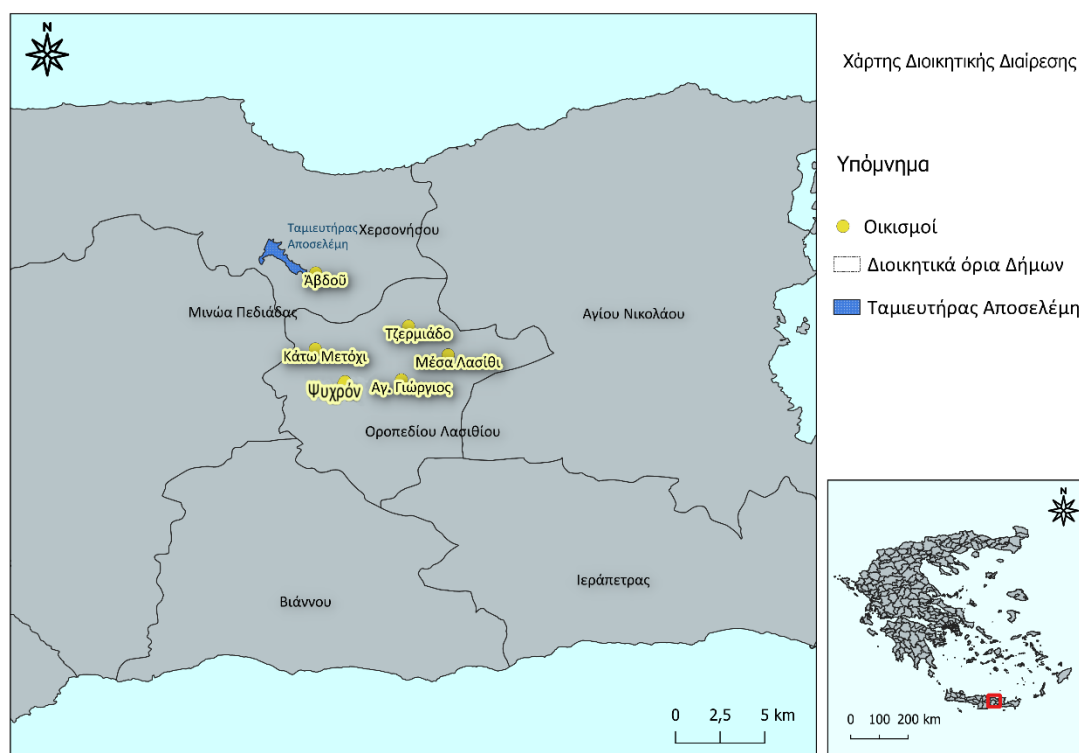
Η κύρια κάλυψη που απαντάται στο οροπέδιο Λασιθίου είναι η μόνιμα αρδευόμενη γη (Εικόνα 8), η οποία περιβάλλεται από σκληροφυλλική βλάστηση, βάσει των καλύψεων γης κατά Corine Land Cover 2018. Η περιοχή γύρω από την υδατοδεξαμενή κυριαρχείται από ελαιώνες. Στα νότια του οροπεδίου υφίστανται και δυο αρδευτικές λιμνοδεξαμενές, του Αγ.Γεωργίου που είναι σχετικά νεαρή και του Χαυγά που μετρά πάνω από είκοσι έτη (ΥΠΕΚΑ, 2018). Οι καλλιεργούμενες εκτάσεις 12.000 στρεμμάτων, συμβατικής και βιολογικής μεθόδου, αποτελούν τον τόπο εργασίας 4.000 κατοίκων, που αντιστοιχεί σχεδόν στο μισό πληθυσμό του οροπεδίου (47,3%). Στην έκταση του οροπεδίου βρίσκεται περίπου το 1/5 από τα συνολικά 629 km² αγροτικών εκτάσεων του Λασιθίου. Η υψηλή υψομετρική τοποθέτηση αποδίδει διεύρυνση της καλλιεργητικής περιόδου έως και τον θερινό μήνα του Αυγούστου (Κουγιουμουτζή, 2021).



Εικόνα 8: Καλύψεις γης κατά Corine Land Cover 2018 (Πηγή: Copernicus Land Monitoring Service 2018

<https://land.copernicus.eu/>)

Η περιοχή μελέτης καλύπτει τμήμα από δύο Καλλικρατικούς Δήμους (Εικόνα 9), του ομώνυμου και της Χερσονήσου. Ο Δήμος Χερσονήσου έχει προκύψει από τη συνένωση τεσσάρων πρώην ΟΤΑ του συστήματος Καποδίστρια, ενώ ο Δήμος Οροπεδίου παραμένει στα ίδια όρια με έκταση 130 km² και 2387 μόνιμους κατοίκους (ΕΛΣΤΑΤ, 2011). Το μεγαλύτερο μερίδιο του πληθυσμού του δήμου ανήκει στην ηλικιακή ομάδα άνω των 65, που αντιστοιχεί στο 43,57% του συνόλου των κατοίκων, βάσει της απογραφής του 2011 της ΕΛΣΤΑΤ. Ακόμη, ο εξαρτώμενος πληθυσμός υπερτερεί έναντι του ενεργού, με ποσοστό 52,95%. Στο οροπέδιο απαντώνται πολλοί μικροί οικισμοί, με σημαντικότερους το Τζερμιάδο, τον Αγ. Γεώργιο και το Μέσα Λασιθί (Εικόνα 9) (ΥΠΕΚΑ, 2018).



Εικόνα 9: Δήμος Οροπεδίου Λασιθίου και όμοροι Δήμοι (Πηγή: <http://geodata.gov.gr/>)

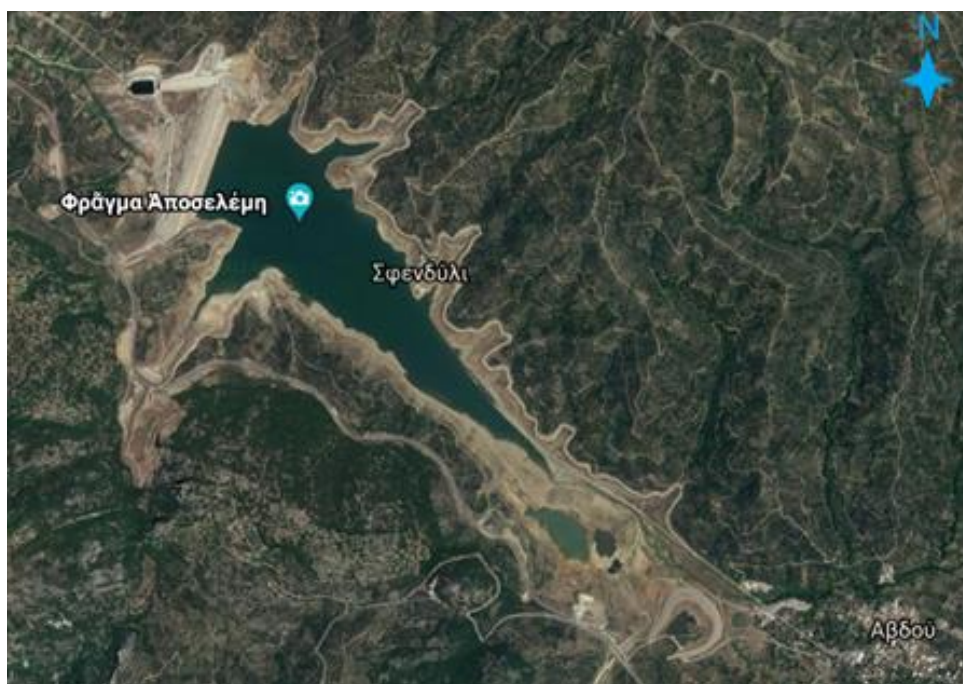
Οι οικισμοί του οροπεδίου είναι προσβάσιμοι μέσω του δευτερεύοντος εθνικού δικτύου που συνδέει τον οικισμό της Χερσονήσου με το Τζερμιάδο και τη Νεάπολη (Εικόνα 10). Μέσω του δευτερεύοντος εθνικού οδικού δικτύου γίνεται η εξυπηρέτηση των μετακινήσεων μεταξύ των οικισμών που βρίσκονται περιμετρικά του οροπεδίου. Εκτεταμένο δίκτυο γεωργικών οδών υφίσταται στο καλλιεργήσιμο τμήμα του.



Εικόνα 10: Οδικό δίκτυο σύνδεσης μεταξύ των οικισμών του οροπεδίου Λασιθίου και οδοί επικοινωνίας με τη Χερσόνησο και τη Νεάπολη (Πηγή: Google Earth, <https://earth.google.com/>)

2.3 Φράγμα Αποσελέμη και ο Υδάτινος Ταμιευτήρας

Το Φράγμα Αποσελέμη είναι λιθόρριπτη (από χώμα) κατασκευή κεντρικού πυρήνα. Τοποθετείται στην Περιφερειακή Ενότητα Ηρακλείου, με ακριβείς συντεταγμένες $35^{\circ}14'56.69''\text{N}$ $25^{\circ}24'00.91''\text{E}$ (Εικόνα 11). Κύριος του έργου κατά την κατασκευή ήταν το Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (ΥΠΕΧΩΔΕ), με προϊσταμένη υπηρεσία τη Διεύθυνση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης Δ6. Πλέον, υπεύθυνος διαχείρισης είναι το Ελληνικό Δημόσιο μέσω του Υπουργείου Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων (ΥΠΟΜΕΔΙ), όπως μετονομάστηκε το 2009 το ΥΠΕΧΩΔΕ, υπό την εποπτεία της δημόσιας κτηματικής υπηρεσίας του Οργανισμού Ανάπτυξης Κρήτης (ΟΑΚ) (Καββαλάκης, 2017). Η κατασκευή του φράγματος Αποσελέμη (Εικόνα 11) αποτέλεσε το αντικείμενο πολλών ερευνών από το 1972, που στο σύνολο τους δεν ολοκληρώνονταν και μετατίθονταν σε επόμενο χρόνο. Η κήρυξη της προκαταρκτικής μελέτης της Νομαρχίας του δήμου Ηρακλείου του 1972 οδήγησε σε καταληκτική ολοκλήρωση και έγκριση της μελέτης το 2000, μέσω της σύμβασης του ΥΠΕΧΩΔΕ του 1997 (Τσιούνια, 2012).



Εικόνα 11: Το φράγμα και η υδατοδεξαμενή του Αποσελέμη ποταμού (Πηγή: Google Earth)

Το συνολικό έργο με τίτλο “Υδρευση Ηρακλείου Αγ. Νικολάου από το φράγμα Αποσελέμη” έχει τέσσερις πτυχές (Μάλλη, 2017):

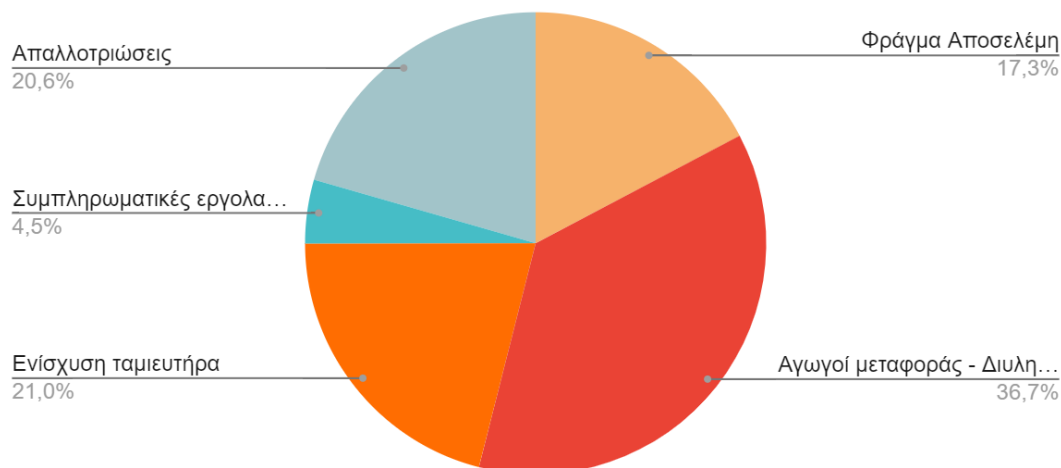
- Κατασκευή φράγματος και συνοδών έργων
- Διυλιστήριο, Υδραγωγεία προς Ηράκλειο και Άγιο Νικόλαο
- Σήραγγα οροπεδίου Λασιθίου
- Εργασίες παρακολούθησης πρώτης πλήρωσης του ταμιευτήρα

Την κατασκευή φράγματος και ταμιευτήρα ανέλαβαν μετά από διαγωνισμό του 2004 οι εταιρείες του ομίλου ΕΛΛΑΚΤΩΡ ΑΕ, ΑΚΤΩΡ ΑΤΕ και η θυγατρική της ΤΟΜΗ ΑΒΕΤΕ στις 30/6/2005 με συμφωνηθέν ποσό 27.894.981,36 εκ. ευρώ.

Σκοπό έχει τη συγκέντρωση νερού προς υδροδότηση του Ηρακλείου και του Αγ. Νικολάου (Μάλλη, 2017; Νιφάκου & Σαρλά, 2013). Η ετήσια κατά μέσο όρο προσφερόμενη ποσότητα στο ήδη υπάρχον δίκτυο υπολογίζεται στα 17 εκ. m³, από τον υδάτινο ταμιευτήρα χωρητικότητας 36.200 x 10³ m³ και επιφάνειας 1.600 x 10³ m². Ταυτόχρονα εξυπηρετούνται έξι δήμοι και δεκαεννιά οικισμοί, λόγω της συνδεσιμότητας που έχει αναπτυχθεί μεταξύ των υδραγωγείων (Καββαλάκης, 2017). Το εξαιρετικής σημασίας έργο προσφέρει λύση στην προβληματική κατάσταση της ανυδρίας που αντιμετωπίζει η Κρήτη, ιδιαιτέρως τη θερινή περίοδο, που οι απαιτήσεις αυξάνονται λόγω των καταλυμάτων και της τουριστικής δραστηριότητας. Παράλληλα, η κατασκευή του έργου αναμενόταν να συμβάλει στην αποσυμφόρηση των πλημμυρικών υδάτων του οροπεδίου (ΥΠΕΚΑ, 2018).

Από το 2012, αφότου ολοκληρώθηκε η πρώτη φάση του έργου « Κατασκευή του φράγματος Αποσελέμη », τα έργα και οι μελέτες, που βρίσκονταν σε εξέλιξη και που προηγουμένως κατείχε η Ειδική Υπηρεσία Δημοσίων Έργων (ΕΥΔΕ) Αποσελέμη, μεταφέρθηκαν στον Οργανισμό Ανάπτυξης Κρήτης Ο.Α.Κ. Α.Ε (ίδρυση ΦΕΚ 1473/18-06-2013), αρχής γενομένης από την 1/1/2014. Η μεταβίβαση αφορά στη δικαιοδοσία της εποπτείας, επίβλεψης και άμεσου ελέγχου της μελέτης, της κατασκευής, της διαχείρισης και της λειτουργίας των έργων της ύδρευσης Ηρακλείου Κρήτης και Αγίου Νικολάου από το Φράγμα Αποσελέμη (σήραγγα Αποσελέμη,

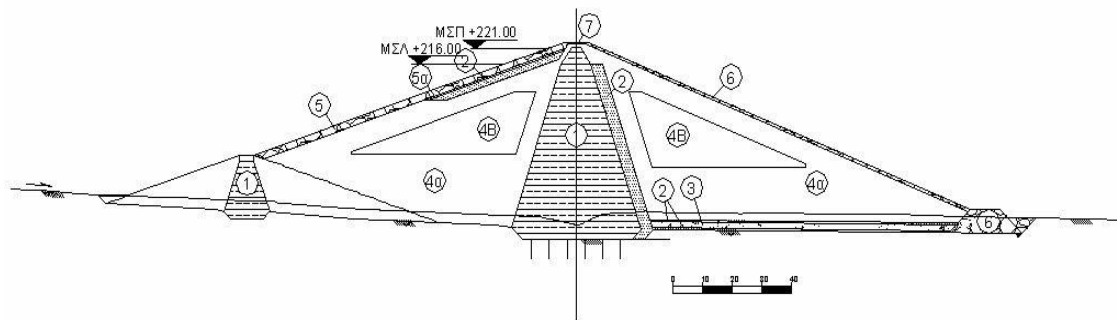
φράγμα - ταμιευτήρας Αποσελέμη, ΕΕΝ Αποσελέμη, αγωγοί- υδραγωγεία, σήραγγες (Σ1, Σ2, Βραχασίου), ΦΔΕ, αντλιοστάσια κλπ) (Ν.4138/2013 άρθρο 3). Ο διαμοιρασμός του συνολικού κόστους στους τομείς του έργου φαίνεται στο ακόλουθο γράφημα (Εικόνα 12).



Εικόνα 12: Τα κόστη ολοκλήρωσης του έργου ανά τομέα όπως παρουσιάστηκαν από την ΕΥΔΥΕ (Πηγή: Παρουσίαση διαθέσιμη από <https://slideplayer.gr/slide/2613064/>)

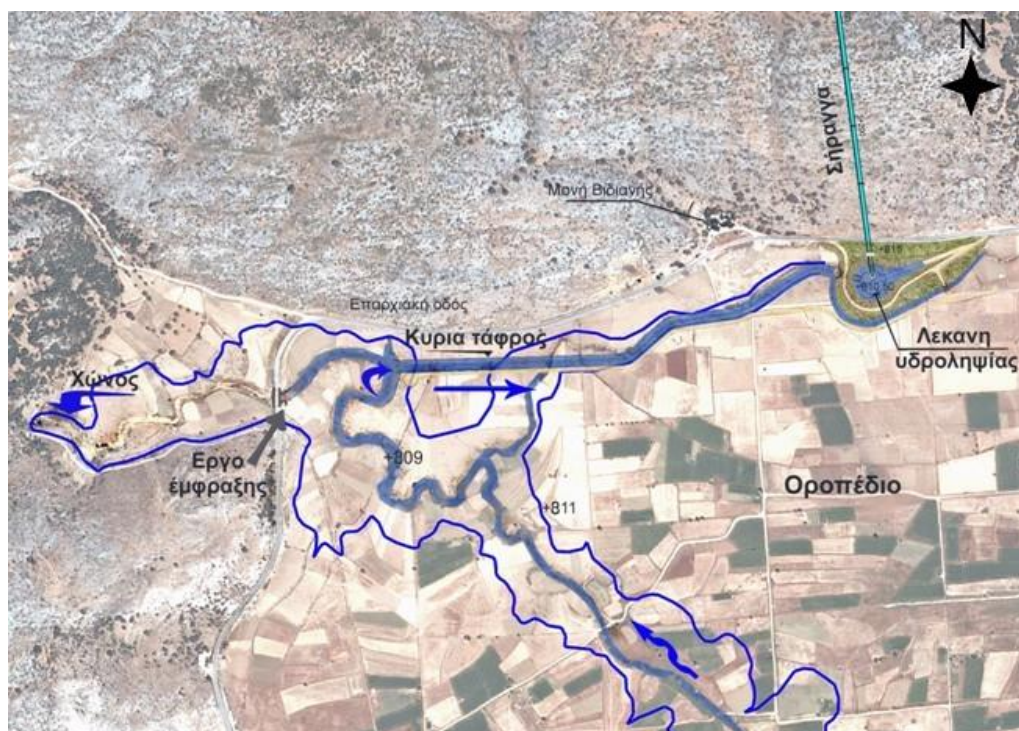
Στη συνέχεια ο Οργανισμός Ανάπτυξης Κρήτης (ίδρυση ΦΕΚ 1473/18-06-2013) ανέλαβε την περάτωση της δεύτερης φάσης “Εργασίες εκτροπής μεταφοράς υδάτων και κατασκευής αγωγών και διωλιστηρίων” στις 24/10/2006 με κόστος 82 εκ ευρώ. Η τελική φάση «Έργα ενίσχυσης ταμιευτήρα φράγματος Αποσελέμη από το οροπέδιο Λασιθίου» ολοκληρώθηκε στις 3 Ιουνίου 2019.

Το φράγμα (Εικόνα 13) είναι χωμάτινο, εκτείνεται περίπου σε 2 km², με ύψος 62.5 m, με πλάτος βάσης 320 m, μήκος στέψης 660 m και όγκο αναχώματος 3.5 εκ. m³. Η υδάτινη δεξαμενή που δημιουργείται μπορεί να δεχθεί 27,3 εκ. m³ νερού, με ανώτατη στάθμη +221m (Πηγή: Νιφάκου & Σαρλά, 2013).



Εικόνα 13: Τυπική διατομή φράγματος Αποσελέμη: 1) Πυρίνας, 2) Φίλτρο, 3) Στραγγιστήριο, 4α) Σώματα στήριξης (αποσαθρωμένος φυλλίτης), 4β) Σώματα στήριξης (βραχώδη προϊόντα φυλλίτη), 5) Ζώνη κυματοπροστασίας, 5α) Μεταβατική ζώνη, 6) Ζώνη προστασίας κατάντη πρανούς, 7) Στέψη (βάση και ασφαλτικές στρώσεις) (Πηγή: Νιφάκου & Σαρλά, 2013)

Τα έργα εκτροπής στο οροπέδιο Λασιθίου συμβάλλουν στην ταχύτερη υδατική ενίσχυση του ταμειυτήρα. Πρόκειται για έργο που αποτελείται από τα επιμέρους ακόλουθα έργα (Αγαπάκης, 2015): έργο έμφραξης του τμήματος του ρέματος Χαυγά που οδηγεί τα ύδατα στο Χώνο και την εκσκαφή τάφρου, για τη συγκέντρωση των υδάτων στη λεκάνη υδροληψίας, που βρίσκεται στο σημείο έναρξης της τεχνητής σήραγγας (Εικόνα 14).



Εικόνα 14: Έργα εκτροπής οροπεδίου Λασιθίου μεταξύ του Χώνου και της τεχνητής σήραγγας (Πηγή: Αγαπάκης, 2015)

Η διάνοιξη της σήραγγας εξυπηρετεί την ενίσχυση της λεκάνης υδροληψίας. Έχει διάμετρο 4,10 m και διατηρεί κλίση 15%. Από το σημείο εισόδου (Ι. Μονή Βιδιανής) έως και την έξοδο (χωριό Γωνιές) υφίσταται υψομετρική διαφορά πεντακοσίων μέτρων (Καββαλάκης, 2017). Τα έργα καταστροφής της ενέργειας του αγωγού, μέσω των βαλβίδων Howell-Bunger, εξυπηρετούν την εκτόνωση της ορμής και την ομαλή είσοδο στη λίμνη και αποτελούν αντικείμενο μελέτης προς υδροηλεκτρική αξιοποίηση. Στο Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης και Εφαρμογών σε Αστικό και Φυσικό Περιβάλλον του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας του Ηρακλείου Κρήτης, αποτυπώθηκε η εμφανής συμβολή της σήραγγας-αγωγού στην αύξηση του όγκου της υδάτινης μάζας της δεξαμενής τον Ιανουάριο του 2019 σε σχέση με τον Ιανουάριο του 2018 (RSlab ITE, 2019). Οι μονάδες διύλισης βρίσκονται μόλις λίγα χιλιόμετρα μακριά από το φράγμα.

3 ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

3.1 Ορισμοί

Σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60/EK ως πλημμύρα ορίζεται “η προσωρινή κατάκλυση του εδάφους από νερό, το οποίο υπό κανονικές συνθήκες δεν είναι καλυμμένο από νερό. Η έννοια αυτή περιλαμβάνει πλημμύρες από ποτάμια, ορεινούς χείμαρρους και υδατορέματα εφήμερης ροής, υπερχειλίσσεις λιμνών, πλημμύρες από υπόγεια ύδατα, πλημμύρες από τη θάλασσα σε παράκτιες περιοχές, καθώς και πλημμύρες που προκαλούνται από θαλάσσια κύματα βαρύτητας. Ακόμη, περιλαμβάνει πλημμύρες από καταστροφές μεγάλων υδραυλικών έργων, όπως θραύσεις αναχωμάτων και φραγμάτων”.

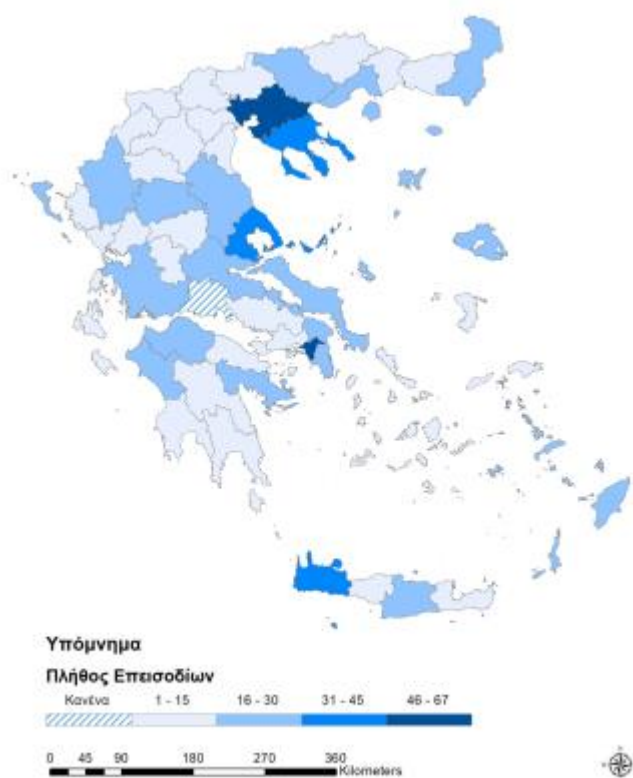
Ο πλημμυρικός κίνδυνος ορίζεται ως “ο συνδυασμός της πιθανότητας να λάβει χώρα πλημμύρα και των δυνητικών αρνητικών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται μ’ αυτή την πλημμύρα”. Υποστηρίζεται γενικότερα πως είναι ένα από τα πιο καταστροφικά φαινόμενα με τη μεγαλύτερη συχνότητα, την μεγαλύτερη οικονομική ζημία (ESA ; Moharrami et al., 2021). Στον ελλαδικό χώρο λαμβάνει χώρα υπό την μορφή αιφνίδιας πλημμύρας (flash flood) που προκαλείται από ισχυρής έντασης και μικρής διάρκειας φαινομένων ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, με συχνότητα μικρότερη από τις πυρκαγιές (ΓΓΠΠ, 2019). Βέβαια, η εκδήλωση δεν εξαρτάται μόνο από την επίδραση της ατμόσφαιρας, αλλά από μία σειρά παραγόντων όπως το τοπογραφικό ανάγλυφο, η κατάσταση του εδάφους (κορεσμένο σε υγρασία/ άνυδρο) και ο τύπος κάλυψης γης (αποψιλωμένο, με αστική κάλυψη)(ΓΓΠΠ, 2019).

3.2 Το πλημμυρικό φαινόμενο στην Ελλάδα και στο Οροπέδιο

Η αποτύπωση των πλημμυρικών γεγονότων στο εύρος της τελευταίας εικοσαετίας για το σύνολο της χώρας μας (Εικόνα 15) δείχνει πως συγκεκριμένοι νομοί αντιμετωπίζουν σοβαρότατη συχνότητα, ωστόσο ο Νομός Λασιθίου βρίσκεται στη χαμηλότερη κλίμακα της κατάταξης.

Όπως προαναφέρθηκε, για την περιοχή μελέτης είναι σύνηθες φαινόμενο, με σημαντικές ιστορικά πλημμύρες να έχουν καταγραφεί τα έτη 1970, 1971, 1985 και 2011. Συγκεκριμένα το 2011 καταγράφηκαν, στο μετεωρολογικό σταθμό του Αγ.Γεωργίου οι μετρήσεις 165 mm σε 24h

και 245 mm σε 48h και στον σταθμό Αβδού του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων 180 mm σε 24h και 278,5 mm σε 48h (ΥΠΕΚΑ, 2018).



Εικόνα 15: Κατανομή των πλημμυρικών γεγονότων για το διάστημα 2000-2020 (Πηγή: ΜΕΤΕΟ Εθνικού Αστεροσκοπίου)

Οι μηχανισμοί που συντελούν στην εκδήλωση του φαινομένου είναι, είτε οι επιφανειακές απορροές, είτε οι υπερχειλίσες του αλλουβιακού του ρέματος (ΥΠΕΚΑ, 2018). Στην πρώτη περίπτωση, ο κατά μεγάλο βαθμό περίσσιος όγκος των υδάτων και φερτού υλικού του ρέματος, που συγκεντρώθηκε από το οροπέδιο Καθαρού, εισχωρεί στις καλλιεργητικές εκτάσεις, εφόσον ξεπερνά την ικανότητα μεταφοράς που διαθέτει η διατομή της κοίτης του στο εσωτερικό του οροπεδίου. Ακόμη, το ίδιο συμβαίνει και στα αποστραγγιστικά κανάλια. Στην δεύτερη περίπτωση, συμβάλει η μη ευνοϊκή γεωλογική διαστρωμάτωση, καθώς και η μείωση της δυναμικής του Χώνου, λόγω της

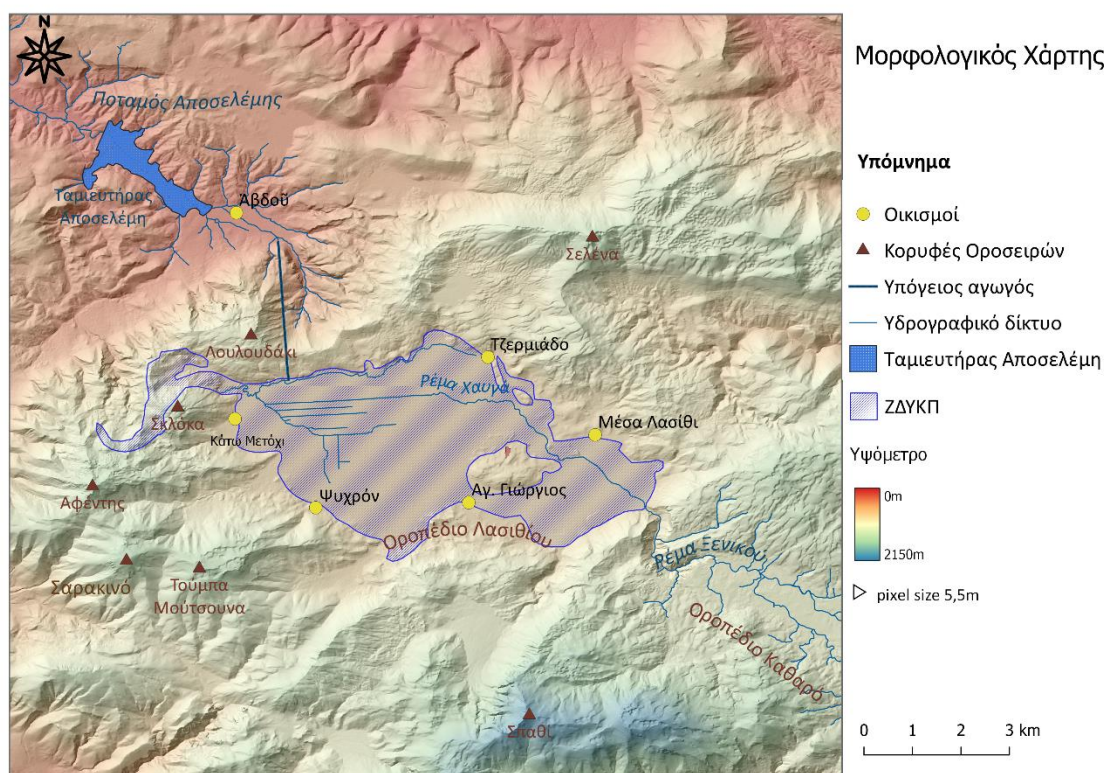
σώρευσης απορριμμάτων και δομικών υλικών.

Η εκτίμηση των εσωτερικών υδάτων είναι απαραίτητη για τη συμβολή στις καταστάσεις εκτάκτων αναγκών, στη μελέτη του τρόπου λειτουργίας του υδρολογικού κύκλου, προς το σχεδιασμό κατάλληλων και βιώσιμων στρατηγικών.

3.3 Σχέδια διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας

Η έκθεση του Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας (ΣΔΚΠ) του υδατικού διαμερίσματος Κρήτης, φέροντας την υπογραφή του ΥΠΕΚΑ και κοινοπραξίας ενός αριθμού μελετητικών γραφείων, συντάχθηκε το 2014. Πρόκειται για την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2007/60/ΕΚ, σχετικά με την αξιολόγηση και χαρτογράφηση περιοχών που είναι πιθανό να κινδυνεύσουν.

Αναγνωρίζεται, λοιπόν, μέσω του συγκεκριμένου σχεδίου η «Χαμηλή ζώνη λεκάνης οροπεδίου Λασιθίου» (Εικόνα 16), με κωδικό GR13RAK0008, ως Ζώνη Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (ΖΔΥΚΠ). Η περιοχή έχει έκταση 27.20 km² και βρίσκεται στο χαμηλό τμήμα της υδρολογικής λεκάνης του οροπεδίου Λασιθίου. Η καλλιεργητική χρήση επικρατεί, ενώ απαντώνται δεκατρείς μικροί οικισμοί, όπως το Τζερμάδο, ο Αγ. Γεώργιος, το Μαρμακέτο, το Μέσα Λασιθί και το Καμινάκι. και περιλαμβάνονται και οι λιμνοδεξαμενές του Αγ. Γεωργίου και του Χαυγά. Πιο συγκεκριμένα η κλίση της θεωρείται επίπεδη, εφόσον κατά 84% είναι μικρότερη του 5%. Το 90% αφορά ετήσιες καλλιέργειες και υπάρχουν επτά θέσεις που σώζονται αρχαία λείψανα και δύο θέσεις οικισμών της μινωικής περιόδου. Τα κριτήρια αξιολόγησης της δυνητικής επικινδυνότητας των περιοχών ήταν οι διοδεύσεις των πλημμυρών του ρέματος Χαυγά, που εφαρμόστηκαν για τρεις περιόδους αναφοράς (T=50, 100 και 1000 έτη) με τα στοιχεία του υετογραφήματος της λεκάνης απορροής με το λογισμικό MIKE FLOOD (ΥΠΕΚΑ, 2018).



Εικόνα 16: Εντοπισμός της Ζώνης Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (ΖΔΥΚΠ) «Χαμηλή ζώνη λεκάνης οροπεδίου Λασιθίου» στο μορφολογικό χάρτη (Πηγή: Εθνικό Κτηματολόγιο, Open Street Map, ΥΠΕΚΑ)

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν πως η συμπεριφορά του βορειοδυτικού άκρου του οροπεδίου είναι ανάλογη με εκείνη ενός ταμιευτήρα, λόγω της μοναδικής παρουσίας αποστραγγιστικής οδού, του «Χώνου». Η παρατήρηση για την κατάκλυση οικισμών ήταν αρνητική (ΥΠΕΚΑ, 2018).

3.4 Επιπτώσεις και εκτιμήσεις

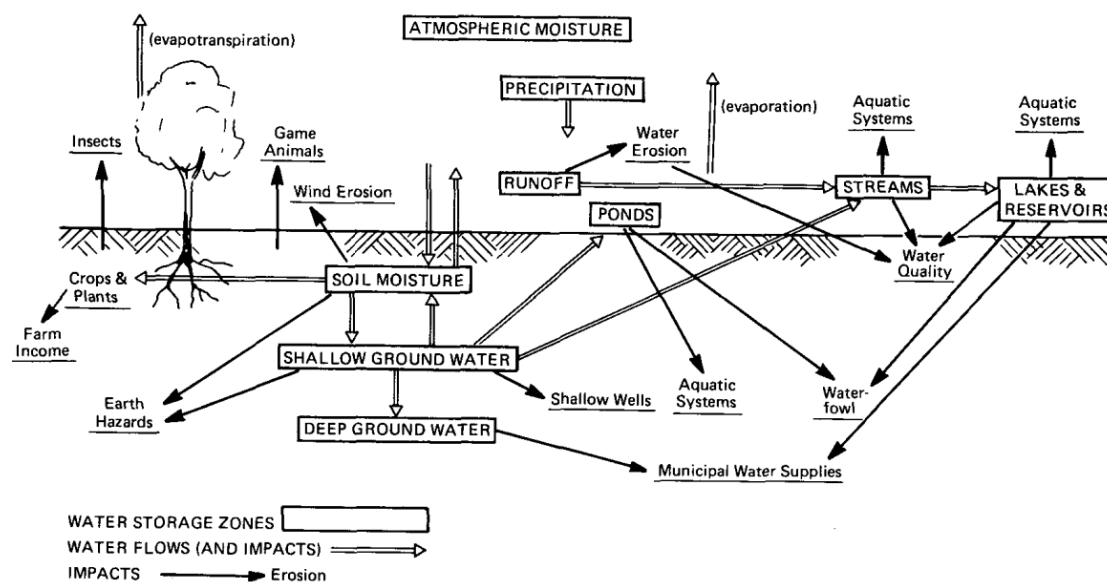
Ακόμη, και σήμερα, παρόλο που έχουν οριστεί οι αιτίες που οδηγούν στην πρόκληση των πλημμυρών, κι ενώ έχουν υπάρξει πολλές μελέτες σχετικά για τον μετριασμό και τη διαχείριση τους, μπορούν να δράσουν σε μεγάλη κλίμακα αφαιρώντας πολλές ζωές και καταστρέφοντας οικοδομικές-τηλεπικοινωνιακές δομές, επηρεάζοντας την κοινωνία, την οικονομία και το περιβάλλον (Βεληβασάκης, 2014). Πρόσφατο παράδειγμα η πλημμύρα του ποταμού Δούναβη το 2002. Διήρκεσε τρεις εβδομάδες και επεκτάθηκε σε τρεις χώρες (Αυστρία, Γερμανία, Τσεχία) με συνολικό κόστος περισσότερες από εκατό 100 ανθρώπινες ζωές και ζημίες 15 δισ. ευρώ (Risk Management Solutions, 2002).

Οι επιστημονικές εκτιμήσεις, λαμβάνοντας υπόψη την ταυτόχρονη δράση της κλιματικής αλλαγής και την αύξηση της δόμησης σε παρόχθιες περιοχές, συμφωνούν πως αναμένεται να αυξάνονται όλο και περισσότερο με την πάροδο των ετών, ενώ ήδη η συντριπτική πλειοψηφία (83%) των μέτρων πολιτικής προστασίας που λαμβάνονται από την Ευρώπη αφορούν σε αυτό το φαινόμενο (ESA). Σε αντίθεση με τις προβλέψεις προγενέστερων μελετών, πρόσφατη μελέτη (Tellman, 2021) επιβεβαιώνει την αύξηση του ποσοστού ανθρώπων που βρίσκονται σε πλημμυρικό κίνδυνο κατά περίπου 4%, μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη αύξηση από το αναμενόμενο (ESA; Tellman et al., 2021).

3.5 Αντιμετώπιση

Η δυσκολία κατανόησης των επαναλαμβανόμενων καιρικών μοτίβων, αλλά και της γενικότερης επίδρασης τους, οφείλεται στην απουσία συγκεντρωτικών βάσεων δεδομένων σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο με πληροφορίες για προηγούμενα περιστατικά (Creutin & Borga, 2003). Η κατανόηση των επιπτώσεων των πλημμυρικών γεγονότων είναι καθοριστικής σημασίας για τις δράσεις άμεσης ανταπόκρισης και διαχείρισης (Mehta et al., 2019). Προς αυτή την κατεύθυνση έχει οριστεί η ευρωπαϊκή οδηγία 2007/60EC, που θεσπίζει ως υποχρέωση των κρατών μελών την αξιολόγηση των πλημμυρικών κινδύνων, τη σύνταξη χαρτών επικινδυνότητας και σχεδίων

διαχείρισης. Παρακάτω (Εικόνα 17) αποτυπώνονται οι επιδράσεις των διαφόρων διαδρομών που ακολουθεί η ροή των υδάτων, εντός του υδρολογικού κύκλου από και προς τα σημεία όπου απαντώνται οι συγκεντρώσεις του.



Εικόνα 17: Το τοπίο του νερού – η διατύπωση των ροών του υδάτινου κύκλου σε μετρήσιμες παραμέτρους (Πηγή: Mehta et al., 2019)

Παράδειγμα της συμβολής που δύνανται να έχουν τα δορυφορικά συστήματα στην πρόληψη των καταστροφών είναι η περίπτωση του προσφυγικού καταυλισμού Cox's Bazar στο Bangladesh, που μελετήθηκε το 2018 βάσει εικόνων Sentinel 1 εκδίδοντας προειδοποίηση μεγάλης επικινδυνότητας σε πλημμύρα (ESA; Macdonald & Hoque, 2021). Το 2021 το αναπόφευκτο συνέβη μετά από πολυήμερη διαρκή βροχόπτωση.

Οι οπτικές εικόνες μπορούν να δώσουν τις περισσότερες φορές γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα σε σχέση με τα Radio Detection and Ranging (RADAR), των οποίων η ερμηνεία είναι πιο δύσκολη. Ωστόσο στις περιπτώσεις των πλημμυρών που συμβαίνουν λόγω μακράς διάρκειας βροχών υπάρχει περιορισμός (Peng et al., 2019; Zeng et al., 2017; Παρχαρίδης, 2015). Σε μήκη κύματος το οπτικού φάσματος η αφαίρεση των νεφών είναι αδύνατη. Αντίθετα, σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, όπως στις SAR εικόνες, υπάρχει καταγεγραμμένος μεγάλος όγκος πληροφοριών, αφού τα νέφη διαπερνούνται (Li et al., 2021).

Αρκετές μελέτες βασίζονται αποκλειστικά σε SAR δεδομένα με αυτόματη εξαγωγή (Moharrami et al., 2021), ενώ διαφορετικές χρησιμοποιούν συνδυαστικά προϊόντα ενεργών και παθητικών αισθητήρων (Faizan & Palanisamy, 2021; Goumehei et al., 2019; Φαλάρας, 2021). Ακόμη, σε ορισμένες αξιοποιείται το Google Earth Engine (Faizan & Palanisamy, 2021; Iglesias et al., 2018), με την προσπάθεια είτε αποκλειστικής χρήσης του, ώστε να μην χρειάζονται επιτόπια δεδομένα, είτε την εκμετάλλευση της καταλληλότητάς του, λόγω της δυνατότητας που προσφέρει σε πρόσβαση, αλλά και σε επεξεργασία των δεδομένων, η οποία είναι χρήσιμη, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για αναπτυσσόμενες χώρες. Για την περιγραφή την κατανόηση και την επεξεργασία μιας εικόνας απαραίτητη είναι η κατάρτιση αυτής, με επικρατέστερη τεχνική την μέθοδο ορισμού κατωφλίου, που είναι απλή στην εφαρμογή της (Richards, 2009).

Ο συνδυασμός ελεύθερων δεδομένων, λογισμικών και μεθόδων εύκολα εφαρμόσιμων από μη εξειδικευμένο προσωπικό παρέχει τη δυνατότητα επεξεργασίας δορυφορικών δεδομένων βοηθώντας τη λήψη αποφάσεων στον αρμόδιο διαχειριστικό τομέα, ενώ έχει ήδη δώσει ώθηση στην έρευνα σε πολλούς τομείς (Giordan et al., 2018; Quang et al., 2021). Ακόμη, προσφέρονται επεκτάσεις προγραμμάτων για λογισμικά ΣΓΠ, επιτρέποντας την άμεση λήψη των δορυφορικών δεδομένων.

3.6 Τηλεπισκόπηση

Η τηλεπισκόπηση (Remote sensing) ορίζεται ως η μέθοδος η οποία εφαρμόζεται από απόσταση από το μελετώμενο φαινόμενο προς τη συλλογή δεδομένων. Η δορυφορική παρακολούθηση της Γης αποτελεί τηλεσκοπική πρακτική εφόσον το όργανο καταγραφής βρίσκεται στο διάστημα, ενώ το αντικείμενο μελέτης στη γήινη επιφάνεια. Επιπλέον, η έννοια επεκτείνεται και στην διεξαγωγή ανάλυσης, επεξεργασίας και ερμηνείας (ESA; Παρχαρίδης, 2015).

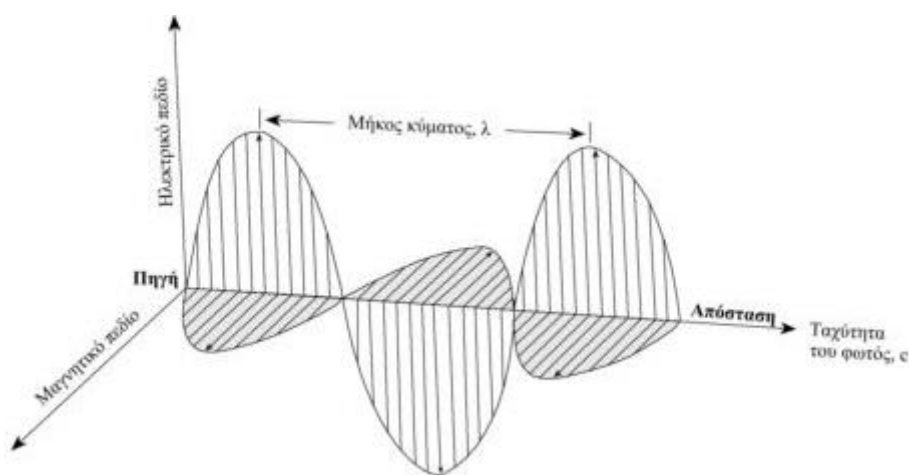
Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται διακρίνονται σε δυο κατηγορίες, στους ενεργητικούς και τους παθητικούς, ανάλογα με την πηγή από την οποία προέρχεται η ενέργεια η οποία καταγράφουν. Ακολουθώντας, πολλοί περισσότεροι διαχωρισμοί σχετίζονται με τον τρόπο λειτουργίας, αν αυτός είναι σάρωσης ή μη, και πιο ειδικά με τον τύπο του παραγόμενου προϊόντος, σε απεικονιστές ή μη. Στην πρώτη περίπτωση η περιοχή σαρώνεται κατά λωρίδες, κι όχι μονομιάς. Με τις ιδιότητες της ακτινοβολίας που ανιχνεύεται από την μελετώμενη περιοχή δημιουργούνται εικόνες δύο διαστάσεων, ενώ στη δεύτερη γίνεται τροποποίηση σε ηλεκτρικό σήμα (Πετρίδου, 2020).

Η κατάταξη των αισθητήρων μπορεί ακόμη να πραγματοποιηθεί με κριτήριο τη ραδιομετρική, τη φασματική, τη χωρική και τη χρονική διακριτική τους ικανότητα.

- Χωρική: Σχετίζεται με το μέγεθος του εικονοστοιχείου (pixel: picture-element) που αφορά συγκεκριμένη έκταση περιοχής της γήινης επιφάνειας. Περιγράφει την ικανότητα αποτύπωσης των διαφορετικών στοιχείων, μετράται σε μέτρα και καθορίζεται από την απόσταση της πλατφόρμας και τη γωνία καταγραφής του αισθητήρα. Διαφορετικά ορίζεται ως η ελάχιστη απόσταση που μπορούν να έχουν δύο στόχοι ώστε να διαχωριστούν στην αποτύπωση της εικόνας. Σημειώνονται, δύο κατηγορίες, αυτή της απόστασης και εκείνη του αζιμούθιου, εφόσον, εξαρτάται από το από το μήκος του παλμού και το πλάτος σάρωσης στο αζιμούθιο, που υπολογίζεται στην πλάγια διεύθυνση. Ακόμη, οι αισθητήρες διακρίνονται σε παγχρωματικούς, πολυφασματικούς και υπερφασματικούς με βάση την φασματική τους ανάλυση (Παρχαρίδης, 2015; Πετρίδου, 2020).
- Φασματική: Το μέγεθος αυτό είναι το μέτρο της ευαισθησίας που χαρακτηρίζει τον αισθητήρα σχετικά με το πλάτος και το πλήθος των περιοχών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Μεγαλύτερη φασματική ανάλυση επιτυγχάνεται όταν το εύρος του μήκους κύματος ενός καναλιού είναι μικρό. Δηλαδή, πρόκειται για μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα. Το ίδιο συμβαίνει και με το πλάτος της φασματικής περιοχής, η αύξηση του οποίου προκαλεί προσαύξηση του θορύβου, ωστόσο ταυτόχρονα οδηγεί σε ενίσχυση της χωρικής ανάλυσης (Πετρίδου, 2020).
- Ραδιομετρική: Το περιεχόμενο της συγκεκριμένης έννοιας (Φαρασλής & Μωυσιάδης, 2015) εντοπίζεται στην ικανότητα καταγραφής πλήθους διαβαθμίσεων της έντασης της ακτινοβολίας. Η μονάδα με την οποία εκφράζεται είναι τα bits που μπορεί να έχει μία εικόνα. Όσο περισσότερα έχει τόσο πιο λεπτομερής είναι η καταγραφή. Στην ουσία αντιπροσωπεύει τις διαβαθμίσεις που μπορούν να υπάρξουν σε μία κλίμακα με το λευκό και το μαύρο στα δύο άκρα. Η τιμή καθορίζεται από τη δύναμη του 2, δηλαδή μία εικόνα με ανάλυση 8bits διαθέτει (2^8) 256 διαφορετικές διαβαθμίσεις.
- Χρονική: Η μεταβλητή αυτή είναι η συχνότητα κατά την οποία ο δορυφόρος επανέρχεται πάνω από την ίδια περιοχή. Επηρεάζεται από το είδος της τροχιάς που εκτελείται, το πλάτος της επίγειας λωρίδας που σαρώνεται και από το οπτικό πεδίο του αισθητήρα (Πετρίδου, 2020).

Οι τροχιές των δορυφόρων περιγράφουν τον τρόπο της προκαθορισμένης κίνησης που εκτελούν γύρω από τη Γη. Τα στοιχεία με τα οποία μπορούν να περιγραφούν είναι το ύψος, ο προσανατολισμός και η περιστροφή ως προς τη Γη. Ανάλογα με αυτά τα στοιχεία οι δορυφόροι διακρίνονται σε ορισμένες κύριες κατηγορίες, στους γεωστατικούς, πολικούς και τους ηλιοσύγχρονους. Για την παρατήρηση των φαινομένων το βασικότερο που χρειάζεται να ειπωθεί σε αυτό το σημείο είναι πως η τηλεπισκόπηση βασίζεται στη μέτρηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Πετρίδου, 2020).

Η κατανόηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μπορεί να κατακτηθεί μέσω της ανάλυσης της κυματικής της υπόστασης (Εικόνα 18) (Σταγάκης, 2012). Μπορεί η συμπεριφορά της να έχει ταυτοχρόνως χαρακτηριστικά σωματιδίων. Η διάδοση της γίνεται ως μία διαταραχή του χώρου, ως προς το μαγνητικό και το ηλεκτρικό πεδίο, σε καθεστώς κάθετο και με τη μορφή ημιτονοειδών κυμάτων. Το πιο σημαντικό που απασχολεί την τηλεπισκοπική οπτική είναι το μήκος κύματος (λ) και η συχνότητα.

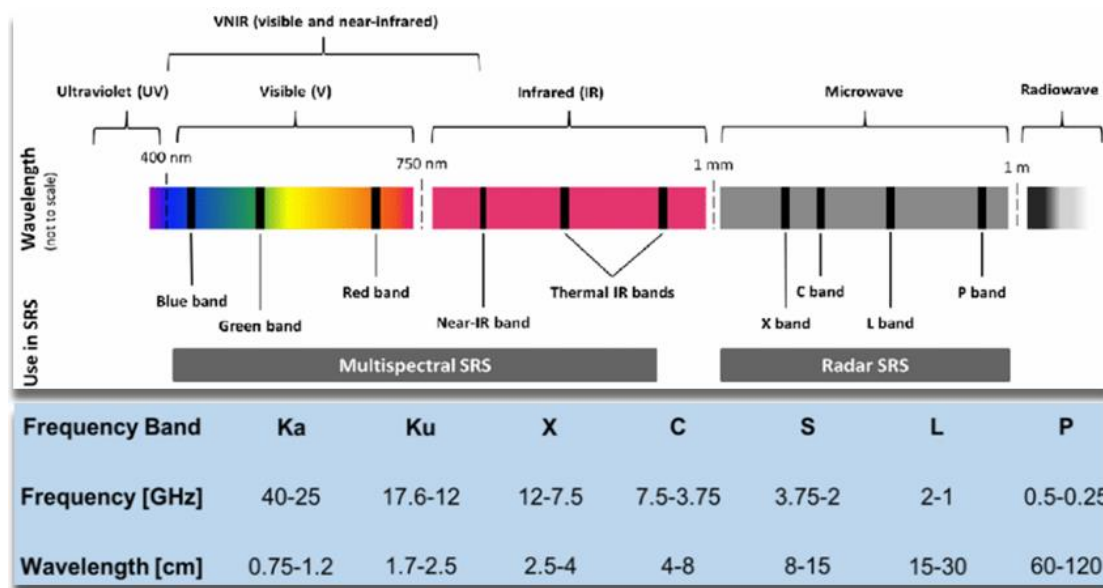


Εικόνα 18: Η κυματική φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Πηγή: Σταγάκης, 2012)

Η κατηγοριοποίηση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος γίνεται γενικώς χωρίζοντάς το σε ορισμένα κύρια τμήματα (Εικόνα 19) και στη συνέχεια σε κανάλια. Στην τηλεπισκόπηση αξιοποιούνται η υπεριώδης ακτινοβολία (0,32 -0,28 μm), το ορατό φως (0,38-0,72 μm), η υπέρυθρη ακτινοβολία (0,72-15 μm), με πλέον χρησιμοποιούμενες κατηγορίες το εγγύς (0,72-1,30 μm), το μέσο (1,30-3 μm) και το θερμικό υπέρυθρο (3-14 μm). Στη συνέχεια απαντώνται τα μικροκύματα, που μας απασχολούν στη συγκεκριμένη εργασία, καθώς οι αισθητήρες των SAR συστημάτων κατά κανόνα λειτουργούν σε μία συγκεκριμένη ζώνη, που με τυχαίο τρόπο έχει

συμβολιστεί με γράμματα του αλφάβητου (*Εικόνα 19*), για λόγους συντομίας (Παρχαρίδης, 2015). Τα κανάλια που χρησιμοποιούνται συνήθως, με τα αντίστοιχα μήκη κύματος φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Κατά τη διαδρομή που εκτελεί η ακτινοβολία πριν την έλευση της στον αισθητήρα περνά από την ατμόσφαιρα και αλληλεπιδρά τόσο με αυτή, όσο και με την ύλη στην οποία προσπίπτει. Ασφαλώς, σε αυτή την επίδραση στηρίζεται και η ύπαρξη της τηλεπισκόπησης, καθώς ο τρόπος με τον οποίο έχει μεταβληθεί η μορφή της ακτινοβολίας (ενεργά συστήματα) προδίδει τα χαρακτηριστικά του υλικού.

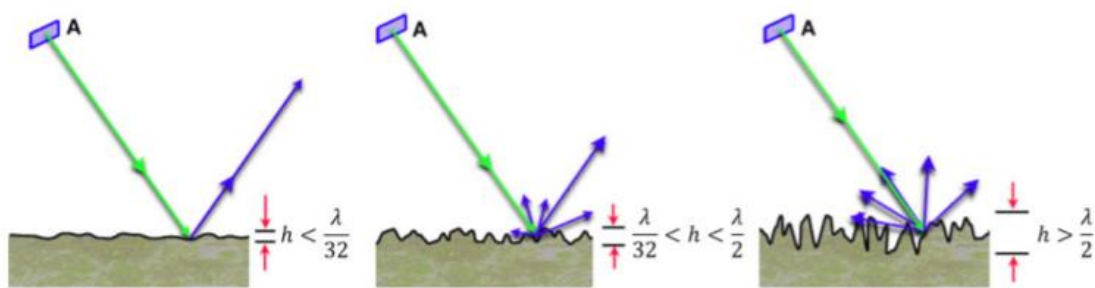


Εικόνα 19: Τα κανάλια του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που χρησιμοποιούνται από την Τηλεπισκόπηση και τα συστήματα SAR (Πηγή: Dell'Amore, 2019; Pettorelli et al., 2018).

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αφού περάσει από την ατμόσφαιρα και τα νέφη, φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Το σήμα δέχεται τις επιδράσεις της ανάκλασης- διάχυσης, απορρόφησης ή μεταβίβασης (Παρχαρίδης, 2015; Σταγάκης, 2012). Ο τρόπος με τον οποίο θα αποτυπωθεί η επιφάνεια στην εικόνα σχετίζεται αποκλειστικά με την τραχύτητά της σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (*Εικόνα 20*) (Flores et al., 2019). Βάσει του κριτηρίου του Fraunhofer (εξίσωση 1), μπορεί αυτή η σχέση να υπολογιστεί.

$$h_{rough} > \frac{\lambda}{(32 \cdot \cos \theta_i)} \quad (1)$$

Σε λείες αδιαφανείς επιφάνειες ($h < \lambda/32$), όπως για παράδειγμα ήρεμες επιφάνειες υδάτων, πραγματοποιείται ανάκλαση. Επί της ουσίας το μέσο φέρεται ως καθρέπτης, αλλάζοντας την κατεύθυνση της ακτίνας. Όταν η διεύθυνση αλλάζει πλήρως και δεν επιστρέφει τίποτα πίσω στον αισθητήρα, χαρακτηρίζεται ως κατοπτρική, με την γωνία πρόσπτωσης να ισούται με εκείνη της ανάκλασης. Με τον ίδιο τρόπο συμπεριφέρεται και ο υδάτινος ταμιευτήρας Αποσελέμη που μελετάται στην παρούσα εργασία, για αυτό και στις εικόνες SAR αναπαρίσταται ως πολύ σκοτεινό σώμα. Όταν το μεγαλύτερο ποσοστό της ανακατευθύνεται, όμως απειροελάχιστο επιστρέφει στη διεύθυνση διάδοσης της ακτίνας και κατ' επέκταση στον αισθητήρα, εμφανίζεται ήπια τραχύτητα και ισχύει η σχέση $\lambda/32 < h < \lambda/2$. Στην περίπτωση που η ακτίνα προσπίπτει σε εξαιρετικά τραχιά επιφάνεια, θα ισχύσει η σχέση $h > \lambda/2$. Συμβαίνει διάχυση προς όλες τις κατευθύνσεις και ορισμένο ποσοστό κατευθύνεται προς το δορυφόρο.

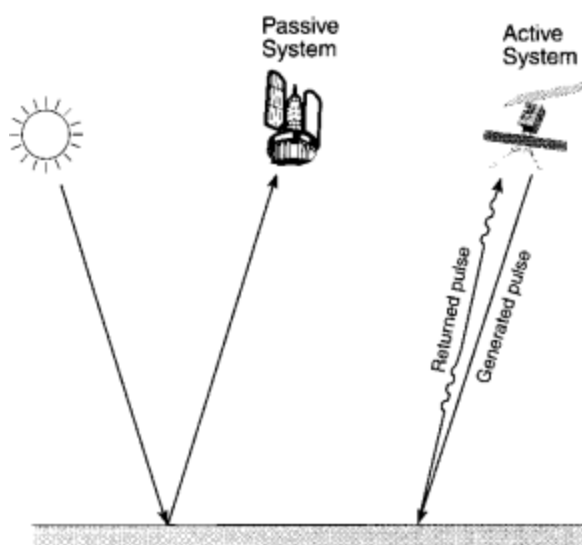


Εικόνα 20: Η εξάρτηση της τραχύτητας από το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Κατοπτρική ανάκλαση σε λεία επιφάνεια – Ανάκλαση σε επιφάνεια μέτριας τραχύτητας – Διάχυση σε πολύ τραχιά επιφάνεια (Πηγή: Flores et al., 2019)

Ακόμη, οι ιδιότητες της απορροφητικότητας και της διαπερατότητας των υλικών κατέχουν σημαντικό ρόλο. Η συμπεριφορά που εμφανίζει μία επιφάνεια σχετικά με τις διαδικασίες ανάκλασης, απορρόφησης και μετάδοσης της ακτινοβολίας σε διαφορετικά μήκη κύματος καλείται φασματική απόκριση. Κάθε αντικείμενο διαθέτει τη δική του φασματική υπογραφή, η οποία διαφέρει και αποτελεί δείκτη της δομής, της σύστασης και της κατάστασης του. Για παράδειγμα η υγιής βλάστηση εμφανίζει υψηλή ανακλαστικότητα στο πράσινο, ενώ η μη μικρότερη.

3.7 Ενεργά δορυφορικά συστήματα SAR

Οι αισθητήρες SAR είναι απεικονιστικά συστήματα RADAR (imaging radar). Ο χαρακτηρισμός τους ως «ενεργά» έγκειται στον τρόπο λειτουργίας του αισθητήρα. Σε αντίθεση με τους παθητικούς (Εικόνα 21), που αποτυπώνουν την ανακλώμενη ηλιακή και θερμική ακτινοβολία στο ορατό και στο υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, τα RADAR εκπέμπουν τη δική τους μικροκυματική ακτινοβολία, μέσω μίας κεραίας που τοποθετείται πάνω στο δορυφόρο. Με την καταμέτρηση της χρονικής διαφοράς μεταξύ εκπομπής – λήψης του σήματος καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός αποστάσεων και υψομετρικών διαφορών (Παρχαρίδης, 2015; Φαρασλής & Μωυσιάδης, 2015).



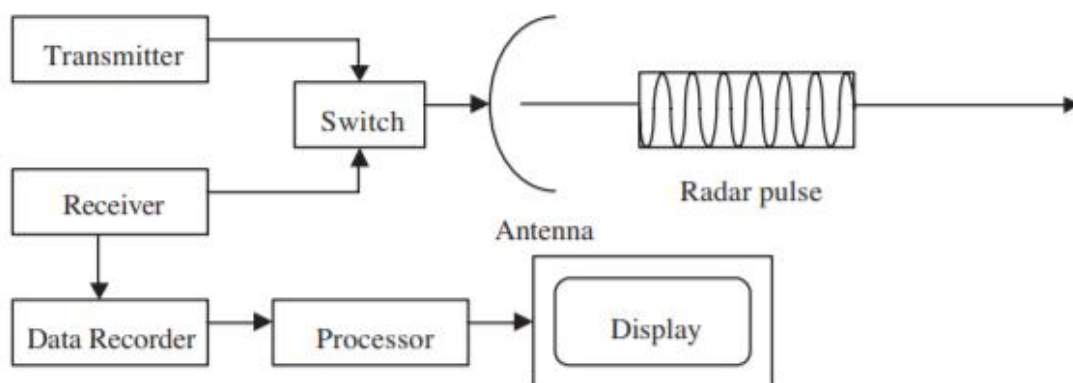
Εικόνα 21: Ο τρόπος λειτουργίας των παθητικών και των ενεργητικών δορυφορικών συστημάτων (Πηγή: <https://nptel.ac.in/>)

Το εκπεμπόμενο σήμα ανακλάται, διαθλάται ή διαχέεται στο γήινο ανάγλυφο ή στην ατμόσφαιρα και επιστρέφει στον αισθητήρα όπου και καταγράφεται. Τα πλεονεκτήματα που συνεπάγονται με τη χρήση των συστημάτων RADAR οδήγησαν στην ανάπτυξη πλήθους δορυφορικών και εναέριων μέσων (Chan & Koo, 2008). Η παροχή λήψεων είναι δυνατή και κατά τη διάρκεια της νύχτας, εφόσον δεν εξαρτώνται από το ηλιακό φως, αλλά παράγουν τη δική τους μικροκυματική ακτινοβολία, η οποία έχει την ιδιότητα διαπέρασης νεφών, βροχής και ομίχλης με ελάχιστη επίδραση στη δύναμη του σήματος (ESA).

Τα συστήματα RADAR έχουν εφαρμογή σε πολλές θεματικές περιοχές, καθώς εισχωρούν στο έδαφος και τη βλάστηση έως 1 m (Φαρασλής & Μωυσιάδης, 2015). Στη γεωργία, τη δασολογία,

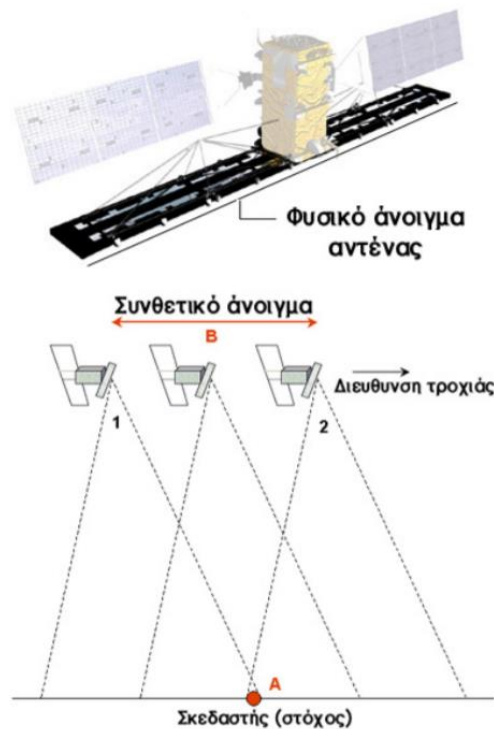
τη γεωλογία, την υδρολογία, την ωκεανογραφία, την καταγραφή και τη μελέτη των πάγων, σε περιβάλλοντα με τροπικό κλίμα, στην καταγραφή πλημμυρικών φαινομένων, στον υπολογισμό της εδαφικής υγρασίας στην γήινη επιφάνεια. Μπορούν, ακόμη, να αποτυπώσουν την επιφάνεια περιοχών, που βρίσκεται μόνιμα κάτω από σύννεφα (NASA), να ανιχνεύσουν και να προσφέρουν μετρήσεις εδαφικής παραμόρφωσης, για παράδειγμα μετά από την έλευση κάποιου σεισμικού γεγονότος. Προτιμώνται όταν πρόκειται για τη χαρτογράφηση πλημμυρικών εκτάσεων και εποχιακών διακυμάνσεων της έκτασης λιμνών, για την εξασφάλιση πρακτικών βιώσιμης διαχείρισης (Martinis & Rieke, 2015; Zeng et al., 2017). Χρησιμοποιούνται για την κάλυψη ζητημάτων είτε εκεί όπου τα παθητικά οπτικά συστήματα δεν μπορούν να ενεργήσουν είτε συμπληρωματικά για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων.

Η δημιουργία των συστημάτων SAR έγκειται στην ανάγκη αύξησης της χωρικής διακριτικής ικανότητας των Real Aperture RADAR (RAR), η οποία εξαρτάται μόνο από το μήκος της κεραίας. Η SAR τεχνολογία επιτρέπει τη χρήση μεγαλύτερου μήκους κύματος παρά το μικρό μέγεθος ανοίγματος της κεραίας. Με τον τρόπο αυτό ξεπεράστηκε το πρακτικό εμπόδιο της περιορισμένης ικανότητας μεταφοράς φέρουσας κεραίας των δορυφορικών συστημάτων.



Εικόνα 22: Βασικό διάγραμμα συστήματος RADAR (Πηγή: Chan & Koo, 2008)

Ένα σύστημα SAR αποτελείται από μία κεραία πλασματικού ανοίγματος, τον πομποδέκτη, το όργανο καταγραφής του σήματος και έναν διακόπτη διπλής ενέργειας (Εικόνα 22). Το μήκος κύματος καθορίζει την κατά πλάτος ανάλυση της εικόνας, ενώ το πλάτος του κύματος την κατά μήκος ανάλυση της εικόνας.

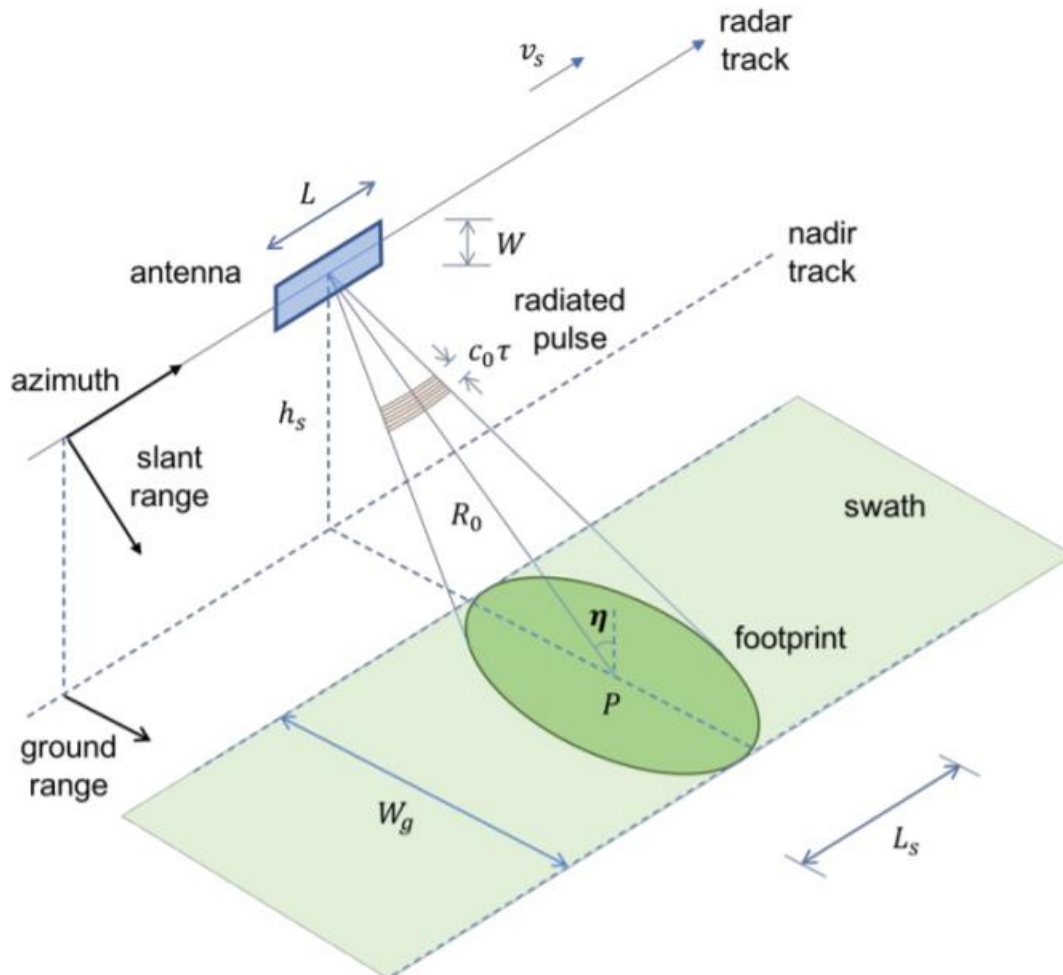


Εικόνα 23: Η γεωμετρία των λήψεων κατά τη σύνθεση μίας εικόνας SAR (Πηγή: Δεληκαράογλου, 2005)

Η ανακάλυψη του συνθετικού ανοίγματος ήταν του μηχανικού Carl Wiley το 1952 (Flores et al., 2019). Το σύστημα SAR που προτάθηκε από τον Wiley, προς βελτίωση την ανάλυσης των ήδη υπαρχόντων Side-Looking Airborne Radar (SLAR) συστημάτων, έχει έναν βασικό τρόπο λειτουργίας. Όσο ο αισθητήρας κινείται, λόγω της κίνησης του δορυφόρου, από ένα σημείο 1 σε ένα δεύτερο σημείο 2 (Εικόνα 23), ένα σημείο A της γήινης επιφάνειας δέχεται πολλούς συνεχείς παλμούς του radar, που από τον καθένα παράγεται μία λήψη. Η σύνθεση των λήψεων που προήλθαν από τη σάρωση μεταξύ των δύο σημείων χ_1 και χ_2 οδηγεί στη δημιουργία μιας SAR εικόνας, ανάλυσης που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη κεραία απ' ό τι πραγματικά. Το συνθετικό αυτό άνοιγμα καλείται synthetic aperture.

Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 24) παρέχεται με απλοποιημένο τρόπο η γεωμετρία SAR. Τα συστήματα radar διαφέρουν ως προς τον τρόπο που κατευθύνουν την εκπεμπόμενη ακτινοβολία προς τη Γη σε σχέση με τα οπτικά. Σαρώνουν προς τα κάτω και πλαγίως του τροχιακού επιπέδου κίνησης τους, ενώ τα οπτικά λαμβάνουν το σήμα από το ναδίρ, ακριβώς από κάτω (Παρχαρίδης, 2015). Το SAR, όντας προσαρμοσμένο στο δορυφόρο, εκτελεί την ίδια κίνηση, κατά μήκος του αζιμούθιου με ταχύτητα v_s σε ύψος h_s (Dell'Amore, 2019). Η προβολή,

του αζιμούθιου στο έδαφος καλείται ground range. Το σήμα μεταδίδεται στη διεύθυνση slant range με παλμούς σε ορισμένη συχνότητα επανάληψης. Ανάλογα με την κεραία που διαθέτει, μπορεί να λειτουργεί μονοδιάστατα (HH ή VV), εκπέμποντας και λαμβάνοντας σε μοναδική γραμμική πόλωση, είτε σε διπλή, που έχει τη δυνατότητα να εκλύει ακτινοβολία σε μία πόλωση, αλλά να λαμβάνει σε δύο (HH/HV ή VV/VH), είτε σε πολλαπλές, για παράδειγμα στην τετραπλή εναλλάσσει την πόλωση κατά την εκπομπή και λαμβάνει και στις δυο (HH, HV, VH και VV) (NASA). Οι παλμοί κινούνται με ταχύτητα (c_0) ανάλογη του μέσου (διάστημα ή ατμόσφαιρα) στο οποίο βρίσκονται. Αν υποθέσουμε για ορισμένο χρονικό διάστημα τ , τότε το πλάτος τους μπορεί να υπολογιστεί ως $c_0 \cdot \tau$. Προσεγγίζοντας το έδαφος η ακτινοβολία σαρώνει ένα εύρος έκτασης footprint ανάλογα με το μήκος κύματος, με κεντρικό σημείο P και απόσταση δορυφόρου – εδάφους R_0 . Το σήμα ανακλάται και επιστρέφει, αφού έχει διανύσει τη διπλάσια απόσταση ($2 R_0$). Επομένως, ο χρόνος έλευσης μπορεί να υπολογιστεί ως $2 R_0 / c_0$.



Εικόνα 24: Η γεωμετρία των SAR συστημάτων Πηγή: (Villano, 2016)

Όπου στο σχήμα αποτυπώνονται:

v_s : η σταθερή ταχύτητα κίνησης του δορυφόρου

h_s : ύψος δορυφόρου

azimuth: η διεύθυνση κίνησης

slant range: διεύθυνση σάρωσης

ground range: η προβολή της slant range στο έδαφος

nadir: η προβολή της τροχιάς κίνησης του δορυφόρου στο έδαφος

L : πραγματικό μήκος κεραίας

L_s : συνθετικό μήκος κεραίας

c_0 : ταχύτητα διάδοσης κύματος

τ : χρονικό διάστημα διάδοσης ενός παλμού

$c_0 \cdot \tau$: το μήκος των παλμών στη διεύθυνση slant range

R_0 : απόσταση δορυφόρου-ενός σημείου στη γήινη επιφάνεια

η : γωνία πρόσπτωσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

footprint: η έκταση που σαρώνει σταδιακά το σύστημα SAR

W_g : μήκος αποτυπώματος

L_g : πλάτος αποτυπώματος

swath: η λωρίδα της επιφάνειας που σαρώνει ο αισθητήρας

Όπως δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις, το «αποτύπωμα» του radar έχει θετική εξάρτηση με το μήκος κύματος και την απόσταση σάρωσης, ενώ αρνητική με το πλάτος της κεραίας.

$$W_g = \frac{\lambda R_0}{W \cos \eta} \quad L_s = \frac{\lambda R_0}{L}$$

Η ικανότητα διαπέρασης είναι ανάλογη του μήκους κύματος. Όσο μεγαλύτερο το μήκος κύματος, τόσο περισσότερα τα κύματα του radar έχουν τη δυνατότητα να διαπερνούν στα αντικείμενα της γήινης επιφάνειας (Παρχαρίδης, 2015). Επίσης από αυτό εξαρτάται και η διηλεκτρική συμπεριφορά, δηλαδή το ποσό της ενέργειας που διεισδύει ή ανακλάται. Η συμπεριφορά αυτή, η γεωμετρία και η περιεκτικότητα σε νερό του στόχου (έδαφος, βλάστηση) καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του επιστρεφόμενου σήματος (Παρχαρίδης, 2015). Με τον τρόπο αυτό τα SAR καταγράφουν τις επιφανειακές ιδιότητες των αντικειμένων του περιβάλλοντος.

Τα SAR χρησιμοποιούν τη μικροκυματική ακτινοβολία και περιορίζονται σε ένα φασματικό κανάλι, ενώ δυνητικά θα μπορούν περισσότερα.

3.7.1 Δορυφόροι που φέρουν όργανα SAR και εξέλιξη οργάνων SAR

Σε αυτό το σημείο γίνεται μία σύντομη αναδρομική περιγραφή των χαρακτηριστικών των δορυφόρων και των συστημάτων SAR, μέσα από επιλεγμένες αποστολές, με προσπάθεια σκιαγράφησης της ιστορικής τους πορείας και περισσότερο ανάδειξης της μετάβασης από τις τεχνικές του παρελθόντος, σε εκείνες που υφίστανται κι όσες έχουν προγραμματιστεί να υλοποιηθούν μελλοντικά.

SeaSat

Είναι από τους πρώτους δορυφόρους παρατήρησης της Γης. Δημιουργήθηκε από τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής στο Jet Propulsion Laboratory της National Aeronautics and Space Administration's (NASA) (Born et al., 1979). Παρόλο που αποστολή του διήρκεσε 105 ημέρες, από τις 27 Ιανουαρίου 1978 έως τις 10 Οκτωβρίου του ίδιου έτους, όπου και προκλήθηκε δυσλειτουργία στο σύστημα παροχής ενέργειας, κατόρθωσε να προσφέρει πρωτότυπες και εκτενείς μετρήσεις (NASA). Η ανάγκη δημιουργίας του προέκυψε από τις παρατηρήσεις των επιστημόνων ωκεανολογίας της περιόδου, ως προς την ύπαρξη ελάχιστων, ασυνεχών δεδομένων, που σε ορισμένο ποσοστό περιπτώσεων επρόκειτο μάλιστα για αναξιόπιστα. Ο συγκεκριμένος δορυφόρος της NASA με μάζα 2290 kg, χρειαζόταν 36 ώρες για να

πραγματοποιήσει μία σχεδόν πλήρη κάλυψη (95%) της γήινης σφαίρας. Στη διάρκεια του 24ωρου εκτελούσε 14 περιστροφές γύρω από τη Γη, σε σχεδόν κυκλική τροχιά στα 800 km με κλίση 108°.

Σκοπό είχε τη παρακολούθηση των ωκεανών μέσω ενεργητικών και παθητικών αισθητήρων μικροκυματικής ακτινοβολίας, που δοκιμάστηκαν μέσω αυτού. Παρείχε μετρήσεις σχετικά με τα χαρακτηριστικά του στρώματος ανέμου πάνω από τη θαλάσσια επιφάνεια, δηλαδή θερμοκρασία και ταχύτητα, καθώς και για το ύψος των κυμάτων. Ακόμη, μπορούσε να υπολογίζει το ποσοστό νερού στην ατμόσφαιρα σε υγρή μορφή και να αποτυπώνει το τοπογραφικό ανάγλυφο που βρίσκεται κάτω από τις ωκεάνιες μάζες. Έφερε πέντε όργανα καταγραφής: Radar altimeter (ALT), SEASAT-A Satellite Scatterometer (SASS), visible and Infrared Radiometer (VIRR), Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) και υπήρξε ο πρώτος που έφερε όργανο καταγραφής SAR. Οι ιδιότητες και οι δυνατότητες κάθε ενός αποτυπώνονται στην τεχνική έκθεση των επιστημόνων του εργαστηρίου της NASA, που αναφέρονται ακολούθως.

Το SAR-L (1.275 GHz) αποτύπωνε εύρος 100 km με κλίση 20° από το ναδίρ, με κάλυψη 100 km έως 4000 km και χωρική ανάλυση 25 m. Δυνατός ήταν ο ευδιάκριτος εντοπισμός των ορίων μεταξύ ξηράς και υδάτων και η μελέτη καταιγίδων και τυφώνων (Born et al., 1979). Το αλτίμετρο είχε τη δυνατότητα υπολογισμού του ύψους των κυμάτων με ακρίβεια 10 cm και λειτουργούσε στα 13.5 GHz. Οι υπολογισμοί του SASS σε ανέμους ταχύτητας από 4 έως 26 m/sec είχαν ακρίβεια 2 m/ sec. Το VIRR διέθετε δύο κανάλια και αποσκοπούσε στην αποτύπωση των χαρακτηριστικών της ατμόσφαιρας, εντοπίζοντας νεφώδεις σχηματισμούς, κάνοντας χρήση του ορατού τμήματος του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (από 0.49 nm έως 0.94 nm) και προσδιορίζοντας την θερμοκρασία πάνω από αυτά μέσω του υπέρυθρου καναλιού (10.5 μm έως 12.5 μm).

ERS (European Remote-sensing Satellite)

Ο δορυφόρος ERS-1 εκκίνησε το πρώτο πρόγραμμα της ESA “ERS” στις 17 Ιουλίου του 1991 από την Κουρου στην γαλλική Guiana, με σκοπό την παροχή περιβαλλοντικών μετρήσεων (ESA). Πραγματοποιώντας μία περιστροφή κάθε 100 λεπτά, ο δύο τόνων δορυφόρος ηλιοσύγχρονης

τροχιάς σε ύψος 785 km προσέφερε μετρήσεις για τα χαρακτηριστικά του ανέμου και βοήθησε στη μελέτη του κλίματος, συμβάλλοντας έτσι στη μελέτη της κλιματικής αλλαγής και των παγόβουνων. Οι χρήστες είχαν πρόσβαση στις μετρήσεις μέσα σε τρεις ώρες από την στιγμή που πραγματοποιούνταν (Hahne et al., 1993). Έφερε όργανο καταγραφής SAR-C για την απεικόνιση της γήινης επιφάνειας και ραδιόμετρο για την κατανομή της θερμότητας των ωκεανών. Μέγιστη διάρκεια καταγραφής ήταν τα 10 λεπτά ανά μία τροχιά. Λειτουργούσε σε κλίση 21° από το ναδίρ, με πόλωση VV σε συχνότητα 5,3 GHz και μήκος κύματος 5,6 cm, σαρώνοντας λωρίδα πλάτους 100 km, επιτυγχάνοντας χωρική διακριτική ικανότητα από 6 έως 30 m στη διεύθυνση κίνησης και 26 m στην διεύθυνση σάρωσης (ASF, 2022). Φαινόμενα, που απαιτούν τη συνδυαστική παρακολούθηση των επιδράσεων λόγω τοπογραφίας και ανεμολογικού καθεστώτος, όπως ο τυφώνας Ελ Νίνιο (Φαρασλής & Μωυσιάδης, 2015), σημαντικές πλημμύρες, όπως εκείνη του 1995 στην Ολλανδία, αποτυπώθηκαν με τη χρήση δεδομένων ERS (ESA). Το κατασκευαστικό εύρος ζωής του ξεπεράστηκε. Το 2000 η λειτουργία του σταμάτησε λόγω προβλήματος που προέκυψε στο γυροσκόπιο και τον υπολογιστή του, έχοντας υπερβεί το κατασκευαστικό εύρος ζωής του επί τρεις φορές (Φαρασλής & Μωυσιάδης, 2015).

Τον Απρίλιο του 1995 εκτοξεύτηκε ο ERS-2 από την ESA. Η μοναδική διαφορά ήταν η προσθήκη ενός σπεκτρομέτρου, του Global Ozone Monitoring Experiment (GOME), το οποίο προσέφερε ανά τρεις ημέρες παγκόσμια αναφορά μετρήσεων του όζοντος και των υπόλοιπων συστατικών της ατμόσφαιρας, παράλληλα με τη δυνατότητα διαφοροποιημένης σπεκτροσκόπησης απορρόφησης της ακτινοβολίας στο οπτικό φάσμα, από την παραδοσιακή ανάλυση οπισθοσκέδασης. Μέσω συμφωνίας μεταξύ της NASA και της ESA, τα SAR δεδομένα είναι ελεύθερα διαθέσιμα μέσω των Distributed Active Archive Centers από την Alaska Satellite Facility (<https://asf.alaska.edu/>), είτε στην μορφή Level 0, είτε Level 1 (ESA; Hahne et al., 1993).

Japanese Earth Resources Satellite (JERS-1, 1992-1998)

Το πρόγραμμα αποτέλεσε συνεργασία μεταξύ των Ιαπωνικών National Space Development Agency (NASDA), Ministry of International Trade and Industry (MITI) και Science and Technology Agency (STA). Αργότερα το 2003 συντάχθηκε η Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), από την ένωση της NASDA με την National Aerospace Laboratory of Japan (NAL) και την Institute of

Space and Aeronautical Science (ISAS) (ESA). Η κατασκευή του δορυφόρου έγινε από την Mitsubishi Electric Co υπό τον σχεδιασμό των NASDA- STA, ενώ τη χρηματοδότηση των οργάνων ανέλαβε η MITI. Εξοπλισμένος με ενεργό εικονοληπτικό radar SAR-L και παθητικό οπτικό πολυφασματικό δέκτη OPS, ο JERS-1 (ή FUYO-1) μάζας 1400 kg και σχεδιασμού με προσδόκιμο ζωής δύο χρόνων, βρισκόταν σε ηλιοσύγχρονη τροχιά, κλίσης 97.7°, σε ύψος 568 km, για πάνω από έξι έτη, από τις 11 Φεβρουαρίου 1992 έως και τις 11 Οκτωβρίου 1998.

Σκοπό είχε τη συλλογή δεδομένων σχετικά με το έδαφος, την αλιεία, τη δασοκομία, την προστασία του περιβάλλοντος και των ακτών, καθώς και την πρόληψη καταστροφών. Οι εικόνες SAR χρησιμοποιήθηκαν για την εκπλήρωση του βασικού προγράμματος Global Rainforest Mapping για την παροχή σειράς χαρτογραφήσεων των σημαντικότερων δασών παγκοσμίως. Από την ιστοσελίδα της ASF είναι δυνατή η πρόσβαση στα SAR δεδομένα και μωσαϊκά, όπως του Αμαζονίου και του δασικού οικοσυστήματος Boreal-Taiga (ASF).

Μέσω του αισθητήρα παρέχονταν σαρώσεις πόλωσης HH εύρους 75 km με χωρική διακριτική ικανότητα 18 m. Η συχνότητα της ακτινοβολίας ήταν 1,3GHz στο L κανάλι του φάσματος, εκπέμποντας στα δεξιά της τροχιάς πτήσης 1,500 παλμούς το δευτερόλεπτο, υπό γωνία 35° από το ναδίρ (ESA). Ωστόσο, μόλις στους πρώτους μήνες υπήρξε σημαντικό πρόβλημα δυσλειτουργίας λόγω αναδίπλωσης δύο SAR-πάνελ, το οποίο επαναπροσδιόρισε τη λειτουργία του στο μισό της προσχεδιασμένης έντασης και με προσαυξημένο θόρυβο (Chapman et al., 1998).

RADARSAT

Ο Καναδάς ήταν από τις πρώτες χώρες που επένδυσαν στη δορυφορική τηλεπισκόπηση, ως το πρακτικότερο και οικονομικότερο μέσο για τη διαχείριση των ποικιλόμορφων περιβαλλοντικών και κλιματολογικών ζητημάτων (ASF). Το πρόγραμμα αποτελείται από δύο δορυφόρους της Καναδικής Υπηρεσίας Διαστήματος (Canadian Space Agency, CSA), με τον πρώτο RADARSAT-1 που μπήκε σε τροχιά στις 4 Νοέμβρη 1995 (έως 29 Μαρτίου 2013) μέσω του Delta II rocket και τον μεταγενέστερο RADARSAT-2 που λειτουργεί έως σήμερα, αρχής γενομένης στις 14 Δεκεμβρίου 2007. Ο RADARSAT-1 είχε σχεδιαστεί από κατασκευής για πέντε έτη ζωής (ESA).

Το πρόγραμμα αποσκοπεί, κυρίως, στην ενίσχυση της έρευνας για την κλιματική αλλαγή και τη διατήρηση των αποθεμάτων του πλανήτη, παράλληλα με την ενίσχυση του εμπορικού και του ερευνητικού τομέα σε θέματα σχετικά με τη διαχείριση καταστροφών, την καλλιέργεια της γης, τη δασοκομία, τη χαρτογραφία, την υδρολογία και πολλά άλλα (ESA).

Άρτιο παράδειγμα συνεργασίας του κράτους με τον ιδιωτικό τομέα, ο RADARSAT-2 ανήκει, όπως και το επίγειο τμήμα στην MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd (MDA), η οποία και τον διαχειρίζεται (CSA). Η χρηματοδότηση του προγράμματος προκύπτει από την παροχή των δεδομένων μέσω της CSA στις κυβερνητικές υπηρεσίες. Σημαντική ώθηση δίνεται στην εξειδίκευση των πιθανών εφαρμογών που μπορούν να δημιουργηθούν με βάσει τη χρήση των πολλαπλών του λειτουργιών υψηλής ανάλυσης, σε πολικότητα HH, HV, VH ή VV (ESA).

Τα επεξεργασμένα δεδομένα του RADARSAT-1 μπορούν να προσπελαστούν δωρεάν από το Earth Observation Data Management System (EODMS) <https://www.eodms-sgdot.nrcan-rncan.gc.ca/index-en.html>, ενώ για τα RADARSAT-2, υπάρχει ορισμένο κόστος το οποίο καθορίζεται από την MDA Geospatial Services (ESA).

Η RADARSAT Constellation Mission (RCM) είναι η νέα γενιά τριών πανομοιότυπων δορυφόρων που ξεκίνησε στις 12 Ιουνίου 2019, προς εξασφάλιση της συνέχειας παροχής C-band δεδομένων, βελτίωσης της απόδοσης και της αξιοπιστίας του συστήματος (CEOS). Η ειδοποιός διαφορά του έγκειται στην ικανότητα εντοπισμού και παρακολούθησης της πορείας πλοίων χάρις στο Automated Identification System (AIS), με 512 κεραίες ανεξάρτητου χειρισμού.

Envisat (Environmental Satellite, 2002-2012)

Η προώθηση του Envisat, του μεγαλύτερου έως τότε δορυφόρου (8 τόνοι), στο διάστημα έγινε την 1 Μαΐου 2002, μέσω του Ariane-5 πυραύλου από το Ευρωπαϊκό διαστημικό λιμάνι της Γαλλίας στη Guiana. Αποτέλεσε τη συνέχεια των ERS και ήταν εξοπλισμένος με δέκα όργανα. Αποσκοπούσε στην αποτύπωση περισσότερων παραμέτρων που θα βοηθούσαν στη βελτίωση της κατανόησης του τρόπου λειτουργίας του περιβάλλοντος, της χημείας της ατμόσφαιρας, του ωκεάνιου οικοσυστήματος, όπως και την παροχή της δυνατότητας συνέχειας των μελετών που βρίσκονταν ήδη εν πορεία και βασίζονταν σε δεδομένα των ERS. Παράλληλα, ο σχεδιασμός του

απέβλεπε στην βελτίωση της κατανόησης των διαδικασιών του στερεού της Γης και της αποτύπωσης και διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων (ESA).

Με το αναβαθμισμένο εικονοληπτικό ASAR, που βασίστηκε στο προγενέστερο (Active Microwave Instrument) AMI-SAR, συνέβαλε τόσο σε παρατηρήσεις στον ωκεανό όσο και στην ξηρά, διευκόλυνε κατά πολύ τις πλημμυρικές μελέτες με την αύξηση της χρονικής επαναληψιμότητας, τις υψηλές γωνίες πρόσπτωσης και την προσφορά προϊόντων πόλωσης HH (Attema et al., 1998; ESA). Η κατασκευή του ήταν έργο της Matra Marconi Space (MMS) UK, που σήμερα ονομάζεται Airbus Defence and Space. Χρησιμοποιούσε το κανάλι C του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, εκτελώντας σάρωση υπό γωνία 15-45° από το ναδίρ. Οι διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας του ήταν: Image Mode (IM), Alternating Polarisation Mode (AP), Wide Swath Mode (WS), Global Monitoring Mode (GM) και Wave Mode (WV), σε επίπεδα επεξεργασίας Level-0,1 και 2. Η χωρική διακριτική ικανότητα είχε εύρος από 30 m έως και 1 KM, ανάλογα τον τύπο του προϊόντος, από τον οποίο επίσης εξαρτάται η επιλογή της αντίστοιχης πλατφόρμας ελεύθερης προσπέλασης της ESA.

Η αποστολή ήταν σχεδιασμένη να λάβει τέλος το 2010, όμως οι χώρες μέλη της ESA (Member States) αποφάσισαν την επέκταση της χρηματοδότησης γι' ακόμη τρία έτη, έως το 2013. Όμως, η αποστολή έλαβε τέλος πριν από αυτό, στις 8 Απριλίου 2012, λόγω δυσλειτουργίας στο σύστημα επικοινωνίας, μετά από δέκα χρόνια λειτουργίας, τα διπλάσια απ' όσα είχε σχεδιαστεί (ESA).

ALOS (Advanced Land Observing Satellite, ALOS-1: 2006-2011, ALOS-2: 2014-2022, ALOS-3: 2022-2028)

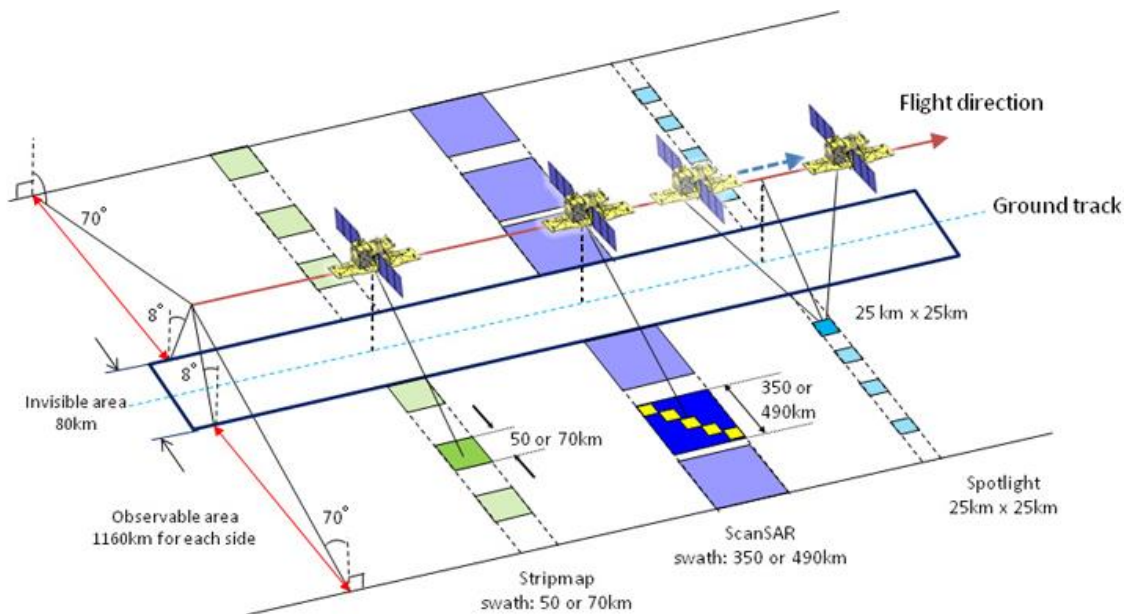
Η εκκίνηση της αποστολής του μεγαλύτερου Ιαπωνικού δορυφόρου μάζας 4.000 kg της Jaxa έλαβε χώρα στις 24 Ιανουαρίου 2006. Η κατασκευή ήταν σύμπραξη των NEC, Toshiba και της Mitsubishi Electric Corp. Κινούμενος σε ηλιοσύγχρονη τροχιά σε ύψος 692 km, παρείχε καθημερινή κάλυψη σε γεωγραφικά μήκη μεγαλύτερα των 55°, στη ζώνη του Ισημερινού και σε γεωγραφικό πλάτος 35° κάλυψη ανά μία ημέρα και κάθε δύο ημέρες για οποιοδήποτε άλλο μέρος στη Γη. Στόχο είχε τη βελτίωση της παρακολούθησης των καταστροφών και των φυσικών πόρων παγκοσμίως, προς κατοχύρωση της επίτευξης των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης σε

επίπεδο Περιφέρειας. Ακόμη, αποσκοπούσε στη δημιουργία δεδομένων υψηλής ανάλυσης, αναγκαίων προς παραγωγή Ψηφιακών Μοντέλων Αναγλύφου (DEM) και συναφών παραγώγων, στη σύνθεση χαρτογραφικών υποβάθρων κλίμακας 1:25,000 και στην παράλληλη ανάπτυξη των μέσων της τηλεπισκοπικής τεχνολογίας που θα χρησιμοποιούνταν μελλοντικά (JAXA).

Το όργανο καταγραφής Phased-Array L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR) που διέθετα, ήταν το αποτέλεσμα επικοδόμησης επί του προηγούμενου SAR του Jers-1. Η κατεύθυνση της ακτινοβολίας που χρησιμοποιούσε εκπεμπόταν υπό πλάγια οπτική γωνία $10-51^\circ$ από το ναδίρ, με ανάλυση 7-100 m και swath 40-350 km. Μία πλήρωση παγκόσμιας κάλυψης χρειαζόταν χρονικό διάστημα δύο εβδομάδων. Το PALSAR ήταν αφιερωμένο στην αποτύπωση των επιπέδων εδαφικής υγρασίας και των χαρακτηριστικών της ωκεάνιας επιφάνειας (JAXA).

Η αποστολή είναι μέλος του Third Party Missions Programme της ESA, βάσει του οποίου, όπως έχει συμφωνηθεί, παρέχεται η δικαιοδοσία της διανομής των δεδομένων ελεύθερα, μέσω του ESA Third Party Missions (TPM) Online Dissemination system. Οι μορφή τους ανάλογα με τον τρόπο σάρωσης είναι: Fine Beam Single polarisation(FBS) σε HH ή VV, Fine Beam Double polarisation (FBD) σε HH/HV ή VV/VH, ScanSAR HH ή VV και Polarimetry HH/HV + VV/VH. Βάσει επιπέδου επεξεργασίας διαχωρίζονται σε: Level 1 RAW, Level 1.1 SLC - Single Look Complex και Level 1.5 GRD – Ground Range Detected ή GEC. Η τελευταία μέρα της αποστολής ήταν στις 12 Μαΐου 2011 (ESA).

Στη συνέχεια, για την εκπλήρωση των προαναφερθέντων στόχων εκτοξεύτηκε ο ALOS-2 στις 24 Μαΐου 2014 μέσω του H-IIA Launch Vehicle (Shimoda & Kimura, 2018) και διανύει ήδη το όγδοο έτος. Φέρει τον βελτιωμένο αισθητήρα L band SAR PALSAR-2, βάσει του PALSAR-1, που διαθέτει ικανότητα λειτουργίας σε όλες τις πολώσεις. Η σάρωση γίνεται και από τις δύο πλάγιες κατευθύνσεις της κίνησης της πλατφόρμας (Εικόνα 25), αποδίδοντας εικόνες, με χωρική διακριτική ικανότητα που πλέον ορίζεται κατ' ελάχιστο στο 1 m για το αζιμούθιο και στα 3 m στο ground range για το Spotlight. Τα δεδομένα του είναι διαθέσιμα μέσω του δικτύου ALOS Data Nodes (JAXA). Στις μελλοντικές αποστολές βρίσκονται ο οπτικός δορυφόρος ALOS-3 και ο ALOS-4 που θα εφοδιαστεί με το PALSAR-3 (ESA).



Εικόνα 25: Ο τρόπος λειτουργίας του PALSAR-2 (Πηγή: <https://global.jaxa.jp/>)

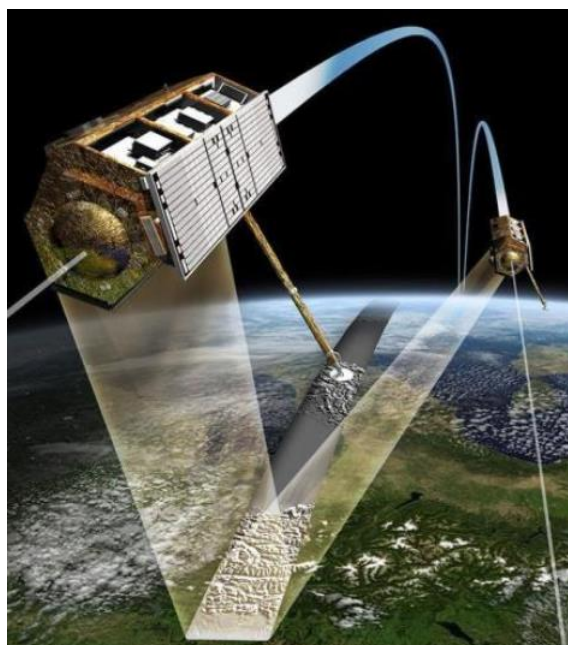
TerraSAR-X (TSX, 2007-) και **TanDEM-X** (TerraSAR-X Add-on for Digital Elevation Measurement, 2010-)

Πρόκειται για τους δίδυμους Γερμανικούς δορυφόρους (Εικόνα 26) της συνεργασίας μεταξύ της German Aerospace Center (DLR) και της EADS Astrium. Οι δύο δορυφόροι επιτυγχάνουν μοναδική γεωμετρική ακρίβεια (DLR). Σε ύψος 514 km από τον Ισημερινό σε ηλιοσύγχρονη τροχιά, σαρώνουν τη γήινη επιφάνεια με πρωταρχικό σκοπό τη δημιουργία παγκόσμιου τρισδιάστατου μοντέλου αναγλύφου υψηλής ακρίβειας. Ο πρώτος εκτοξεύτηκε στις 15 Ιανουαρίου 2007 και ο δεύτερος στις 21 Ιουνίου 2010. Το πρόγραμμα υλοποιείται, για την εξυπηρέτηση τόσο ερευνητικών όσο και εμπορικών σκοπών. Τα ερευνητικά δικαιώματα και τη διαχείριση των δορυφόρων κατέχει το DLR, ενώ τα εμπορικά η θυγατρική Infoterra της EADS Astrium GmbH, όπου χρηματοδοτήσε μέρος της κατασκευής του αισθητήρα SAR-X (DLR).

Η εκπλήρωση της δημιουργίας του TanDEM-X Digital Elevation Model (DEM) ολοκληρώθηκε το 2016, με περιθώριο σφάλματος μετρήσεων 1,3 m. Η πτήση τους λειτουργεί ως «bistatic interferometer», όντας τόσο στενή, μερικές φορές σε ελάχιστη απόσταση 120 m, ώστε να αποτελούν παγκοσμίως το μοναδικό σύστημα ικανότητας απόκτησης της τρισδιάστατης

αποτύπωσης του ανάγλυφου της γήινης επιφάνειας, με μία μόνο διέλευση. Ο επόμενος στόχος, κατασκευής παγκόσμιας κάλυψης 3D change map, βρίσκεται στο τελικό στάδιο ολοκλήρωσης (εντός 2022) (DLR).

Η αποστολή του TanDEM-X χρησιμοποιείται επιπλέον για πολλές εφαρμογές στην ξηρά, όπως παρακολούθηση των αλλαγών στο αστικό περιβάλλον και εντοπισμό αποψιλώσεων, στον ωκεανό και τους παγετώνες. Το 2012 ολοκλήρωσαν την πλήρη χαρτογράφηση της Γης, βάσει της οποίας δημιουργήθηκε το πρώτο υψηλής ακρίβειας 3d DEM (DLR).



Εικόνα 26: Οι δίδυμοι δορυφόροι TerraSAR-X και TanDEM-X (Πηγή: DLR <https://www.dlr.de/>)

Η κεραία SAR έχει άνοιγμα 80 cm, έχει την ικανότητα να κοιτά και από τις δύο πλευρές πτήσης, όμως χρησιμοποιεί τη δεξιά. Η αριστερή προορίζεται για περιπτώσεις ιδιαίτερων στόχων, λόγω ελλείψεων που υπάρχουν στη λειτουργία του. Τα δεδομένα τους διατίθενται από την ESA, μέσω του TPM Online Dissemination system, λόγω της συμμετοχής στο Third Party Missions Programme (ESA). Τα δεδομένα διατίθενται σε έξι διαφορετικές μορφές, με ανάλυση που κυμαίνεται από 0,25 m έως 40 m και ποικίλη έκταση, όπου οργανώνονται στα ακόλουθα πακέτα: Staring SpotLight, High Resolution SpotLight, SpotLight, StripMap σε basic, Interferometric και Maritime

pack και ακόμη, ScanSAR και Wide ScanSAR σε basic και Maritime pack. Η επεξεργασία τους μπορεί να γίνει αποκλειστικά με τη χρήση του εργαλείου Polarimetric SAR data Processing and Education (PolSARpro) (ESA).

Με κατασκευαστικό εύρος ζωής πεντέμισι ετών, ήδη έχουν διανύσει το διπλάσιο χρόνο και βρίσκονται σε άριστη κατάσταση. Ωστόσο, στις 12 Δεκεμβρίου 2021 αναφέρθηκε πως ο TanDEM-X βρίσκεται σε αναστολή λειτουργίας λόγω ενός προβλήματος, το οποίο αναμένεται να λυθεί εντός ολίγων εβδομάδων (DLR).

COSMO-SkyMed (CSK: 'COnstellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation, 2007-)

Ο Ιταλικός αστερισμός δορυφόρων εν ενεργεία, αποτελούμενος από τέσσερις πανομοιότυπους δορυφόρους, είναι η μεγαλύτερη επένδυση διαστημικής τηλεπισκόπησης της χώρας. Διαχειρίζονται από την Agenzia Spaziale Italiana (ASI) και την Italian Ministry of Defense (MoD), υπό την χρηματοδοτική ενίσχυση του 75% από την ASI σε συνεργασία με την Italian Ministry of Research (MUR) και 25% της MoD (ESA). Κατασκευασμένοι από την Thales Alenia Space Italia (TAS-I), με περίοδο εκτόξευσης 2007-2010, η τετράδα βρίσκεται σε κυκλική ηλιοσύγχρονη τροχιά στα 619.6 km, με επίγειο τμήμα υπό τη διεύθυνση του Telespazio. Ο αστερισμός έχει στόχο την εγγύηση της στρατιωτικής και πολιτικής ασφάλειας και προστασίας, με την παροχή πολλαπλών παρατηρήσεων της ίδιας περιοχής ανά ημέρα, σε παγκόσμια κλίμακα και με εφαρμογή στην παρακολούθηση καλλιεργητικών εκτάσεων, φυσικών καταστροφών, δασών, κινήσεων πάγων, κυματικών μοτίβων, θεμάτων χαρτογραφίας και γεωλογίας, κ.ά.

Η διάρκεια ολοκλήρωσης ενός κύκλου του αστερισμού είναι δεκαέξι ημέρες. Η επαναδιέλευση κάθε δορυφόρου γίνεται περίπου ανά πέντε ημέρες. Το SAR-2000 X-band (9.6 GHz) με μήκος κύματος 3,1 cm, προσφέρει προϊόντα από τρεις διαφορετικούς τρόπους λήψης: Spotlight υψηλής ανάλυσης (μόνο για το στρατό), Stripmap μεσαίας ανάλυσης, ScanSAR χαμηλής ανάλυσης, με επιλογές πόλωσης HH, VV, HV ή VH, με χωρική ανάλυση 1-100 m και πλάτος λωρίδας 10-200 km αναλόγως. Τα ελεύθερα δεδομένα μπορούν να λάβουν ιδρύματα και ερευνητές μέσω αιτήματος από την ιστοσελίδα COSMO-SkyMed ή λόγω της συμμετοχής στο Third Party Missions Programme, από την ιστοσελίδα της ESA, που διατηρεί ιστορικό αρχείο το οποίο εμπλουτίζεται με νέα δεδομένα. Τα εμπορικά δεδομένα διατίθενται από την εταιρεία e-GEOS των ASI και Telespazio (DLR).

Το 2000 η ASI και η Υπηρεσία Διαστήματος της Αργεντινής (Comisión Nacional de Actividades Espaciales, CONAE) ήρθαν σε συνεργασία, μέσω του συμφώνου «Sistema Italo Argentino di Satelliti per la Gestione delle Emergenze» (SIASGE). Το σύμφωνο όριζε θα παραγόταν ένα σύστημα δορυφόρων, το οποίο θα αποτελούταν από το σύστημα των Ιταλικών COSMO-SkyMed και εκείνο των Αργεντινών SAOCOM L-band SAR, υπό τον συντονισμό του ίδιου επίγειου τμήματος. Η βασική ιδέα ήταν η αποφυγή της ενίσχυσης της ήδη πολύπλοκης κατάστασης των δορυφορικών δεδομένων που υφίσταται, με ενοποίηση των προϊόντων των προγραμμάτων με

τη χρήση δεδομένων SAR-L και SAR-X για την εξαγωγή γνώσης σε θέματα διαχείρισης κινδύνων (Fasano & De Luca, 2018).

Η αποστολή **SAOCOM** (SAteélite Argentino de Observación COn Microondas) αποτελείται από δύο πανομοιότυπους δορυφόρους polarimetric L-band SAR με σχεδιαστικό προσδόκιμο πέντε ετών. Φιλοδοξεί να προωθήσει την ανάπτυξη του Εθνικού Διαστημικού Προγράμματος, με εφαρμογές στην υδρολογία, τη γεωργία, την γενικότερη παρακολούθηση φαινομένων στη Γη και στη διαχείριση φυσικών καταστροφών, για την εξυπηρέτηση των οικονομικών και παραγωγικών αναγκών της κοινωνίας της Αργεντινής (ESA). Ο SAOCOM-1A ξεκίνησε την πορεία του από την αεροπορική βάση Vandenberg στις 8 Οκτωβρίου του 2018, προωθούμενος από όχημα Falcon-9 της SpaceX και ο SAOCOM-1B στις 30 Αυγούστου 2020, από το συγκρότημα της αεροπορικής βάσης Cape Canaveral επίσης μέσω Falcon-9 της SpaceX. Εκτελώντας ανά ημέρα δεκαπέντε φορές ηλιοσύγχρονη τροχιά στα 620 km, οι πλατφόρμες μάζας 1600 kg χρειάζονται οκτώ ημέρες για μία παγκόσμια κάλυψη και δεκαέξι κάθε μία ξεχωριστά. Το όργανο καταγραφής SAR-L, με γωνία σάρωσης 15-50° από το ναδίρ, καταγράφει σε τρεις λειτουργίες: Stripmap, TopSAR narrow και TopSAR wide, με swath 30 έως 320 km και ανάλυση 10-100 m.

Μέσω της πλατφόρμας ASI SAOCOM data hub παρέχεται η πρόσβαση στα δεδομένα. Το δικαίωμα της διαφήμισης, όσων δεδομένων αφορούν την Ευρώπη και την Μεσόγειο, έχει συμφωνηθεί να το έχει η ESA. Η αποστολή παραμένει λειτουργική, και όπως εκτιμάται ακόμη και έως το 2023 και το 2025 αντίστοιχα (ESA). Ακόμη αναμένονται οι προγραμματισμένοι για το 2025 και 2026 SAOCOM-2A και 2B.

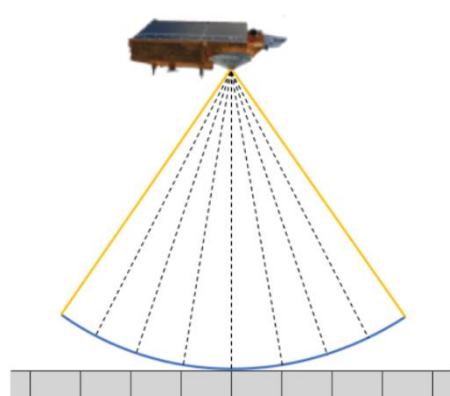
CryoSat

Το πρώτο πρόγραμμα της Ευρώπης από την ESA που επικεντρώνεται στην κρυόσφαιρα. Αποβλέπει στην καταγραφή του πάχους των πολικών μαζών πάγου και στην παρακολούθηση των αλλαγών που σημειώνονται, με τη χρήση της εξελιγμένης τεχνολογίας του SAR Interferometer Radar Altimeter (SIRAL) (ESA).

Η πρώτη αποστολή του CryoSat απέτυχε κατά την απογείωση στις 8 Οκτωβρίου 2005. Ο CryoSat-2, που μπήκε σε τροχιά στις 8 Απριλίου 2010 μέσω πυραύλου Dnepr, από το κοσμοδρόμιο Baikonur του Καζακστάν, έχει ξεπεράσει το λειτουργικό του εύρος, το οποίο επεκτάθηκε ως το

Δεκέμβριο του 2024. Βρίσκεται σε μη ηλιοσύγχρονη low earth orbit (LEO) σε ύψος 717 km. Τα δεδομένα που αποκτώνται είναι λεύθερα προς όλους.

Το SIRAL διαθέτει τρεις λειτουργίες. Η ειδοποιός διαφορά του είναι η λειτουργία SAR interferometry (SARIn or SIN), που έγκειται στον άμεσο εντοπισμό κεκλιμένων επιφανειών καλυμμένων με παγετώνες, σε σχέση με τα υπόλοιπα radar altimeters, στα οποία γίνεται είτε υπόθεση είτε χρησιμοποιείται μοντέλο αναγλύφου για την διόρθωση των μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, το SAR έχει δύο κεραίες σε απόσταση 1 m. Στην κάθε μία, το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα θα έχει διαφορετικό χρόνο έλευσης, άρα διαφορά φάσης, εφόσον δεν προέρχεται από το ναδίρ, όπου οι χρόνοι θα ταυτίζονταν. Η μέτρηση αυτή τη διαφοράς εφαρμόζεται στα σημεία όπου διχοτομούνται και γλιστρούν οι στρώσεις των παγετώνων (Bouzinac, 2019).

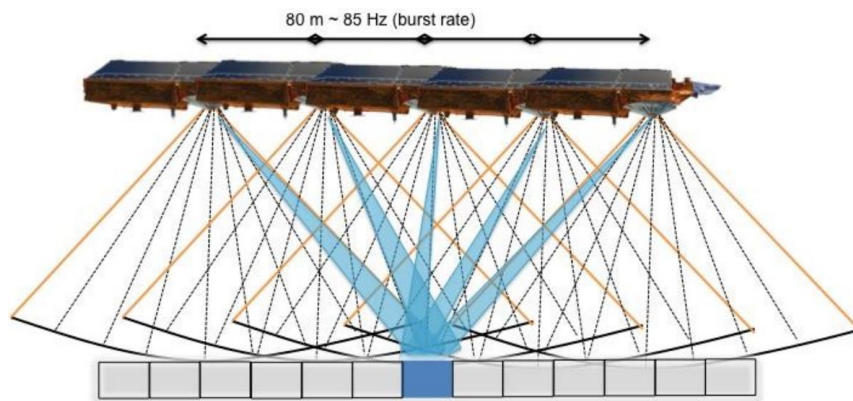


Εικόνα 27: Η γεωμετρία ενός burst του SIRAL σε LRM

(Πηγή: <https://earth.esa.int/>)

Η Low Resolution Mode (LRM) ενδείκνυται για τον ανοιχτό ωκεανό και τα λεία περιθώρια παγετώνων. Συμπεριφέρεται όπως τα συμβατικά radar altimeters που «βλέπουν» τόση έκταση όση επιτρέπεται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Οι παλμοί διαδίδονται με διαστήματα παύσης 500 μs ανάμεσα στους.

Στη Synthetic Aperture Radar Mode (SAR) μία δέσμη παλμών δημιουργείται με διαστήματα 50μs, διαχωρίζοντας το footprint σε 64 λωρίδες (8 στην απλοποίηση της Εικόνα 27) έκτασης 250 m. Ένα διάστημα 50μs αντιστοιχεί σε 80 m μετακίνησης του δορυφόρου (Εικόνα 28). Συνεπώς, κάθε στόχος στο έδαφος αποτυπώνεται πολλαπλές φορές. Μείωση του θορύβου εξασφαλίζεται εφαρμόζοντας την τεχνική της υπέρθεσης στις λωρίδες που έχουν επανασαρωθεί και υπολογίζοντας τη μέση τιμή των σιβιάδων. Η λειτουργία αυτή δίνει άριστα αποτελέσματα σε επίπεδες επιφάνειες πάγου στη θάλασσα.



Εικόνα 28: Η γεωμετρία πολλαπλών bursts του SIRAL σε LRM (Πηγή: <https://earth.esa.int/>)

Η βάση δεδομένων είναι προσβάσιμη από τον CryoSat Science server (<ftp://science-pds.cryosat.esa.int/>) ή μέσω του CryoSat User Tool (<http://science-pds.cryosat.esa.int/>), όπου απαιτείται η εγκατάσταση του λογισμικού. Επίσης, ειδικές συλλογές δεδομένων βρίσκονται από την κεντρική ιστοσελίδα της ESA, όπως το CryoSat Antarctic DEM ή τα CryoSat Baseline C samples, που είναι δείγματα των μελλοντικών πρωτότυπων και προορίζονται για την ανάπτυξη της εξοικείωσης των χρηστών. Η επεξεργασία που δέχονται τα Level 0 προς τη μετατροπή σε L1B και L2 βασίζεται σε δύο ανεξάρτητες ακολουθίες, που καταλήγει σε εύρος αποτελεσμάτων, όπως αναλύεται ακολούθως (ESA):

Ακολουθία Ice:

- Near Real Time (NRT): Fast Delivery Marine (FDM) LRM, NRT SAR και SIN, διαθέσιμα μετά το πέρας τριών ωρών από την σάρωση
- Offline: LRM, SAR και SIN, ο απαιτούμενος χρόνος για τη δημιουργία τους είναι τριάντα ημέρες

Και Ocean:

- NRT Ocean Products (NOP): LRM, SAR και SIN, διαθέσιμα τρεις ώρες μετά την απόκτηση
- Intermediate Ocean Products (IOP): LRM, SAR και SIN, μετά από δύο ή τρεις ημέρες
- Geophysical Ocean Products (GOP): LRM, SAR και SIN, μετά από 30 ημέρες

Για την ανάλυση, την επεξεργασία και την οπτικοποίηση τους υπάρχει ευρύτητα επιλογών.

- VtCryoSat: διαδραστικό περιβάλλον βελτιστοποίησης της διαδικασίας αναζήτησης και προσπέλασης δεδομένων
- CryoSat User Tool: αυτόνομο πρόγραμμα των Windows. Προσφέρει τη δυνατότητα απεικόνισης και προσπέλασης από FTP servers ή τοπικούς δίσκους.
- CryoSat Software Routines: επιτρέπουν την εισαγωγή των CryoSat Level 1, and Level 2 Earth Explorer Format (EEF) σε functions της γλώσσας προγραμματισμού C και Interactive Data Language (IDL)
- CryoSat Matlab routines: επιτρέπουν τη χρήση των Level 1, Level 2 and Level 2I Earth Explorer Format (EEF) στο Matlab.

ICEYE

Ο αστερισμός ICEYE αποτελείται από 14 X-band SAR δορυφόρους “New Space satellites” Φινλανδικής εταιρείας. Ο πρώτος ICEYE-X1 τέθηκε σε τροχιά το 2018. Σκοπό έχει την υποβοήθηση της λήψης αποφάσεων, κυβερνητικών φορέων και επιχειρήσεων, με την παροχή αξιόπιστων δεδομένων. Οι νέας γενιάς δορυφόροι σημειώνουν σημαντικές καινοτομίες στην χαρτογράφηση πλημμυρικών φαινομένων και στην αποτύπωση των μεταβολών που υφίστανται στη γήινη επιφάνεια, της τάξης του 1 mm, λόγω της υψηλής συχνότητας επαναδιέλευσης, που κυμαίνεται από 4 έως 12 ώρες, επιτρέποντας τον εντοπισμό τον πιο ανεπαίσθητων αλλαγών (change detection) και για πρώτη φορά την πρόβλεψη φαινομένων, όπως σεισμούς, χιονοστιβάδες και εκρήξεις ηφαιστειών. Προσφέροντας το πλεονέκτημα αυτό, οι εθνικές υπηρεσίες έχουν το χρονικό περιθώριο να δράσουν αποτρέποντας τη μετατροπή τους σε καταστροφικά γεγονότα (ICEYE).

Πρόκειται για τους πρώτους δορυφόρους που έχουν τόσο μικρή μάζα (85 kg). Διαθέτουν τεχνολογία SAR με εξαιρετική σχέση κόστους-απόδοσης. Ο αισθητήρας SAR μπορεί να σαρώνει και από τις δύο πλευρές της διεύθυνσης κίνησης του δορυφόρου, επιτυγχάνοντας τη συχνότερη πλήρη SAR χαρτογράφηση της Γης που έχει ποτέ σημειωθεί (ICEYE).

Διαθέτει τρεις λειτουργίες: Strip, Spot, Scan με πόλωση VV και δύο επίπεδα επεξεργασίας Complex (SLC) and Amplitude (GRD) (ICEYE):

- Strip: μία μακριά λωρίδα παράλληλη με τη διεύθυνση κίνησης του δορυφόρου, ως το αποτέλεσμα συνεχούς σάρωσης υπό συγκεκριμένη γωνία, χωρικής ανάλυσης 3 m και ραδιομετρικής μικρότερης του 1 dB.
- Spot: Ο χρόνος σάρωσης ενός συγκεκριμένου σημείου είναι αυξημένος, λόγω της στόχευσης του αισθητήρα, επιτυγχάνοντας τη βελτίωση της ανάλυσης στο αζιμούθιο 0.25 m (0.5 m στο range), μέσω του προσαυξημένου ανοίγματος κεραίας. Όταν η εικόνα προβάλλεται στην διεύθυνση του εδάφους, καλύπτει έκταση 5 km x 5 km κι έχει ανάλυση 1 m.
- Scan: βάσει της μεθόδου TOPSAR, παρά της συμβατικής SCANSAR, αποτυπώνει έκταση 100 km x 100 km σε ανάλυση ελαφρώς καλύτερη από 15m.

Η μορφή των δεδομένων που παρέχονται είναι Level-1 SLC ή LEVEL-GRD. Τα πρώτα αποθηκεύονται σε μορφή Hierarchical Data Format (HDF5), ενώ τα GRD είναι σε μορφή GeoTiff, όπου παράλληλα συνοδεύονται με αρχείο μεταδεδομένων xml. Η δυνατότητα εισαγωγής και επεξεργασίας βάσει, της έκδοσης 7.0.1 ή νεότερης, του λογισμικού SNAP της ESA είναι εφικτή. Πρόσβαση στα δεδομένα του αστερισμού παρέχεται από την ESA, εφόσον σταλεί και γίνει αποδεκτό το αίτημα επιστημονικής διερεύνησης, αποδίδοντας περιορισμένο αριθμό δεδομένων ανά έργο (ESA).

3.8 Πρόγραμμα Copernicus

Πρόκειται για πρόγραμμα το οποίο οικοδομείται πάνω στο προηγούμενο ευρωπαϊκό πρόγραμμα παρακολούθησης της γης “Global Monitoring for Environment and Security” (GMES). Αποτελεί συνεργασία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (European Commission) με τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EE), τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA), τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος ΕΟΠ (European Environmental Agency - EEA), τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό για την Εκμετάλλευση Μετεωρολογικών Δορυφόρων (EUMETSAT), το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προβλέψεων (ECMWF), τις Υπηρεσίες της ΕΕ και την Mercator Océan, ως προς τη χρηματοδότηση των διαστημικών υποδομών και το συνδυασμό δεξιοτήτων και τεχνογνωσίας, για την εκμετάλλευση του διαστήματος προς όφελος

των πολιτών, της οικονομίας, των πολιτικών κέντρων λήψης αποφάσεων σχετικά με το περιβάλλον και την ασφάλεια (ESA). Σύμφωνα με τον κανονισμό θέσπισής του Προγράμματος Copernicus (ΕΕ) αριθ. 377/2014 από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο, είναι καθοδηγούμενο από τους χρήστες και δεν έχει στρατιωτικό χαρακτήρα. Επίσης, ο νεότερος κανονισμός που προσφάτως θεσπίστηκε, διατηρεί το συγκεκριμένο χαρακτήρα του Προγράμματος (“Κανονισμός (ΕΕ) Αριθ.2021/696,” 2021).

Οι απώτεροι στόχοι του Προγράμματος Copernicus έχουν άξονα την στήριξη της Ευρώπης και της παγκόσμιας κοινότητας γενικότερα. Αποσκοπεί στην ενίσχυση των ευρωπαϊκών πολιτικών και των παγκόσμιων πρωτοβουλιών, όπως για παράδειγμα τη στρατηγική «Ευρώπη 2020» για έξυπνη, βιώσιμη και χωρίς αποκλεισμούς ανάπτυξη και το Global Earth Observation System of Systems (GEOSS), προωθώντας τη χρήση της γεωσκόπησης σε εφαρμογές και υπηρεσίες προστασίας του περιβάλλοντος, πολιτικής προστασίας και ασφάλειας (Εικόνα 29), εξασφαλίζοντας παράλληλα στην Ευρώπη την ανεξάρτητη ικανότητα λήψης αποφάσεων και δράσης βάσει των παρεχόμενων υπηρεσιών (“Κανονισμός (ΕΕ) Αριθ.2021/696,” 2021).

Το σύνολο των ανωτέρω στόχων στηρίζεται στην παροχή δορυφορικών και επιτόπιων δεδομένων και πληροφοριών που χαρακτηρίζονται από ακρίβεια, αξιοπιστία και είναι διαθέσιμα σε μακροπρόθεσμη και σταθερή βάση, σε συνεργασία με εθνικά και παγκόσμια συστήματα και δίκτυα παρακολούθησης.

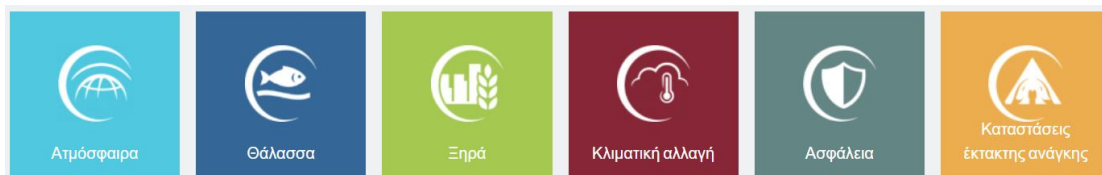
Ο βαθμός επίτευξης των διατυπωμένων στόχων αξιολογείται βάσει ορισμένων δεικτών σχετικά με τα δεδομένα που διατίθενται. Η αξιολόγηση γίνεται βάσει των απαιτήσεων παροχής, τη μετρούμενη ζήτηση δεδομένων βάσει του πλήθους χρηστών και την επέκταση της προσβασιμότητας σε δεδομένα προστιθέμενης αξίας. Ειδικότερα, η εκτίμηση αφορά το επίπεδο αξιοποίησης και πλήρωσης των αναγκών των οργανισμών, τόσο σε ευρωπαϊκό, όσο και σε διεθνές και τοπικό επίπεδο (“Κανονισμός (ΕΕ) Αριθ.2021/696,” 2021).

Πρόκειται για το δεύτερο μεγαλύτερο διαστημικό πρόγραμμα της ΕΕ, μετά το σύστημα πλοήγησης Γαλιλαίος (ESA). Η δομή του συνίσταται από τα τρία ακόλουθα σκέλη (“Κανονισμός (ΕΕ) Αριθ.2021/696,” 2021):

α) **τις υπηρεσίες**: δίδονται πληροφορίες για την παρακολούθηση έξι τομέων αναφορικά με την ατμόσφαιρα, τη θάλασσα, την ξηρά, την κλιματική αλλαγή και την διαχείριση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και ασφάλειας (*Εικόνα 29*)

β) **το διαστημικό τμήμα**: διασφαλίζει βιώσιμη διαστημική επισκόπηση

γ) **το επίγειο τμήμα**: υπεύθυνο για συντονισμένη πρόσβαση στις πληροφορίες όλων των εγκαταστάσεων



Εικόνα 29: Οι υπηρεσίες του Copernicus (Πηγή: <https://www.copernicus.eu/el>)

Πιο αναλυτικά οι υπηρεσίες του Copernicus αφορούν ζητήματα τα οποία χωρίζονται σε έξι κατηγορίες (*Εικόνα 29*). Στις κατηγορίες περιλαμβάνονται ζητήματα όπως της ποιότητας του αέρα, του κλίματος, της χημικής σύστασης της ατμόσφαιρας, της κατάστασης των ωκεάνιων και θαλάσσιων περιβαλλόντων για τη ναυτιλιακή ασφάλεια, τον εντοπισμό ροών αποβλήτων, της βιοποικιλότητας, τη χρήση γης, την εδαφοκάλυψη και των φυσικών πόρων. Ακόμη, σε ειδική κατηγορία εντάσσονται οι υπηρεσίες που σχετίζονται με τον εντοπισμό γεωφυσικών κινδύνων και τη διαχείριση καταστροφών σε όλα τα επίπεδα, από την πρόληψη έως την αποκατάσταση ("Κανονισμός (ΕΕ) Αριθ.2021/696," 2021).

Το Copernicus διαθέτει τους γεωσκοπικούς δορυφόρους Sentinel (1,2,3, 4, 5, 5P και 6) αποκλειστικά για την κάλυψη των υπηρεσιών που προσφέρει. Κάθε αποστολή επικεντρώνεται σε συγκεκριμένο τομέα δορυφορικής τηλεπισκόπησης πχ. παρακολούθηση ατμόσφαιρας, ωκεανών, ξηράς κ.ά. Δεδομένα, επίσης, λαμβάνονται και από αποστολές άλλων οργανισμών που κατέχουν δορυφόρους, με τις οποίες έχει συναφθεί συμφωνία, η οποία παρέχει το δικαίωμα απόκτησης, επεξεργασίας και διανομής των δεδομένων τους, το οποίο αναλαμβάνει το επίγειο τμήμα (ESA).

Το επίγειο τμήμα Ground Segment αποτελείται από το Core Ground Segment, το Collaborative Ground Segment and τα ground segments των contributing missions του Copernicus. Το Core Ground Segment περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, το Flight Operations Segment (FOS), που είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο όλων των διαδικασιών που απαρτίζουν τη λειτουργία του διαστημικού τμήματος, δηλαδή των δορυφόρων. Το Core Ground Segment, επίσης, αναλαμβάνει διαδικασίες που περιλαμβάνουν την εποπτεία και ρύθμιση, της ακριβούς τροχιάς κίνησης προς αποφυγή οποιασδήποτε σύγκρουσης, του Radar και των υπόλοιπων οργάνων, για την εξασφάλιση της αδιάκοπης δημιουργίας ποιοτικών λήψεων. Το Collaborative ground segment αποσκοπεί στην υποστήριξη του Core Ground Segment. Ο ρόλος του είναι να πραγματοποιεί εκτεταμένη διερεύνηση για την ανάπτυξη πρωτότυπων τρόπων αξιοποίησης και βελτίωσης των αποστολών, με άξονα τις απαιτήσεις των τεχνολογικών τομέων και την πρωτοτυπία. Τα απαραίτητα συμπληρωματικά δεδομένα προσφέρονται από τα Copernicus contributing mission ground segments, που εκτελούν ανεξάρτητα τις διαδικασίες απόκτησης, επεξεργασίας, αρχειοθέτησης και διανομής τους (ESA).



Εικόνα 30: Το σύστημα πρόσβασης των δεδομένων Sentinel (Πηγή: Knowelden, 2019)

Τα δορυφορικά δεδομένα παρέχονται και διακινούνται ελεύθερα προς το ευρύ κοινό, τις υπηρεσίες του Copernicus, δορυφορικές υπηρεσίες παγκόσμιας εμβέλειας και συνεργαζόμενων

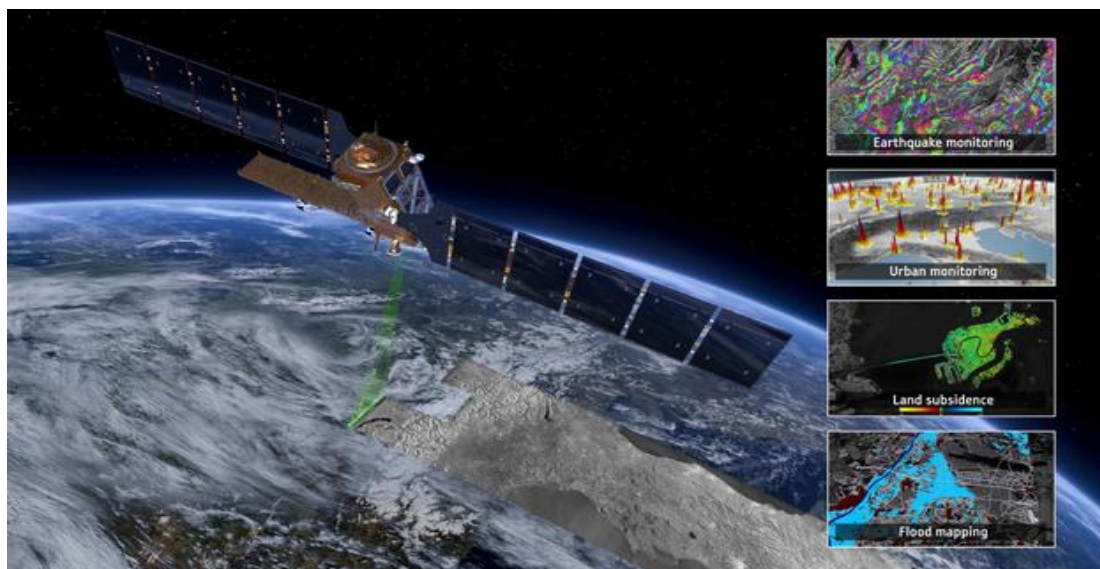
κρατών, μέσω ενός δικτύου (*Εικόνα 30*), το οποίο έχει σημείο εκκίνησης τα Payload Data Ground Segment PDGS, στα οποία εκτελούνται διαδικασίες αρχειοθέτησης των δεδομένων για μακροπρόθεσμη διαθεσιμότητα. Κάθε πολίτης μπορεί να έχει πρόσβαση σε αυτά μέσω της υπηρεσίας Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), με μοναδική προϋπόθεση την απλή εγγραφή χρήστη στην πλατφόρμα. Το λογισμικό Sentinel Application Platform (SNAP) περιλαμβάνει εργαλείοθήκες (<https://step.esa.int/main/download/>) για την επεξεργασία οποιουδήποτε τύπου δεδομένων Sentinel και ευρέως φάσματος δεδομένων, όπως του προγράμματος Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) και του δορυφόρου PROBA-Vegetation.

3.8.1 Copernicus Sentinel 1 Mission

Το πρόγραμμα Copernicus αντιπροσωπεύει το ενεργητικό παρατηρητήριο της Ευρώπης (Bouzinac, 2019). Συνιστά προσθήκη στο δορυφορικό σύνολο του πρώην Global Monitoring for Environment and Security (GMES), εξασφαλίζοντας την αδιάκοπη παροχή δεδομένων όπως προαναφέρθηκε. Η πρώτη αποστολή Sentinel 1 Mission, χρηματοδοτούμενη από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και υπό την σχεδιαστική και κατασκευαστική ευθύνη της ESA, έχει σκοπό την απόδοση χρονικής συνέχειας στο έργο των προγενέστερων ERS-1, ERS-2, Envisat and Radarsat 1 και 2, για την καταγραφή δεδομένων SAR-C, υποστηρίζοντας έτσι εφαρμογές που απαιτούν ευρείες χρονοσειρές (ESA). Η αποστολή είναι σχεδιασμένη ακριβώς για να προσφέρει συχνή και έγκαιρη επανάληψη κάλυψης της ίδιας περιοχής, ώστε να συμβάλλει στην παρακολούθηση πετρελαιοκηλίδων, εδαφικών κινήσεων και παραμορφώσεων, στην πρόβλεψη φυσικών καταστροφών και στη διαχείριση τους (*Εικόνα 31*), όπως σε σεισμούς και πλημμύρες. Όπως, επίσης, σε πολλούς ακόμη τομείς και υπηρεσίες, όπως την παρακολούθηση της παγοκάλυψης στην Αρκτική, τη χαρτογράφηση τροπικών δασών που συνήθως βρίσκονται υπό συνθήκες νεφοκάλυψης, της υγρασίας του εδάφους και των αναμενόμενων αποδόσεων των καλλιεργητικών εκτάσεων (ESA).

Ο αστερισμός των δύο δορυφόρων είναι ικανός να αποδίδει αδιαλείπτως. Στους ωκεανούς μέσω των κυματικών εικόνων η παρατήρηση είναι συνεχής, όπως και η παρακολούθηση δρομολογίων που εκτελούνται καθημερινά διαμέσου αυτών. Ακόμη, σε ημερήσια βάση καλύπτεται το σύνολο των παράλιων ζωνών της Ευρώπης και περιοχές που το υδάτινο στοιχείο

συνυπάρχει σε στερεή και υγρή μορφή. Οι δορυφόροι Sentinel-1 στοιχειοθετούν για την κατάσταση ολόκληρης της Γης ανά δύο εβδομάδες (ESA).



Εικόνα 31: Το ευρύ φάσμα εφαρμογών που προσφέρει ο Sentinel 1 (Πηγή: ESA <https://www.esa.int/>)

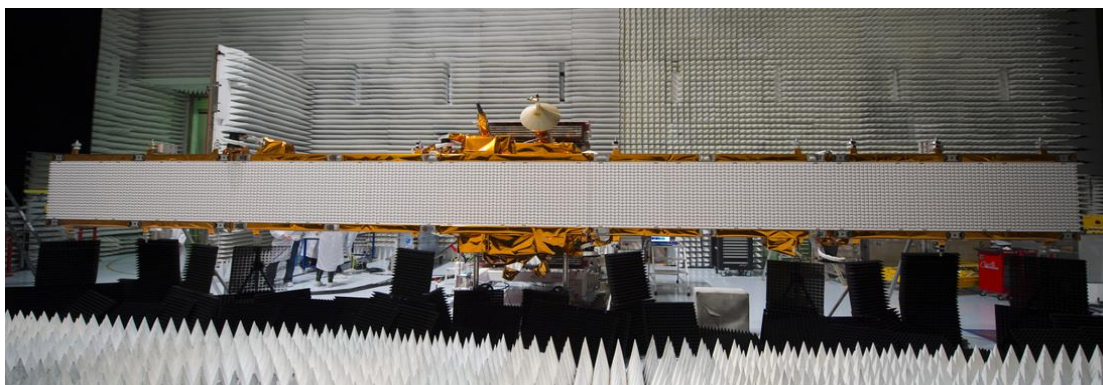
Το SAR-C πληρεί όλες τις προϋποθέσεις ώστε να χαρακτηρίζεται το καλύτερο εργαλείο για την κατανόηση και μέτρηση φαινομένων, όπως η εδαφικές καθιζήσεις και οι μεταβολές σε κατασκευαστικά έργα. Βάσει του συγκεκριμένου οργάνου καταγραφής είναι εφικτή η αποτύπωση σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια, όπως ανεπαίσθητες μετατοπίσεις, ενδείξεις επικινδυνότητας για την ασφάλεια της ακεραιότητας μεμονωμένων δομών ή ολόκληρων οικισμών ή την καταγραφή κατεστραμμένων δομών, που με διαφορετικά όργανα η πραγμάτωση τους απαιτεί πολύ περισσότερους πόρους. Με τη μέθοδο της συμβολομετρίας (Interferometry) αλλαγές της τάξης μερικών χιλιοστών είναι ανιχνεύσιμες. Η αξιοποίηση της μεθόδου απαιτεί κατ' ελάχιστο δυο λήψεις.

Οι δύο δίδυμοι δορυφόροι, σχεδιασμένοι να διαρκέσουν επτά έτη και εξοπλισμένοι με ενεργειακή επάρκεια δώδεκα ετών, είναι ηλιοσύγχρονης τροχιάς στα 693 km με κλίση 98.18°. Ο Sentinel-1A κατασκευάστηκε από την Thales Alenia Space Italy. Η εκτόξευση του δορυφόρου, βάρους 2.3 τόνων, έγινε στις 3 Απριλίου του 2014, με πύραυλο Soyuz από τη διαστημική Βάση στο Κούρου της Γαλλικής Γουϊάνας (ESA). Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του ραντάρ ήταν της Airbus DS Germany, ενώ το κεντρικό υποσύστημα ηλεκτρονικών του ραντάρ της Airbus DS UK. Η πρόσβαση των χρηστών στα δεδομένα έγινε αρχής γενομένης από 6 Οκτωβρίου 2014.

Ο Sentinel 1-B μπήκε σε τροχιά στις 25 Απριλίου 2016, έχοντας ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά. Οι δύο δορυφόροι της αποστολής κινούνται στο ίδιο τροχιακό επίπεδο με διαφορά φάσης 180°. Στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη προσφέρεται καθημερινή κάλυψη. Σε μέσα πλάτη η επαναληψιμότητα των 12 ημερών, που ισχύει για κάθε δορυφόρο ξεχωριστά, μειώνεται στις 6 ημέρες με την ταυτόχρονη λειτουργία τους. Η πλήρωση 175 περιστροφών συνιστά έναν κύκλο πλήρους αποτύπωσης της Γης που συμπληρώνεται σε έξι ημέρες. Για τη συνεχή μετάδοση των δεδομένων αυτών στο επίγειο τμήμα, είναι εξοπλισμένοι με ακροδέκτη λέιζερ. Η διαμεσολάβηση γίνεται μέσω των δορυφόρων γεωστατικής τροχιάς του Ευρωπαϊκού Συστήματος Αναδιανομής Δεδομένων (ESA).

Όπως αναμένεται, η παροχή αξιόπιστων εικόνων για την αντιμετώπιση καταστροφικών φαινομένων θα συνεχιστεί τα επόμενα έτη, εφόσον το κατασκευαστικό εύρος ζωής των επτά ετών του Sentinel-1A εξαντλήθηκε τον Απρίλιο του 2021. Ωστόσο, σύμφωνα με το τελευταίο Status Report, από τις 23/12/2021, λόγω προβλήματος με το υποσύστημα παροχής ενέργειας, έχει σταματήσει η παραγωγή δεδομένων.

Όλα τα παραπάνω υλοποιούνται χάρις στο όργανο SAR-C (Εικόνα 32) που διαθέτουν, καταγράφοντας μονοφασματικές εικόνες στην δεξιά πλευρά της κίνησης του συστήματος, χρησιμοποιώντας τη συχνότητα 5.405 GHz του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, με μήκος κύματος ~5.54 cm. Οι απεικονίσεις που δίνονται, έχουν διαφορετική ανάλυση και κάλυψη, ανάλογα με τη λειτουργία η οποία χρησιμοποιείται (Εικόνα 33), μεταξύ των τεσσάρων διαθέσιμων: Strip Map (SM), Interferometric Wide swath (IW), Extra-Wide Swath (EW), WaveMode (WV), υποστηρίζοντας διπλή πόλωση (HH+HV, VV+VH) (ESA).

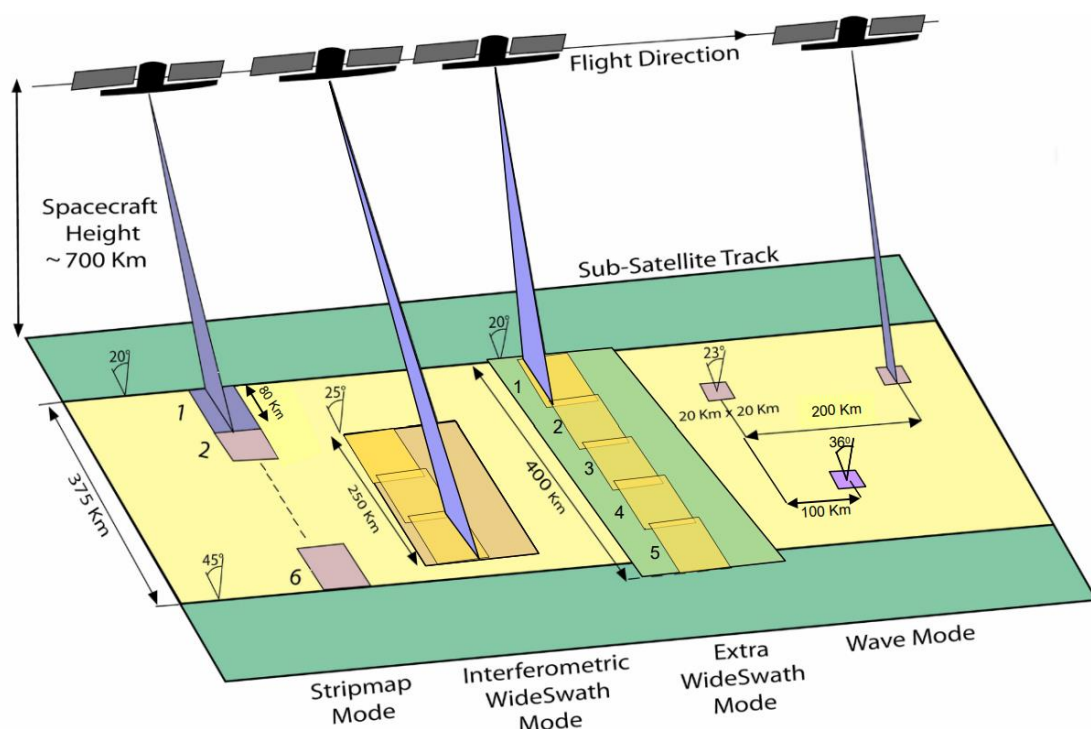


Εικόνα 32: C-band Synthetic Aperture Radar (Πηγή: ESA <https://www.esa.int/>)

Η κάλυψη του **SM** είναι χωρικής ανάλυσης 5 x 5 μέτρων, με swath 80 km. Το **IW** είναι αφιερωμένο στην εδαφολογική καταγραφή. Περιέχει δεδομένα συμβολομετρίας και έχει ανάλυση 5 επί 20 μέτρα. Συνθέτοντας εικόνα για μεγαλύτερη ζώνη 250 km σε τρία sub-swaths με την μέθοδο TOPSAR, εξασφαλίζεται καλύτερη ανάλυση, καθώς η ακτινοβολία διαδίδεται στη διεύθυνση του αζιμούθιου από πίσω προς τα εμπρός.

Με τη χρήση παρόμοιας τεχνικής, με το **EW** επιτυγχάνεται μικρή περίοδος επαναληψιμότητας και κάλυψη πολύ μεγάλης έκτασης. Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται κυρίως στην ωκεάνια παρακολούθηση και στις πολικές ζώνες. Σε αντίθεση με το IW, τα sub-swaths του EW είναι πέντε, έχοντας ανάλυση μικρότερη, της τάξης των 20 x 40 μέτρων.

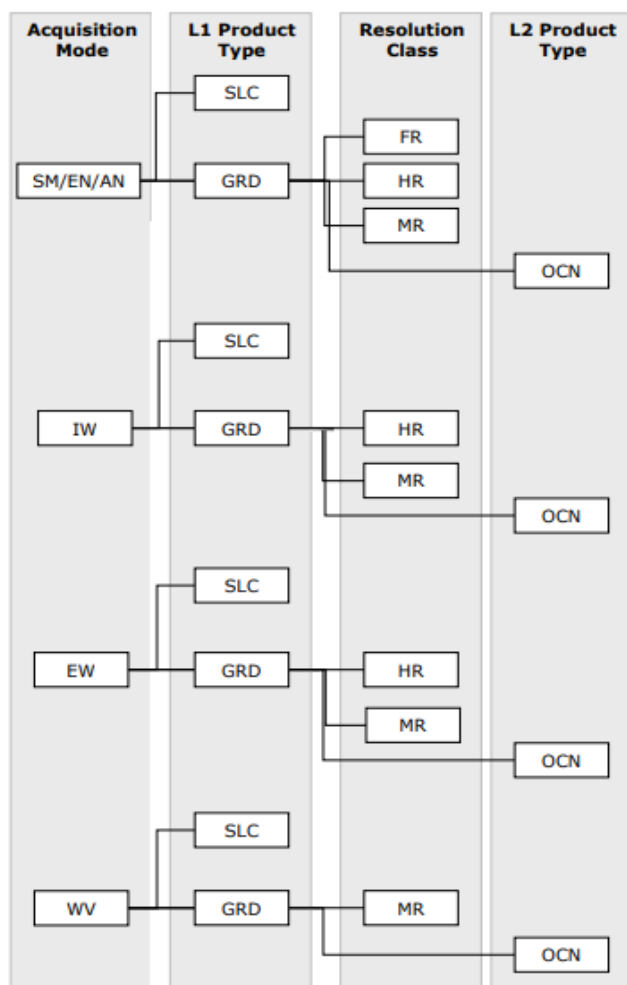
Τα **WV** αποτελούν συνθέσεις δύο SM λωρίδων ανάλυσης 20 x 20 km οι οποίες λαμβάνονται με εναλλασσόμενο τρόπο ανά 100 km και με διαφορετική γωνία. Όπως εύκολα γίνεται κατανοητό, σκοπό έχει την εμβάθυνση στα χαρακτηριστικά των θαλάσσιων κυμάτων, όπως το μήκος, τον προσανατολισμό και το ύψος τους. Για την εξασφάλιση υψηλότερης πληρότητας παρόμοιων μελετών συμπληρωματικά προτείνεται η αξιοποίηση των παγκόσμιων κυματικών μοντέλων (ESA).



Εικόνα 33: Sentinel-1 Acquisition Modes (Πηγή: Collecte Localisation Satellites (CLS), 2016)

Κάθε λειτουργία μπορεί να αποδώσει προϊόντα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους και το επίπεδο επεξεργασίας (Εικόνα 34), σε κάθε ένα από τα τέσσερα επίπεδα: Level-0, Level-1 SLC, Level-1 GRD και Level-2 OCN, τα οποία βρίσκονται σε μορφή Standard Archive Format for Europe (SAFE). Επί της ουσίας, το κάθε επίπεδο προκύπτει μέσω επεξεργασίας από το προηγούμενο, με αρχή τα ανεπεξέργαστα δεδομένα Level-0. Τα συγκεκριμένα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αν πρώτα δεν αποσυμπίστούν και περάσουν από μία πρώτη επεξεργασία.

Τα Level-1 διαθέτουν δύο μορφές, τα Slant Range - SLC και τα GRD, έχουν ευρεία χρήση και απευθύνονται προς την πλειοψηφία των χρηστών. Τα SLC είναι γεωαναφερμένα βάσει τροχιάς και δεδομένων αλτιμετρίας, έχοντας γεωμετρία ανάλογη της κεκλιμένης διεύθυνσης στην τροχιά του δορυφόρου (slant range) και διατηρώντας την πληροφορία της φάσης. Η ανάλυση τους καθορίζεται από τον τρόπο λήψης, ενώ τα ακόλουθα μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω



(Πηγή: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/187713>)

σε Full Resolution (FR), High Resolution (HR) και Medium Resolution (MR). Τα GRD είναι εστιασμένα και έχουν διαμορφωθεί βάσει επεξεργασίας multi-look, από την οποία εξαρτάται και η ανάλυση τους. Έπειτα έχουν προβληθεί στη γεωμετρία του εδάφους βάσει ελλειψοειδούς μοντέλου, χωρίς να διατηρούν τη φάση, γι' αυτό και σε εφαρμογές συμβολομετρίας επιλέγονται τα IW. Είναι διαθέσιμα σε IW και EW σε ανάλυση MR και HR, σε WV με ανάλυση MR και σε SM σε ανάλυση HR και FR.

Τα Level-2 OCN σχετίζονται με τις συνθήκες ταχύτητας - διεύθυνσης ανέμων, ρευμάτων και κυμάτων στο ωκεάνιο περιβάλλον περιλαμβάνοντας στοιχεία σχετικά με τα Ocean Wind Fields (OWI), τις Surface Radial

Εικόνα 34: Διάγραμμα των προϊόντων Sentinel 1

Velocities (RVL) και το Ocean Swell spectra (OSW).

- Τα OWI προκύπτουν από την επεξεργασία εικόνων Level-1 GRD σε SM, IW ή EW και εκτιμούν την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 m.
- Τα RVL προκύπτουν από τη διαφορά μεταξύ ενός Level-2 πλέγματος Doppler και ενός Level-1 γεωμετρικού Doppler.
- Τα OSW είναι το δισδιάστατο παράγωγο των Stripmap και Wave mode. Προσεγγίζει την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου ανά swell spectrum.

Σε ευρύτερο πλαίσιο, σκοπός του προγράμματος Copernicus είναι η δόμηση μιας συνεχούς βάσης καταγραφών που έως τώρα έχει στεφθεί με επιτυχία. Το φάσμα των χρήσεων των παραγώγων της αποστολής Sentinel 1 είναι πολύ μεγάλο και μέλλεται να περιλαμβάνει περισσότερες ωκεάνιες εφαρμογές με τα όργανα που θα φέρουν οι μελλοντικοί αντικαταστάτες Sentinel 1-C και Sentinel 1-D.

3.9 Υπηρεσία χαρτογράφησης έκτακτων αναγκών του Copernicus

Η υπηρεσία διαχείρισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης Copernicus Emergency Management Service (CEMS: <https://emergency.copernicus.eu/>) προσφέρεται δωρεάν και συμβάλλει, μέσω της χαρτογράφησης και της έγκαιρης προειδοποίησης, στη διαχείριση φυσικών καταστροφών, ανθρωπογενών καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και ανθρωπιστικών κρίσεων. Οι φορείς που υποστηρίζουν τις διαδικασίες αυτές σε τοπικό επίπεδο χαίρουν παροχής έγκαιρων και με ακρίβεια γεωχωρικών πληροφοριών, που έχουν αποκτηθεί μέσω της δορυφορικής τηλεπισκόπησης και που παράλληλα ενισχύονται από πηγές ανοιχτών δεδομένων. Βρίσκεται σε λειτουργία από της 1η Απριλίου 2012 παρέχοντας αρωγή σε ολόκληρο το φάσμα των καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, από την πρόληψη έως την αποκατάσταση. Όλα τα χαρτογραφικά παράγωγα είναι διαθέσιμα στη σχετική διαδικτυακή πύλη (Copernicus EMS).

Η Υπηρεσία διακρίνεται σε δύο σκέλη, το On - demand mapping και το Early warning and monitoring. Το πρώτο σκέλος παρέχει λεπτομερή πληροφόρηση για επιλεγμένα γεγονότα - κρίσεις σε παγκόσμια κλίμακα.

Το δεύτερο σκέλος διακρίνεται σε τρία επιμέρους τμήματα, τα οποία εξειδικεύονται στον ευρωπαϊκό και στον παγκόσμιο χώρο (Copernicus EMS):

- Το ευρωπαϊκό και παγκόσμιο σύστημα προειδοποίησης για τις πλημμύρες -European (EFAS) και Global Flood Awareness Systems (GloFAS): πρόβλεψη και πληροφόρηση για πλημμυρικά φαινόμενα που προήλθαν ή βρίσκονται σε εξέλιξη. Υπολογίζεται και χαρτογραφείται, επίσης, το κοινωνικό-οικονομικό κόστος που ενδέχεται να προκληθεί.
- Το ευρωπαϊκό σύστημα πληροφοριών για τις δασικές πυρκαγιές - European Forest Fire Information (EFFIS): παρακολούθηση πυρκαγιών near-real-time και υποστήριξη διαχείρισης δασικών πυρκαγιών.
- Το ευρωπαϊκό και παγκόσμιο Παρατηρητήριο Ξηρασίας – European (EDO) και Global Drought Observatory (GDO): έγκαιρη προειδοποίηση, ανάλυση και πρόγνωση φαινομένων ξηρασίας που παρατηρούνται ή φαίνεται πως θα συμβούν.

Η ενεργοποίηση του συστήματος για τη διερεύνηση καταστροφών γίνεται από εξουσιοδοτημένους χρήστες, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν κάποιο κράτος μέλος ή τον ευρωπαϊκό μηχανισμό πολιτικής προστασίας. Γενικότερα χρήστες της Υπηρεσίας μπορεί να είναι τοπικοί, εθνικοί, ευρωπαϊκοί ή παγκόσμιοι οργανισμοί κρατών μελών ΕΕ, που δραστηριοποιούνται στον τομέα της διαχείρισης κρίσεων, κράτη μέλη του ευρωπαϊκού μηχανισμού πολιτικής προστασίας, υπηρεσίες της ΕΕ, διεθνείς ανθρωπιστικές οργανώσεις κ.ά (Copernicus EMS).

Το Copernicus αποσκοπεί στην ανάπτυξη ευρωπαϊκών συστημάτων πληροφοριών με βάση τη δορυφορική τηλεπισκόπηση και τα επιτόπια δεδομένα. Το EFAS είναι το πρώτο επιχειρησιακό πανευρωπαϊκό σύστημα πρόβλεψης και παρακολούθησης πλημμυρών που συμβάλει παρέχοντας χωρικά δεδομένα και εικόνες για την ενίσχυση της ορθής λήψης αποφάσεων. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μέθοδοι πλημμυρικής χαρτογράφησης και αποτύπωσης την έκτασης λιμνών – υδάτινων δεξαμενών από την πρόσφατη παγκόσμια βιβλιογραφία.

4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Η πλημμύρα στην περιοχή Chamoli (Faizan & Palanisamy, 2021) της πολιτείας Uttarakhand της Ινδίας, που έλαβε χώρα στις 7 Φεβρουαρίου 2021, διερευνήθηκε με τη χρήση αυτόματης χαρτογράφησης Sentinel 1 εικόνων, μέσω της πλατφόρμας Google Earth Engine (GEE) με κώδικα σε JavaScript. Για την υποστήριξη της υπήρξαν επιτόπια και δεδομένα Sentinel 2, τα οποία αναλύθηκαν μέσω του λογισμικού ArcGis. Αφού, προηγήθηκε η γεωμετρική διόρθωση των οπτικών εικόνων, έγινε μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση βάσει ISODATA. Υποστηρίζεται πως τα ποιοτικότερα αποτελέσματα ελήφθησαν σε πόλωση VV και η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται από την απλότητα της, η οποία είναι πολύτιμη κατά τη διάρκεια της καταστροφής, ειδικότερα στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Για τη μελέτη της (Tavus et al., 2022) κατάρρευσης του φράγματος του Uzbekistan την 1 Μαΐου 2020 εφαρμόστηκε η «Random Forest (RF) supervised classification» σε δεδομένα Sentinel 1 και 2 για την υδατοδεξαμενή Sardoba. Στα συμπεράσματα αναφέρεται πως ο συνδυασμός των δύο τύπων δεδομένων οδηγεί σε πολύ ακριβή ταξινόμηση, ξεχωρίζοντας ακόμη και την πλημμυρισμένη βλάστηση.

Σε πρόσφατη μελέτη (Quang et al., 2021) με σκοπό την εύρεση τρόπων βιώσιμης διαχείρισης των υδάτων στην επαρχία Quang Nam του Βιετνάμ, έγινε χρήση των δεικτών NDWI και Modified Normalised Difference Water Index (NDWI) με τη χρήση δεδομένων Sentinel και Landsat. Οι ενδείξεις των αποτελεσμάτων χαρτογράφησης πλημμυρών ήταν θετικές ως προς την αξιοπιστία τους συγκριτικά με τα επίγεια δεδομένα, ενώ μέσω της παρούσας έρευνας αναδεικνύεται η ανάγκη ανάπτυξης τηλεπισκοπικών εφαρμογών σχετικά με την μέτρηση των επιφανειακών υδάτων, εφόσον οι πρακτικές συγκομιδής δεδομένων πεδίου κοστίζουν οικονομικά και χρονικά. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόστηκε σε reservoir, για τη χαρτογράφηση πλημμυρικής έκτασης και για την εκτίμηση της δυναμικής επιφανειακών υδάτων, ενώ υποστηρίζεται πως επιλύει το πρόβλημα έλλειψης in-situ στοιχείων.

Για την αποτύπωση της πλημμύρας (Moharrami et al., 2021) που συνέβη στην Ινδία το 2019 χρησιμοποιήθηκε η αυτόματη τεχνική αλγόριθμου εφαρμογής κατωφλιού Ochou ξεχωριστά στην κάθε εικόνα ώστε να βρεθεί το βέλτιστο κατώφλι. Η ακρίβεια διασταυρώθηκε μέσω

ξεχωριστών συνόλων δεδομένων και ήταν μεγαλύτερη του 90%, παρά το γεγονός πως εφαρμόστηκε μία τιμή κατωφλίου για όλες τις εικόνες και δεδομένης της πολυπλοκότητας των καλύψεων. Η μελέτη καταλήγει στην ανάδειξη της αυτόματης χαρτογράφησης ως μία έγκυρη και αξιόπιστη μέθοδο για την ταχεία ανίχνευση σε περίπλοκα περιβάλλοντα. Ωστόσο, η μέθοδος δεν ενδείκνυται για χωράφια

Η τεχνητή λίμνη Σμόκοβο, του Δήμου Σοφάδες (Φαλάρας, 2021) στην Δυτική πλευρά της λεκάνης απορροής της Θεσσαλίας, μελετήθηκε ανά μήνα, εποχικά και ετήσια ως προς τον εντοπισμό μοτίβων συμπεριφοράς. Αρχικά, η ύπαρξη της οφείλεται στην κάλυψη των αρδευτικών αναγκών των γεωργικών καλλιεργειών της περιοχής, με την παράλληλη ανακούφιση του υπόγειου υδροφορέα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι ορισμού κατωφλίου και υπολογισμού του δείκτη NDWI, σε εικόνες Sentinel 1 και Sentinel 2 αντίστοιχα.

Στη μελέτη των εκτεταμένων πλημμυρών (Li et al., 2021) στην πολιτεία Matara της Sri Lanka τον Μάιο του 2017 εφαρμόστηκε μοντέλο χαρτογράφησης μέσω της πλατφόρμας Google Earth engine και εικόνων Sentinel-1, το οποίο αποδείχθηκε πως είναι ευκόλως εφαρμόσιμο, φθινό και πολύ αποδοτικό. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Ochu-threshold. Η επίδραση του ανάγλυφου ήταν σημαντική στην περιοχή που υπήρχαν όρη, συνεπώς είναι απαραίτητη η χρήση μάσκας της εδαφικής σκίασης. Τα συμπεράσματα ήταν πολύ κοντά σε αυτά που είχαν εξαχθεί από το International Water Management Institute και είχαν 90.23% ακρίβεια. Συνεπώς, η αξιοποίηση της ενδείκνυται στη διαχείριση εκτάκτων αναγκών, για το συντονισμό των δράσεων και την γρήγορη και έμπιστη εκτίμηση της κατάστασης.

Το πλημμυρικό φαινόμενο στη λίμνη Tempe (Febrianti et al., 2020), μελετήθηκε με δεδομένα Sentinel 1 SAR πόλωσης VV. Πρόκειται για γεγονός που συμβαίνει κάθε χρόνο στην περίοδο των πυκνών βροχοπτώσεων, εφόσον για λόγους εξυπηρέτησης των οικισμών και των αγροτικών διεργασιών υπάρχει παλιρροιακή σύνδεση με τη λίμνη Sidenreng. Βάσει υπέρθεσης, των αποτελεσμάτων της μεθόδου εντοπισμού αλλαγών των SAR και των μωσαϊκών των εικόνων Landsat, από τις οποίες λαμβάνεται η γνώση των χρήσεων γης, παράχθηκε χάρτης των κτημάτων και οικοδομημάτων που επλήγησαν το 2018.

Στις πλημμυρικές πεδιάδες της Εσθονίας (Sipelgas et al., 2020) για την αποτύπωση της έκτασης της πλημμύρας κατά την περίοδο μέγιστης ροής του ποταμού, χρησιμοποιήθηκαν S1

(VH polarisation (IW mode) HV polarisation (EW mode) και S2 (MNDWI index) δορυφορικές εικόνες, που επεξεργάστηκαν στο περιβάλλον των προγραμμάτων SNAP και QGIS. Το κατώφλι που διαχώρισε τα πλημμυρισμένα pixel από την ξηρά εντοπίστηκε στις εικόνες S1, με τη μέθοδο (bimodal histogram analysis by expert evaluation for each tile), αφού παρατέθηκαν βάσει γωνίας πρόσπτωσης. Οι αποτυπώσεις που προέκυψαν ταυτιζόταν σε μεγάλο ποσοστό με συντελεστή συσχέτισης κ 0.78. Τέλος, η ακρίβεια της χαρτογράφησης εκτιμήθηκε βάσει Kappa coefficient παράλληλα με την ημι-αυτόματη ταξινόμηση (QGIS plugin).

Ο εντοπισμός μικρών υδατοδεξαμενών (Liuzzo et al., 2020) στην Ιταλική λεκάνη Belice της Σικελίας βασίστηκε στην παραμετροποίηση του δείκτη NDWI ($NDWI_m$), προς την καλύτερη από πλευράς αξιοπιστίας και ακρίβειας εντοπισμού, απόδοση. Δομήθηκε σε σειρά εικόνων Sentinel 2 από το 2015 έως το 2019. Η τροποποίηση είναι σύμφωνη με τη διαδικασία Bayesian και κυρίως οδεύει προς την αποφυγή των NDWI επιδράσεων σκέδασης των αερολυμάτων και του δομημένου περιβάλλοντος, ειδικά στο πράσινο και κοντινό υπέρυθρο, στις οποίες είναι ευαίσθητος ο δείκτης, ενώ η χρήση του είναι συχνότατη για την πλημμυρική χαρτογράφηση. Τελικά, σημαντική παρατήρηση είναι πως ο $NDWI_m$ αποδίδει σε λίμνες έκτασης μικρότερης του ενός εκταρίου, αψηφά προβλήματα που σχετίζονται με την ποιότητα των εικόνων και του ορισμού του καταλληλότερου κατωφλίου.

Στον έλεγχο καταλληλότητας (Pena-Regueiro et al., 2020) των μεσαίας χωρικής ανάλυσης Sentinel 2A/B (κανάλι 3 και 8) για τον εντοπισμό υδάτινων μαζών σε υδροβιότοπους, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις στη περιοχή Valencia της Ισπανίας, σε τρεις διακριτές περιόδους. Η απόδοση του NDWI ξεχώρισε. Για την εξακρίβωση της εγκυρότητας ορίστηκαν εξακόσια συνολικά τυχαία σημεία εντός και εκτός υδάτων. Η αξία της συγκεκριμένης μελέτης έγκειται στην την προοπτική που έχει θέσει, δηλαδή τη μελέτη των υδάτων στο εσωτερικό ενός υδροβιότοπου, το οποίο επηρεάζεται άμεσα από τις πολιτικές διαχείρισης, παρά την πλειοψηφία της βιβλιογραφίας που επικεντρώνεται στην έκταση αυτού, η οποία σχετίζεται με την επεκτατική δόμηση. Καταλήγοντας, υπογραμμίζεται η χρησιμότητα των καναλιών των Sentinel 2 για την κατανόηση της επίδρασης των επεμβάσεων στον υδρολογικό κύκλο.

Η κατάρρευση του φράγματος (Kim & Lee, 2020) Xe-Pian Xe-Namnoy στο Λάος μελετήθηκε βάσει Sentinel-1 GRD προϊόντων, σε σχέση με την έκταση της πλημμύρας που προκλήθηκε και τη μεταβολή της στάθμης του ταμιευτήρα. Για το πρώτο ζητούμενο, λοιπόν, εφαρμόστηκε

η ευρέως επιλεγόμενη μέθοδος προσαρμογής της κατανομής του ιστογράμματος βάσει μιας σταθεράς (a-stable histogram fitting) για την επιλογή κατωφλίου. Με το συνδυασμό δεδομένων DEM και της γνωστής έκτασης της επιφάνειας του ταμιευτήρα υπολογίστηκε ο όγκος νερού που διέφυγε, που ήταν το δεύτερο ζητούμενο (χαρακτηρισμός ως εύκολου και πρακτικού τρόπου). Όπως παρατηρήθηκε, υπάρχει μία ουσιαστική ειδοποιός διαφορά μεταξύ των τιμών της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας, όσων αφορά τη φορά διέλευσης του δορυφόρου κατά τη σάρωση. Η ανοδική φαίνεται να κατέχει πλεονέκτημα ακρίβειας κατά 7%, έναντι της καθοδικής. Ακόμη, αξιοποιήθηκαν τα φίλτρα Wiene και non-local means με σκοπό τη μείωση του θορύβου.

Το αντικείμενο που επιχειρεί (Barasa & Wanyama, 2020) να καλύψει η συγκεκριμένη μελέτη, είναι τα εποχικά πλημμυρικά φαινόμενα γλυκού νερού στα τροπικά περιβάλλοντα με τη χρήση Sentinel 1 SAR. Με σαφή προσδιορισμό των παραμέτρων, που αντλήθηκαν από τις τιμές οπισθοσκέδασης, εφαρμόζεται ταξινόμηση βάσει αντικειμενοστρεφή αλγόριθμου, για την παρατήρηση της ανακλαστικότητας της παρόχθιας βλάστησης και της εκτίμησης των πλημμυρικών μεγεθών. Η ύπαρξη βλάστησης στις λίμνες αποτυπώθηκε στα αποτελέσματα με τη διαφορά των 5db από τις πλημμυρισμένες εκτάσεις. Συμπερασματικά, αποδεικνύεται πως τα SAR αποτελούν κατάλληλα εργαλεία και για το σύνολο των δύο σκοπών.

Ακόμη, οι πλημμυρισμένες εκτάσεις (Cheng et al., 2019) του Xe-Pian Xe-Namnoy αποτυπώθηκαν με τη χρήση δύο εικόνων Sentinel 1 SAR στις 13 Ιουλίου 2018 και 25 Ιουλίου 2018. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλάμβανε την εφαρμογή κατωφλίου και τη σύνθεση πολλών καναλιών. Εφόσον η έκταση της επιφάνειας του νερού αλλάζει, θα παρατηρηθεί μεταβολή και στην ένταση της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας.

Επίσης, η λίμνη Poyang μαζί με την Dongting (Peng et al., 2019) του ποταμού Yangtze, της Κίνας μελετήθηκαν ως προς την έκταση και τα πλημμυρικά φαινόμενα με τη διεξαγωγή πλημμυρικής χαρτογράφησης βάσει Sentinel 1^η. Ο παραδοσιακός τρόπος εμπεριέχει την εφαρμογή αλγόριθμου κατωφλίου, με το πλεονέκτημα της ευκολίας και του χρόνου, που συνεπάγεται την εξαγωγή ανακριβών ταξινομήσεων και τον περιορισμό σε μικρής έκτασης περιοχές. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν πως τα radar είναι πηγή από την οποία μπορεί να γίνει ανεμπόδιστα η μακροχρόνια παρακολούθηση, αφού παραμερίζουν τις καιρικές συνθήκες και έχουν συνέχεια. Συνεπώς, βάσει παρόμοιων υδρολογικών μελετών, μπορούν να δομηθούν πορίσματα για το αποτύπωμα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Για την υποστήριξη των συμπερασμάτων, που

οδήγησαν στην αποτύπωση του μοτίβου εποχιακής διακύμανσης, χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματική ανάλυση μηνιαίων στοιχείων διαφοροποίησης του εμβαδού της έκτασης για την περίοδο 2015 έως 2019.

Η μεθοδολογία που προτάθηκε (Yao et al., 2019) για τη βελτίωση της χρονικής ανάλυσης των Landsat και εφαρμόστηκε με ποσοστό σφάλματος περιορισμένο στο 6%, σε 428 λίμνες και δεξαμενές έκτασης από $m \sim 2 \text{ km}^2$ ως $\sim 82,000 \text{ km}^2$, σε διάφορες περιοχές παγκοσμίως που συγκέντρωναν πλήθος περιοριστικών παραγόντων, όπως ταμιευτήρες με κάλυμμα πάγου ή χιονιού, με δενδριτικό σχήμα, με έντονο ανάγλυφο και φαινόμενα σκίασης. Χρησιμοποιήθηκε μάσκα σκίασης αναγλύφου επιπέδων εδαφικών κλίσεων και σκίασης Δοκιμάστηκε και σε οπτικά Sentinel 2 με επιτυχή ανάδειξη των ενδοετήσιων μεταβολών και προτείνεται η εφαρμογή της σε SAR. Ωστόσο, διαθέτει ορισμένους περιορισμούς. Αποδίδονται παρατηρήσεις που ένα μήνα ή ανά δύο μήνες, καθώς δεν είναι εφικτή η υποβάθμιση της ακρίβειας έναντι της χρονικής κάλυψης, η οποία εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων.

Η μελέτη (Moya et al., 2019) ερευνά τους λόγους για του οποίους οι χαρτογραφήσεις των πλημμυρών τη Δυτικής Ιαπωνίας του 2018 διέθεταν πολλά λάθη αναφορικά σε αγροτικές περιοχές, ώστε να αποτραπούν μεταγενέστερα, όπως και τυχόν λαθεμένης αφορμής συναγερμοί. Κατέληξαν σε τρεις βασικούς περιεκτικούς λόγους, σχετικά με τον μικρό όγκο των εικόνων εισαγωγής, την απαξίωση των μεταβολών οπισθοσκέδασης που συνοδεύουν τις αλλαγές των εποχών και τη διάδραση της συνιστώσας του μήκους κύματος με τους συγκεκριμένους στόχους. Πρότειναν μία λύση, η οποία βασίζεται στην κλασική coherence, με μία απλή μετατροπή. Η νέα παράμετρος ονομάστηκε “conditional coherence” και δεν απαιτεί την ύπαρξη συμπληρωματικών εξακριβωτικών δεδομένων. Η πρακτική εφαρμογή των δοκιμασιών έγινε σε τριάντα πέντε ορυζώνες, με εντοπισμό εσφαλμένων ταξινομήσεων κατά 81%, συγκριτικά με την κλασική μέθοδο.

Αφού, τονίζεται πως η σημαντικότητα (Tsyganskaya et al., 2019) της αποτύπωσης των πλημμυρισμένων εκτάσεων δεν είναι διόλου μονοσήμαντη, αλλά ευεργετεί πολλούς φορείς και εταιρείες, η μελέτη επικεντρώνεται στις πλημμύρες του 2018 στη δυτική Ιαπωνία. Εξετάζονται οι λόγοι για τους οποίους προκύπτει εσφαλμένη ταξινόμηση σε αγροτικές περιοχές. Εφόσον, τα δεδομένα SAR διαπερνούν τη βλάστηση επιτρέποντας την αποτύπωση του νερού που βρίσκεται από κάτω, επιλέχθηκαν για την εφαρμογή μιας νέας μεθόδου. Επιβεβαιώθηκε, λοιπόν, πως η

τεχνική αυτή βοηθά στον υπολογισμό της έκτασης ανοιχτής επιφάνειας νερού, αλλά και φυτοκαλυμμένης, συνεπώς και στο διαχωρισμό των πλημμυρισμένων αγροτικών εκτάσεων. Ωστόσο, επηρεάζεσαι ιδιαίτερα ανάλογα τα διαφορετικά είδη βλάστησης. Η πόλωση VV είναι υποστηρίχθηκε ως η ιδανικότερη.

Η πλημμύρα (Hajaj & Yarrakula, 2019) που συνέβη το 2018 στον ποταμό Nagavali, σύνηθες γεγονός για την περιοχή στη Andhra Pradesh της Ινδίας, μελετήθηκε με την αξιοποίηση εικόνων Sentinel 1. Τα δύο βασικά στάδια περιλαμβάνουν την προεπεξεργασία και την μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση. Ο διαχωρισμός των μόνιμων υδάτων έγινε με τη βοήθεια του Open Street Map. Υποστηρίζεται, πως αφενός υπάρχει το πλεονέκτημα παροχής προϊόντων χωρίς σύννεφα κατά τη διάρκεια των Μουσώνων, αφετέρου στο διάστημα των δώδεκα ημερών μπορεί να μην περιλαμβάνεται η κορύφωση του φαινομένου, ενώ λανθασμένες ταξινομήσεις μπορούν να γίνουν, λόγω της συνάφειας των τιμών πλημμυρισμένων εκτάσεων με αυτών του οδικού δικτύου.

Σε μελέτη εκτίμησης της κατάστασης της πλημμύρας (Diep et al., 2019) που συνέβη στο Long Xuyen το 2015 χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες S2 για τον υπολογισμό του δείκτη MNDWI, ενώ για τον έλεγχο της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων υπολογίστηκε η συσχέτιση με δεδομένα υδρολογικών σταθμών σε στατιστικό περιβάλλον SPSS με την τεχνική της γραμμικής παλινδρόμησης. Πρόκειται για περιοχή με κύρια χρήση την ύπαρξη ορυζώνων. Οι εικόνες ανάλυσης 10 και 20 μέτρων συγχωνεύτηκαν σε προϊόντα μεγάλης ανάλυσης των 10 μέτρων. Παρακάτω φαίνεται ο τύπος του δείκτη και τα κανάλια που αντιστοιχούν σε κάθε όρο του. Ακόμη, έγινε μη-επιβλεπόμενη ταξινόμηση με τη μέθοδο ISODATA για το διαχωρισμό των πλημμυρισμένων και μη pixel. Τα τελικά αποτελέσματα έδειξαν ισχυρή θετική συσχέτιση, με συντελεστές (R^2) 0.731 και 0.651 για τον κάθε υδρολογικό σταθμό.

Για λόγους απλής διαχείρισης, αλλά και για την άμεση ανταπόκριση σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, η εύρεση των υδάτινων μαζών με τη χρήση των δορυφόρων είναι απαραίτητη (Goumehei et al., 2019). Γι' αυτό προτάθηκε ένα μοντέλο επιβλεπόμενης ταξινόμησης συνάφειας βασισμένο σε Sentinel 1 SLC. Η εφαρμογή έγινε σε δυο υδατοδεξαμενές στο Δυτικό Ιράν. Η μέθοδος συγκρίθηκε και με την εφαρμογή κατωφλίου. Τα τελικά αποτελέσματα έδειξαν πως η μέθοδος είναι περισσότερο ακριβής, καθώς μπορεί να αποφύγει τη λανθασμένη ταξινόμηση του εδάφους, που έχει χαμηλές τιμές, ίδιες με το, με το διαχωρισμό της κλάσης

αυτής σε νερό και γυμνό έδαφος. Γενικότερα, είναι αξιόπιστη για την αναγνώριση και δημιουργία κλάσεων εικονοστοιχείων με παρόμοια ανακλαστικότητα, ενώ μπορεί να φέρει εξαιρετικά ακριβείς αναπαραστάσεις με τη χρήση SAR SLC σε ήρεμες μάζες.

Στην πολιτεία Kerala της Ινδίας (Vishnu et al., 2019) τα πλημμυρικά φαινόμενα του 2018 καταγράφηκαν βάσει εικόνων Sentinel 1 και Sentinel 2 για τις λίμνες Thrissur, Ernakulam, Alappuzha, Idukki and Kottayam. Η μέση τιμή του δείκτη NDWI της εικόνας Sentinel 2, που αντιστοιχεί στην περίοδο πριν το φαινόμενο (αρχές του έτους) συγκρίθηκε με τα δεδομένα SAR (21/8/2018), αποτυπώνοντας αύξηση της κάλυψης κατά 90%. Τα ποσοτικά αποτελέσματα σχετικά με την άνοδο της στάθμης είναι σχετικά και όχι ακριβή, καθώς η λήψη SAR είναι μεταγενέστερη της κορύφωσης του φαινομένου, όπου τα ύδατα είχαν υποχωρήσει κατά ένα βαθμό. Η μελέτη αυτή επιβεβαιώνει το πόρισμα προγενέστερων για την αποτελεσματικότητα της συνδυαστικής αξιοποίησης δορυφορικών πηγών, λόγω της έγκαιρης διαθεσιμότητας τους.

Οι επιδράσεις σημαντικών κλιματικών γεγονότων (Frappart et al., 2018) στην εποχιακή υπερχειλίση μετρήθηκαν στην μεγαλύτερη λίμνη Tonle Sap της Ανατολικής Ασίας μέσω εφαρμογής κατωφλιού σε εικόνες MODIS των δορυφόρων Terra και Aqua, χωρικής ανάλυσης πεντακοσίων μέτρων και φασματικής τριάντα έξι καναλιών. Η προσέγγιση ήταν βασισμένη στην εξαγωγή της έκτασης μέσω MODIS και αλτιμετρικών δεδομένων radar, Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3, ERS-2, ENVISAT, and SARAL. Στη συνέχεια από τον συνδυασμό των δυο έγινε σύνθεση της μεταβολής του αποθέματος της λίμνης και για τον προσδιορισμό της επίδρασης των υδατικών κατακρημνισμάτων υπολογίστηκε δείκτης «rainfall standardized anomaly index». Συμπερασματικά, η μέθοδος των MODIS και STRM DEM αποδείχθηκε πως καταλήγει σε υπερεκτίμηση της έκτασης, όμως δεν παύει να αποτελεί πολύτιμο εργαλείο.

Η μέθοδος ανάπτυξης ημιαυτόματης μεθόδου για την αποτύπωση υδάτινων εκτάσεων εφαρμόστηκε στην λεκάνη απορροής Merguelli της κεντρικής Τυνησίας και επτά μικρών υδάτινων δεξαμενών, έκτασης ενός έως δέκα εκταρίων, που βρίσκονται στην έκτασή της (Ogilvie et al., 2018). Για την εξερεύνηση των δυνατοτήτων των εικόνων, η ακολουθία εφαρμόστηκε σε 546 εικόνες Landsat 5, 7, και 8 από το 1999 έως το 2014, χρησιμοποιήθηκαν συμπληρωματικώς υδρομετρικά στοιχεία πεδίου για την ίδια περίοδο και εικόνες SPOT. Συμπεραίνεται, πως υπάρχει περιορισμός των Landsat, όταν πρόκειται για λίμνες έκτασης μικρότερης των τριών εκταρίων, λόγω του αυξημένου κανονικοποιημένου RMSE (27 %), το οποίο μειώνεται με το

συνδυασμό Sentinel 2. Όπως, επίσης απαγορευτικό είναι το κόστος για τα SPOT στην περίπτωση της μακροχρόνιας παρακολούθησης μεσαίου μεγέθους λεκανών και δεδομένης της μικρής έκτασης που καλύπτουν. Ο δείκτης MNDWI αναδείχθηκε ως ο πιο αποτελεσματικός μεταξύ των επικρατέστερων που εφαρμόζονται, ενώ τονίζεται η υψηλή ευαισθησία του σε μικρές αλλαγές κατωφλίου.

Στην περίπτωση της πλημμύρας του 2017 (Iglesias et al., 2018) στο Mumbai, έχει αναπτυχθεί τεχνική μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης με την επιλογή κατωφλίου. Η «DARES TECHNOLOGY», πάροχος μετρήσεων εδαφικών παραμορφώσεων σε παγκόσμιο επίπεδο, βασίστηκε σε δεδομένα Radar. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία, όπως οι πλειοψηφία διαθέτει δύο μέρη, αυτό της προεπεξεργασίας των Radar και εκείνο της χαρτογράφησης της πλημμυρικής έκτασης. Εφαρμόστηκε, σε τέσσερις εικόνες Sentinel 1 και περιλάμβανε και τη μέθοδο κατωφλίου. Έπειτα, διαχωρίστηκαν όσα pixel εμφάνιζαν διττό χαρακτήρα, ενώ αξιοποιήθηκαν και συμβολομετρικές παράμετροι, όπως και η συνάφεια. Απώτερος σκοπός είναι η απαλλαγή της εξάρτησης από δευτερογενή δεδομένα και όσο το δυνατό αυτοματοποίηση της διαδικασίας.

Στην πλημμύρα σε αγροτικές περιοχές του Τέξας και της Λουιζιάνας (Boryan et al., 2018) που προκάλεσε ο τυφώνας Harvey στην Αμερική το 2017 χρησιμοποιήθηκαν Sentinel-1 εικόνες βασισμένη σε χρήση ψηφιακής τιμής κατωφλίου. Στην προεπεξεργασία έγινε calibration to sigma naught, Range Doppler terrain correction and de-speckling (median 5x5 speckle filter) στο open source Sentinel Application Platform (SNAP) toolbox. Η λογαριθμική μετατροπή γίνεται για την ενίσχυση των χαμηλών τιμών που αντιστοιχούν στα πλημμυρισμένα πεδία και τη συμπίεση των τιμών που έχουν τα pixel με μεγαλύτερη τιμή. Η τιμή αποφασίζεται μελετώντας το λογαριθμικό ιστόγραμμα.

Η περίπτωση της πλημμύρας (Perrou et al., 2018) του ποταμού Στρυμόνα το 2015 μελετήθηκε με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Sentinel 1 SAR GRD από τον Οκτώβριο του 2014 έως τον ίδιο μήνα του 2015. Πρόκειται για υδατική λεκάνη στην οποία περιέχεται η λίμνη Κερκίνη. Η μελέτη σκοπό είχε την κατανόηση των αιτιών που την προκάλεσαν, τη χωροχρονική δυναμική της και την αποτύπωση της μεταβολής της στάθμης της λίμνης. Η τοπογραφία της περιοχής και η μεγάλη παροχή που δημιουργήθηκε ταυτόχρονα στα ανάντη και κατόντη της λεκάνης, οδήγησαν στην πλημμύρα της έκτασης που παλαιότερα κατείχε η λίμνη Αχινός. Αποδείχθηκε πως η μελέτη της στάθμης της λίμνης ήταν δυνατή τόσο κατά τη διάρκεια όσο και στο αμέσως

προηγούμενο και επόμενο χρονικό διάστημα μέσω των Sentinel 1 που αποδεδειγμένα είναι πολύ αποτελεσματικά στην πλημμυρική χαρτογράφηση, όσο και στη μελέτη υδάτινων δεξαμενών.

Με την ανάδειξη της ανάγκης επιστημονικής υποστήριξης του σημαντικού ρόλου των λιμνών στην τοπική ανάπτυξη και το οικοσύστημα, τα SAR τοποθετούνται ως ιδανικά λόγω των πλεονεκτημάτων τους (Lv et al., 2018). Ο οικολογικός κίνδυνος στον οποίο βρέθηκε η λίμνη Luoma προέκυψε από πολλά γεγονότα παράνομης εξαγωγής άμμου, έγειρε την ανάγκη παρακολούθησής της. Για την αποτύπωση της έκτασης και του νερού της αποδείχθηκε πολύ αποδοτική η εφαρμογή της μεθόδου κατάτμησης βάσει active contour model, αντί για την παραδοσιακή, καθώς έχει περισσότερο έλεγχο του θορύβου και του edge point error, ενώ ακόμη πολύ λιγότερα λάθη από τα αποτελέσματα των οπτικών δεδομένων.

Στη μελέτη τους (Cian et al., 2018) για την αποτύπωση της πλημμύρας η μεθοδολογία δοκιμάστηκε σε τρία γεγονότα (Veneto Italy 2010, Malawi και Uganda 2015). Χρησιμοποιήθηκαν εικόνες sentinel-1, ενώ η εφαρμογή μπορεί να γίνει και σε άλλους τύπους δεδομένων. Υπολογίστηκαν οι δείκτες που συγκρίνουν τα στατιστικά των εικόνων πριν και κατά τη διάρκεια του φαινομένου. Για την επεξεργασία του μεγάλου όγκου δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το google earth engine και το SRTM dem για το φιλτράρισμα των απότομων περιοχών. Τα αποτελέσματα ταυτίζονταν κατά 97,7% με τους χάρτες των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης. Με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι δυνατός ο εντοπισμός περιοχών με βλάστηση που έχουν πλημμυρίσει.

Στην υπερχείλιση της υδατοδεξαμενής Idukki (Satheendran, 2018) στην πολιτεία Kerala μελετήθηκαν δεκαπέντε εικόνες Sentinel 1 SAR-C καθ' όλο το έτος 2016, προϊόντα IW GRD διπλής πόλωσης (HH+HV ή VV+VH), παράλληλα με επιτόπιες μετρήσεις από 26 Μαΐου – 6 Ιουνίου. Για την επεξεργασία χρησιμοποιήθηκε το SNAP και το Qgis και εφαρμόστηκε η τεχνική κατωφλίου. Βασικός σκοπός ήταν η αποτύπωση της ικανότητας των SAR στη διάκριση υδάτων, η οποία και επιβεβαιώθηκε. Η υπεροχή της μεθόδου έγκειται στην άμεση απόδοση της κατά το διαχωρισμό ξηράς – νερού, η οποία μπορεί να συμβάλει δραστικά στις επιχειρήσεις διάσωσης. Η οριοθέτηση της μόνιμης έκτασης στηρίχθηκε στη μικρότερη της δεκαετίας από το Google Earth (2 Μαρτίου 2013).

Η λίμνη Poyang, μία εκ των μεγαλύτερων της Κίνας (Zeng et al., 2017), παρατηρήθηκε ως προς την έκταση της για το διάστημα 2014 έως 2016 με την αξιοποίηση των δυνατοτήτων των εικόνων Sentinel 1. Με την υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση, η συγκεκριμένη κατορθώνει να εισέλθει στον εντοπισμό αλλαγών που συμβαίνουν εντός μήνα. υιοθετώντας πορεία αντίθετη με εύρος υφιστάμενων μελετών που επεξεργάζονται εικόνες Landsat και Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), οι οποίες εστιάζουν μονόπλευρα στην θερινή περίοδο λόγω της ύπαρξης νεφών. Τα MODIS, ενώ έχουν αυξημένη ευαισθησία στην ανακλώμενη ακτινοβολία των υδάτων και πολύ συχνή επαναληψιμότητα, λόγω της μικρής ανάλυσης δεν κατορθώνεται η ικανοποιητική αποτύπωση της λίμνης.

Η αποτίμηση των ζημιών στο Piedmont της Ιταλίας το 2016 (Giordan et al., 2018) προσεγγίστηκε με μία μεθοδολογία συμπερίληψης πολλών δορυφορικών οπτικών πολυφασματικών και SAR δεδομένων χαμηλού κόστους, σε όλο το εύρος της χωρικής ανάλυσης. Χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός δεδομένων Sentinel 1, CSKM, MODIS και Sentinel 2. Η αδυναμία των συστημάτων που σαρώνουν προς το ναδίρ στην αποτελεσματική καταγραφή των αστικών περιοχών, ξεπεράστηκε με την αξιοποίηση τρισδιάστατων και δισδιάστατων μοντέλων εδάφους. Με τον τρόπο αυτό αποτιμήθηκε τόσο η πλημμυρισμένη έκταση, όσο και οι υποδομές που επλήγησαν. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως μόνο 4% της έκτασης εντοπιζόταν στις εικόνες post -event. Δηλαδή εξαιρετικά σημαντικό ρόλο κατέχει η ώρα λήψης σε σχέση με την κορύφωση του φαινομένου.

5 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται αρχικώς τα χαρακτηριστικά των δεδομένων (Πίνακας 2 και Πίνακας 3) που αποκτήθηκαν και στη συνέχεια ο τρόπος που απορρέει ως ο καταλληλότερος για τη δεδομένη περίπτωση από το προηγούμενο κεφάλαιο της ανασκόπησης βιβλιογραφίας, με τον οποίο οδηγούμαστε στην εξαγωγή αποτελεσμάτων.

5.1 Γεωχωρικά δεδομένα

Το Ψηφιακό μοντέλο Αναγλύφου (DEM) ήταν ήδη διαθέσιμο από Ελληνικό Κτηματολόγιο Ελληνικό Κτηματολόγιο. Είναι προϊόν υψηλής χωρικής ανάλυσης 5 m, αποτελούμενο από πολλαπλά ψηφιακά επίπεδα κλίμακας 1:5.000 που έχουν προκύψει από ορθοφωτογραφίες.

Πίνακας 2: Γεωχωρικά δεδομένα

ΔΕΔΟΜΕΝΑ	Τύπος	ΠΗΓΗ
Ψηφιακό μοντέλο Αναγλύφου 5,5 m	raster	Ελληνικό κτηματολόγιο https://www.ktimatologio.gr/
Όρια οικισμών Οδικό δίκτυο	vector	Open Street Map (OSM) https://www.openstreetmap.org/
Διοικητικό όριο Καλλικρατικού Δήμου	vector	Εθνικός Κατάλογος Ανοιχτών Δεδομένων https://geodata.gov.gr/
Χρήσεις Γης	vector	Corine Land Cover 2018 https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover
Λεκάνες Απορροής Ελλάδας	vector	Εθνικός Κατάλογος Ανοιχτών Δεδομένων http://geodata.gov.gr/

Μέσω του server Geofabric είναι δυνατή η προσπέλαση δωρεάν ή και επί πληρωμή δεδομένων **Open Street Map** Shapefiles, που μπορούν να εισαχθούν σε περιβάλλον ΣΓΠ. Η δημιουργία τους γίνεται βάσει της καθημερινής ενημέρωσης του. Πρόκειται για δεδομένα στο Παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς 1984 (WGS84). Περιέχουν σημεία, γραμμές και πολύγωνα με σαφή κατηγοριοποίηση.

Ο **Εθνικός Κατάλογος Ανοιχτών Δεδομένων** (Geodata) μέσω της αντίστοιχης πλατφόρμας διαθέτει δημοσιευμένα δεδομένα των εθνικών υπηρεσιών κεντρικής διοίκησης και τοπικής αυτοδιοίκησης, που διατίθενται ελεύθερα. Καλύπτουν δέκα θεματικές ενότητες με 47 σειρές δεδομένων, σε ποικίλη μορφή. Για τις ανάγκες της παρούσας χρησιμοποιήθηκαν shapefiles σημειακών, γραμμικών και πολυγωνικών οντοτήτων αναφερμένων στο Ελληνικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς 1997 (GGRS87).

Οι χρονοσειρές της χαρτογράφησης του προγράμματος **CORINE land cover** (CLC) αποτελούν το αποτέλεσμα της φωτοερμηνείας δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης με την αξιοποίηση ημι-αυτόματων μεθόδων ταξινόμησης σε 44 κατηγορίες βασισμένων σε στοιχεία πεδίου. Η ανανέωση έχει συμβεί κατά τα έτη 2000, 2006, 2012 και 2018 (Copernicus, 2018). Επιλέχθηκε το πιο πρόσφατο. Η μορφή των αρχείων επίσης είναι shapefile πολυγώνων.

5.2 Δορυφορικά δεδομένα

Τα δορυφορικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε πλημμυρικό γεγονός βρίσκονται καταχωρημένα στον ακόλουθο πίνακα. Πρόκειται για ανοιχτά δεδομένα που προσπελάστηκαν μέσω της πλατφόρμας Copernicus Open Access Data Hub. Όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφική επισκόπηση, η χρήση Radar SAR εικόνων αποτελεί την επικρατέστερη πηγή παραγωγής αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Η προσέγγιση που υιοθετήθηκε ήταν η επιλογή διαθέσιμων εικόνων Sentinel 1 IW GRD λίγο πριν κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά τα πλημμυρικά φαινόμενα.

Τα προϊόντα Level- 1 GRD IW προέρχονται από την επεξεργασία των προηγούμενων πλήρως ανεπεξέργαστων Level- 0, τα οποία είναι. Διαθέτουν σχεδόν τετράγωνη χωρική ανάλυση και μειωμένη κόκκωση λόγω της επεξεργασίας multilook που έχουν δεχθεί. Ωστόσο, η κόκκωση δεν αφαιρείται πλήρως, προς την διατήρηση όσο το δυνατόν καλύτερης ανάλυσης. Δεν διατηρούν την πληροφορία της διαφοράς φάσης. Διατίθενται γενικά σε εξαιρετικά υψηλή, πολύ υψηλή ή μέση ανάλυση, ανάλογα το επίπεδο και το τρόπο σάρωσης, όπου στο IW προσφέρονται τα δύο τελευταία. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα IW υψηλής ανάλυσης. Η αποτελεσματική κάλυψη της περιοχής μελέτης επιτρέπει την ολοκληρωμένη μελέτη της.

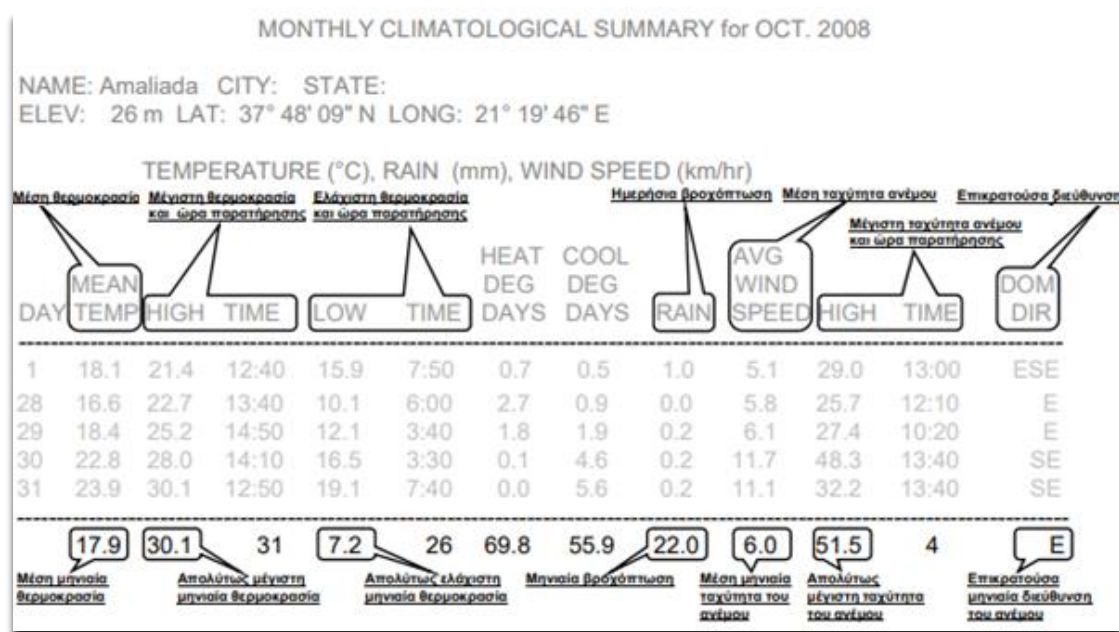
Πίνακας 3: Δορυφορικές εικόνες που ανακτήθηκαν (Πηγή: <https://scihub.copernicus.eu/>)

α/α	Δορυφόρος	Ημερομηνία	Mode/Level	Τροχιά	ώρα	mm βροχής
1	Sentinel 1B	3/1/2020	GRD IW	Ascending	16:14z	2.8
2	Sentinel 1B	4/1/2020	GRD IW	Descending	04:15z	1.0
3	Sentinel 1B	8/1/2020	GRD IW	Ascending	16:21z	16.4
4	Sentinel 1	9/1/2020	GRD IW	Descending	04:23z	19.2
5	Sentinel 1A	10/1/2020	GRD IW	Descending	04:16z	1.8
6	Sentinel 1A	3/4/2020	GRD IW	Descending	04:16z	2.8
7	Sentinel 1A	7/4/2020	GRD IW	Ascending	16:22z	101.6
8	Sentinel 1A	8/4/2020	GRD IW	Descending	04:24z	13.0
9	Sentinel 1B	9/4/2020	GRD IW	Descending	04:15z	0.0
10	Sentinel 1B	4/11/2020	GRD IW	Descending	04:23z	4.2
11	Sentinel 1A	5/11/2020	GRD IW	Descending	04:16z	3.0
12	Sentinel 1A	9/11/2020	GRD IW	Ascending	16:22z	30.0
13	Sentinel 1A	10/11/2020	GRD IW	Descending	04:24z	61.2
14	Sentinel 1B	11/11/2020	GRD IW	Descending	04:15z	24.4

5.3 Μετεωρολογικά δεδομένα

Το οροπέδιο Λασιθίου διαθέτει μετεωρολογικό σταθμό τοποθετημένο στο Δημαρχείο του Δήμου. Ο σταθμός “Τζερμιάδων Λασιθίου” ανήκει στο Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Βρίσκεται στο χώμα, σε υψόμετρο ίδιο με αυτό του οροπεδίου, στην τοποθεσία 35.18010°

N 25.46800° E, δηλαδή στα 820 μέτρα. Οι αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας που διαθέτει είναι σε ύψος 2 μέτρων, ενώ το ανεμόμετρο στα 4 μέτρα. Το μοντέλο του φέρει το χαρακτηρισμό PRO2. Ακολουθεί, αρχικά επεξηγηματική αναπαράσταση (Εικόνα 35) των δεδομένων που προσφέρει ο σταθμός. Τις ημέρες που συνέβησαν τα πλημμυρικά φαινόμενα των μηνών Ιανουαρίου και Απριλίου καταγράφεται καθυστέρησή στην καταγραφή και απώλεια δεδομένων (Πίνακας 4) ορισμένης ποσότητας mm βροχής. Στη συνέχεια, παρατίθενται οι πίνακες (Πίνακας 5, Πίνακας 6 και Πίνακας 7), όπου με κίτρινο χρώμα διακρίνονται οι τιμές βροχόπτωσης κατά τις ημερομηνίες λήψης των δορυφορικών εικόνων και η ακριβής του τοποθεσία.



Εικόνα 35: Αναλυτική παρουσίαση των δεδομένων του μετεωρολογικού σταθμού (Πηγή:

<http://penteli.meteo.gr/stations/tzermiado/>)

Ημερομηνία	Σχόλια βλαβών και δυσλειτουργιών
22/10/2020	Απώλεια δεδομένων βροχόπτωσης στις 19/10 -21/10/2020. Χάθηκαν ~20-30 mm.
9/4/2020	Μερική και καθυστερημένη καταγραφή δεδομένων βροχόπτωσης στις 08/04/2020. (Χάθηκαν ~16 mm).
8/1/2020	Απώλεια δεδομένων βροχόπτωσης 01-07/01/2020 (χάθηκαν ~ 80 mm).

Πίνακας 4: Απώλεια δεδομένων του μετεωρολογικού σταθμού λόγω βλάβης, κατά τις ημερομηνίες λήψης των δορυφορικών εικόνων Ιανουαρίου και Απριλίου (Πηγή:

<http://penteli.meteo.gr/stations/tzermiado/>)

Πίνακας 5: Μετεωρολογικά στοιχεία του σταθμού Τζερμιάδων Λασιθίου για τον μήνα Ιανουάριο του 2020 (Πηγή: <http://penteli.meteo.gr/stations/tzermiado/>)

MONTHLY CLIMATOLOGICAL SUMMARY for JAN. 2020												
NAME: Tzermiadon			ELEV: 820 m		LAT: 35deg 12min			LONG: 25deg 30min				
TEMPERATURE (°C), RAIN (mm), WIND SPEED (km/hr)												
DAY	MEAN TEMP	HIGH	TIME	LOW	TIME	MAX RH	MIN RH	RAIN	AVG WIND SPEED	HIGH	TIME	DOM DIR
01	4.9	6.0	10:50	3.2	22:50	84	82	13.0	3.7	30.6	23:20	N
02	2.2	4.5	00:10	0.3	17:10	85	82	11.8	9.1	40.2	05:30	N
03	3.7	4.7	10:10	0.4	01:20	84	83	2.8	11.5	46.7	13:30	N
04	4.8	8.1	15:10	0.0	23:50	84	78	1.0	3.2	24.1	00:00	N
05	3.9	11.3	12:50	-2.7	06:40	85	73	12.0	1.8	19.3	23:00	N
06	3.2	5.2	00:00	0.6	11:40	84	83	8.6	7.2	51.5	13:30	N
07	3.0	4.1	00:30	1.9	17:00	84	83	60.0	21.5	56.3	16:30	N
08	3.0	3.6	00:40	2.1	05:40	85	83	94.8	16.4	46.7	05:10	N
09	2.8	4.0	23:50	1.6	10:50	85	81	19.2	14.3	49.9	07:30	N
10	4.6	9.1	12:30	-0.2	23:30	85	76	0.6	1.8	24.1	00:20	N
11	3.3	10.8	12:50	-2.6	07:20	85	62	0.0	0.3	11.3	13:20	SE
12	5.1	12.3	12:30	0.8	23:40	84	61	0.0	1.2	17.7	16:30	NNW
13	3.9	9.8	13:30	-1.8	06:30	85	80	0.0	0.9	16.1	14:20	NNW
14	5.4	11.4	14:10	0.7	08:20	84	71	0.0	0.7	11.3	15:40	SSW
15	6.4	10.0	11:40	2.1	02:00	83	73	0.0	1.1	16.1	22:10	S
16	7.4	8.4	01:30	6.1	19:50	83	82	52.2	5.5	30.6	02:10	N
17	5.4	6.6	00:00	4.6	12:40	84	83	6.6	8.7	33.8	09:10	N
18	4.9	5.4	12:10	4.1	23:30	84	82	25.6	7.0	29.0	14:20	N
19	4.7	5.9	12:20	3.9	03:00	84	79	5.8	7.4	37.0	23:30	N
20	3.8	4.6	11:10	2.7	07:10	85	79	22.8	15.0	46.7	22:50	N
21	3.1	3.8	00:20	2.2	08:30	85	82	1.2	15.0	43.5	02:20	N
22	4.3	7.3	13:40	-0.2	23:40	85	76	0.0	5.5	27.4	00:20	N
23	3.7	11.7	12:10	-3.3	07:40	86	38	0.0	5.1	33.8	22:10	N
24	3.0	5.7	12:00	-1.8	23:20	86	71	0.0	4.3	27.4	00:00	N
25	2.7	13.8	13:10	-4.6	08:00	86	37	0.0	0.6	11.3	14:10	NW
26	6.0	17.6	14:10	-1.9	03:20	85	27	0.0	0.8	20.9	23:50	S
27	9.2	12.3	12:50	7.1	23:40	83	36	0.0	3.4	29.0	16:50	S
28	6.9	10.7	13:40	2.6	22:30	84	74	0.0	2.8	24.1	12:40	N
29	8.0	13.3	12:40	3.0	05:50	84	62	0.0	2.5	19.3	22:10	S
30	9.5	12.9	13:20	5.8	08:10	84	47	6.0	6.0	30.6	10:10	N
31	7.5	12.7	14:40	2.3	23:20	84	54	0.0	2.1	22.5	03:30	N
	4.8	17.6	26	-4.6	25	84.5	69.7	344.0	6.0	56.3	7	N

Πίνακας 6: Μετεωρολογικά στοιχεία του σταθμού Τζερμιάδων Λασιθίου για τον μήνα Απρίλιο του 2020

(Πηγή: <http://penteli.meteo.gr/stations/tzermiado/>)

MONTHLY CLIMATOLOGICAL SUMMARY for APR. 2020												
NAME: Tzermiadon			ELEV: 820 m			LAT: 35deg 12min			LONG: 25deg 30min			
TEMPERATURE (°C), RAIN (mm), WIND SPEED (km/hr)												
DAY	MEAN		TIME	LOW	TIME	MAX RH	MIN RH	RAIN	AVG WIND		TIME	DOM DIR
	TEMP	HIGH							SPEED	HIGH		
01	8.8	14.5	15:00	2.1	07:20	84	58	0.0	2.6	20.9	12:20	NNW
02	9.2	13.6	13:30	6.0	23:30	82	72	0.0	3.9	27.4	14:20	N
03	12.3	16.9	21:40	6.3	00:00	82	40	2.8	1.7	22.5	23:50	N
04	15.1	18.1	11:10	12.5	23:00	80	39	0.0	9.2	53.1	18:10	SE
05	10.8	13.8	00:00	8.3	23:00	82	60	0.2	4.5	19.3	08:00	N
06	7.8	9.1	11:20	6.9	21:00	82	81	26.0	4.3	25.7	06:20	N
07	7.1	7.7	13:50	6.5	19:00	82	81	101.6	6.6	29.0	11:00	N
08	6.7	7.3	12:20	6.0	20:40	83	82	13.0	5.7	27.4	04:50	N
09	6.7	8.9	14:20	5.9	03:30	83	79	0.0	2.9	22.5	13:00	N
10	8.5	12.2	14:40	5.6	23:50	83	62	0.2	3.5	20.9	10:00	N
11	8.7	16.4	17:00	1.2	07:30	83	32	0.2	1.6	19.3	16:20	N
12	9.2	17.2	14:10	0.6	07:10	83	35	0.2	2.2	22.5	14:30	NNW
13	9.7	17.3	14:50	1.6	07:00	83	36	0.2	2.3	19.3	15:30	S
14	11.1	19.8	13:30	1.4	07:20	83	30	0.0	2.4	20.9	19:40	S
15	16.2	22.8	14:30	9.9	23:30	80	17	2.4	7.1	33.8	09:20	N
16	7.1	9.9	00:00	5.8	08:40	82	79	21.0	9.9	43.5	09:10	N
17	9.7	17.3	12:40	1.2	07:30	83	42	0.2	2.0	17.7	14:10	N
18	9.7	18.7	14:40	0.8	07:30	83	31	0.2	1.7	16.1	15:20	SW
19	10.9	19.8	16:20	1.5	07:30	83	31	0.0	1.8	14.5	12:30	NNW
20	12.6	22.2	14:10	2.1	07:00	83	29	0.0	1.1	11.3	13:20	W
21	15.2	22.7	14:50	6.6	07:10	81	33	0.0	1.4	16.1	12:20	S
22	9.7	12.4	01:00	7.3	23:20	82	77	3.2	2.7	22.5	22:00	N
23	7.9	9.9	12:50	6.6	22:10	82	80	5.8	2.4	32.2	23:40	N
24	7.6	11.2	14:20	3.9	23:50	82	71	2.2	3.3	24.1	13:50	N
25	7.8	14.4	14:50	1.0	06:10	83	41	0.0	2.8	20.9	13:40	N
26	9.3	19.1	14:50	-0.1	04:00	83	34	0.2	1.8	19.3	12:30	S
27	10.4	18.3	15:40	1.3	07:00	83	29	0.0	2.4	20.9	17:00	S
28	10.4	18.2	15:30	2.5	07:00	83	37	0.0	1.7	16.1	14:10	E
29	11.7	20.7	13:00	1.4	06:40	83	34	0.0	1.8	17.7	13:50	SSW
30	14.7	19.6	14:30	9.6	23:30	81	55	1.6	3.7	29.0	14:00	N
	10.1	22.8	15	-0.1	26	82.4	50.2	181.2	3.4	53.1	4	N

Πίνακας 7: Μετεωρολογικά στοιχεία του σταθμού Τζερμιάδων Λασιθίου για τον μήνα Νοέμβριο του 2020 (Πηγή: <http://penteli.meteo.gr/stations/tzermiado/>)

MONTHLY CLIMATOLOGICAL SUMMARY for NOV. 2020												
NAME: Tzermiadon			ELEV: 820 m			LAT: 35deg 12min			LONG: 25deg 30min			
TEMPERATURE (°C), RAIN (mm), WIND SPEED (km/hr)												
DAY	MEAN TEMP	HIGH	TIME	LOW	TIME	MAX RH	MIN RH	RAIN	AVG WIND SPEED	HIGH	TIME	DOM DIR
01	12.6	14.8	14:20	9.8	00:00	71	58	0.0	2.4	17.7	12:40	N
02	11.6	15.0	13:10	7.9	23:40	73	60	0.0	2.4	22.5	12:00	N
03	11.7	16.0	10:50	6.8	02:30	71	55	1.4	0.9	14.5	13:00	N
04	13.1	14.9	13:00	11.8	00:40	68	55	4.2	6.2	29.0	23:10	N
05	11.9	12.3	00:00	10.9	07:00	71	60	3.0	11.7	37.0	10:10	N
06	12.2	12.9	19:50	11.5	23:50	63	57	178.6	10.1	40.2	01:20	N
07	11.6	12.3	15:00	10.8	03:00	60	52	139.4	4.2	25.7	18:10	N
08	11.4	12.9	11:30	9.7	22:40	65	55	0.8	3.8	19.3	04:40	N
09	11.3	13.4	21:50	9.4	03:10	64	54	30.0	1.3	25.7	19:20	N
10	12.3	13.4	09:40	10.0	23:40	62	54	61.2	1.0	17.7	00:00	N
11	11.8	13.7	14:00	9.7	01:10	63	53	24.4	3.5	20.9	10:40	N
12	11.3	13.8	11:50	7.8	21:10	71	57	0.0	2.1	14.5	03:40	N
13	10.8	16.1	13:50	6.8	22:30	73	55	0.2	1.3	17.7	14:20	N
14	9.4	14.1	12:50	6.1	05:10	74	56	5.8	2.6	27.4	22:50	N
15	10.1	12.4	13:50	9.1	04:40	74	60	0.4	5.1	25.7	00:00	N
16	9.8	12.1	13:40	6.0	23:50	70	57	0.0	2.0	19.3	12:00	N
17	7.4	15.2	12:10	2.3	07:20	72	49	0.4	0.9	16.1	13:10	W
18	8.6	13.6	12:00	3.0	06:10	72	42	0.8	2.4	25.7	19:20	N
19	8.7	9.8	00:00	7.2	23:40	56	45	40.2	9.2	35.4	21:10	N
20	7.7	8.9	22:30	5.6	05:10	48	44	122.2	9.3	33.8	06:50	N
21	9.1	11.0	11:20	8.0	23:40	64	39	5.4	3.2	29.0	01:20	N
22	8.6	10.4	09:40	6.2	08:00	52	37	1.6	1.0	14.5	14:20	N
23	9.3	10.8	12:10	8.7	21:10	62	40	0.0	1.6	11.3	07:40	N
24	9.4	12.1	12:30	6.9	07:10	69	36	18.6	1.7	20.9	22:00	N
25	8.3	9.3	00:20	7.4	09:20	57	41	15.4	8.2	33.8	07:00	N
26	8.6	9.6	12:50	7.8	22:00	69	48	0.0	4.4	24.1	05:40	N
27	8.5	12.4	12:10	5.4	04:50	70	33	0.0	1.7	17.7	12:40	N
28	8.4	15.1	13:50	3.9	04:40	71	27	0.2	0.5	9.7	15:00	SSW
29	8.7	16.0	11:40	3.1	02:10	70	30	6.6	1.1	17.7	14:40	SE
30	9.2	14.7	14:50	6.0	22:10	70	34	2.0	0.6	11.3	00:10	SSE
	10.1	16.1	13	2.3	17	66.5	48.1	662.8	3.5	40.2	6	N

5.4 Λογισμικά

SNAP

Ελεύθερο λογισμικό ανοιχτού κώδικα που παρέχεται από τον ΕΟΔ. Οι εργαλαιοθήκες είναι κατάλληλες για επεξεργασία δεδομένων Sentinel, όμως δεν περιορίζονται μόνο εκεί, καθώς υποστηρίζουν ακόμη περισσότερους αισθητήρες (ESA). Διαθέτει τρεις εργαλαιοθήκες, για τα Sentinel (1,2,3), τα SMOS και συνδυαστική των προηγούμενων με PROBA-V. Οι βασικές συνθήκες που χρειάζεται να ικανοποιούνται από το σύστημα για την εύρυθμη λειτουργία του κατά την λήψη, εγκατάσταση και χρήση του SNAP είναι οι ακόλουθες:

1. 4GB RAM
2. 500MB διαθέσιμο αποθηκευτικό χώρο συστήματος
3. Λογισμικό Windows ή MacOS ή Linux σε 32 ή 64bit μορφή.

QGIS

Το Quantum Geographical Information System είναι επίσης ένα ελεύθερο λογισμικό ανοιχτού κώδικα <http://www.qgis.org>, το οποίο διαθέτει όλες τις απαραίτητες λειτουργίες ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών, με τις επιπρόσθετες λειτουργίες (plugins) ολοένα να αυξάνονται. Μπορεί να υποστηριχθεί από τα περισσότερα λειτουργικά (Linux, Unix, Mac OSX, Windows), ακόμη και Android, με ελάχιστη απαίτηση:

1. 2Gb RAM
2. 500 Gb αποθηκευτικό χώρο
3. 2Gb 8Gb ή παραπάνω
4. 1Gb RAM κάρτας γραφικών

5.5 Μεθοδολογία

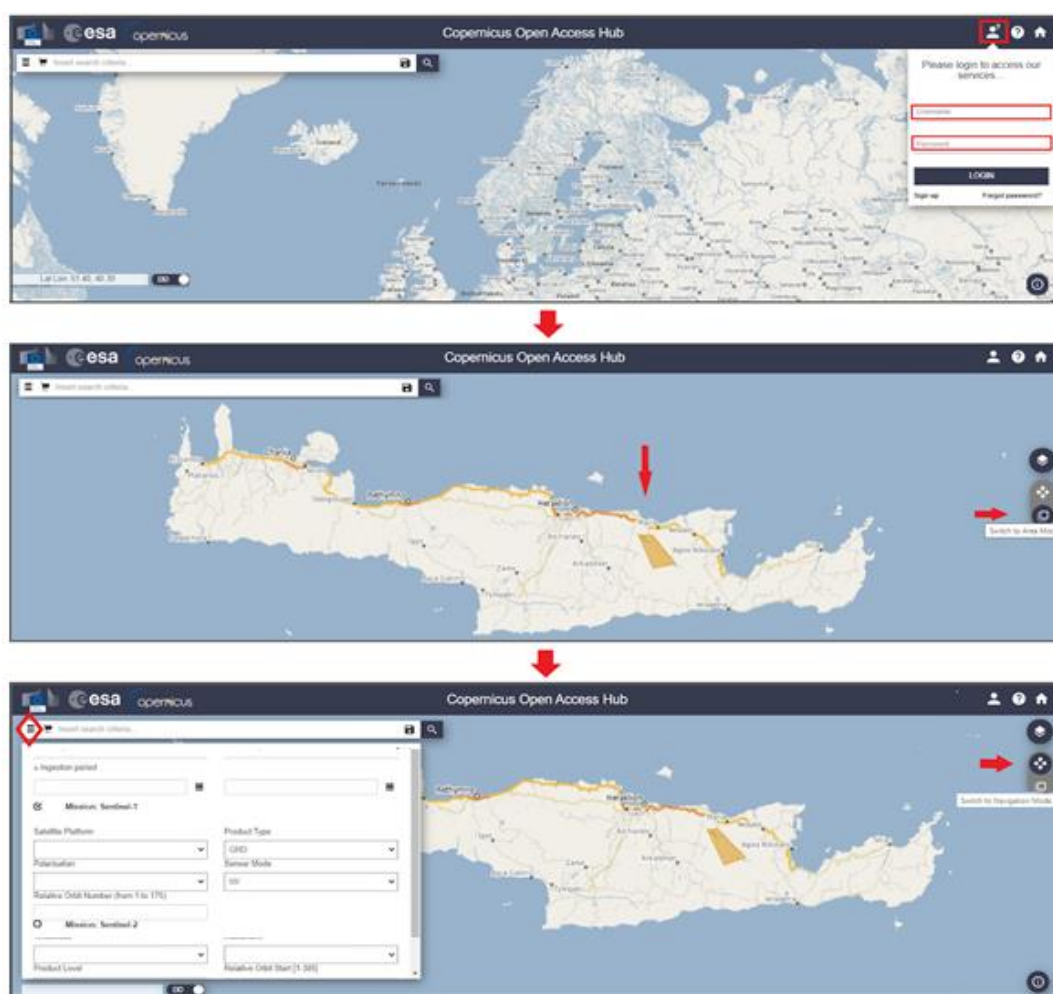
Η μέθοδος που επιλέχθηκε είναι και η πιο συνήθης πρακτική (Εικόνα 36) όσον αφορά τη χαρτογράφηση πλημμυρών με τη χρήση SAR εικόνων και πρόκειται για τον καθορισμό κατωφλίου (Stelmaszczyk, 2020). Τα pixel των υδάτων είναι κατά κανόνα πιο σκούρα απ' ότι της ξηράς (Li et al., 2021; Peng et al., 2019). Τα στάσιμα νερά, όπως για παράδειγμα εκείνα του υδάτινου ταμιευτήρα λειτουργούν ως επιφάνειες κατοπτρικής ανάκλασης. Ωστόσο, στην παραγωγή παρόμοιων pixels μπορούν να οδηγήσουν και φαινόμενα σκίασης, όπως πολύ συχνά συμβαίνει σε περιοχές με έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο, όπως και στην παρούσα. Αυτό συμβαίνει εφόσον ένα υψηλότερο σημείο εμποδίζει το σήμα να φτάσει σε ένα χαμηλότερο, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει echo, άρα και να αποδοθεί μαύρο στην περιοχή αυτή. Επομένως, ο εντοπισμός της έκτασης της πλημμύρας στις καλλιεργητικές περιοχές του οροπεδίου και στην υδάτινη δεξαμενή του Αποσελέμη μπορεί εύκολα να αποτυπωθεί μετατρέποντας τις δορυφορικές εικόνες σε δυαδικές. Ορίζοντας μία τιμή που αντιπροσωπεύει την μεγαλύτερη τιμή που μπορεί να λάβει ένα πλημμυρισμένο pixel. Τιμές μεγαλύτερες αυτού αποτελούν την ξηρά.



Εικόνα 36: Ροή της πτυχιακής εργασίας

5.5.1 Ανάκτηση δορυφορικών εικόνων

Μέσα από την πλατφόρμα ανοικτής πρόσβασης δορυφορικών δεδομένων του Copernicus <https://scihub.copernicus.eu/>, παρέχεται η απρόσκοπτη δυνατότητα αναζήτησης και προσπέλασης αυτών, με την προϋπόθεση μιας απλής εγγραφής χρήστη. Κατά την είσοδο στην ιστοσελίδα και ανά τακτά χρονικά διαστήματα ζητείται αυθεντικοποίηση. Η διαδικασία εύρεσης συναφών δεδομένων έχει σημείο εκκίνησης την επιλογή “Ορισμός περιοχής” (Εικόνα 37), μέσω της οποίας οριοθετούμε την περιοχή ενδιαφέροντος. Συνίσταται ο ορισμός της έκτασης όσο το δυνατόν πιο συγκεκριμένα. Η συμπερίληψη περιμετρικής έκτασης καλό είναι να αποφεύγεται, ώστε τα αποτελέσματα της αναζήτησης να είναι πλησιέστερα στα επιθυμητά.



Εικόνα 37: Ροή ανάκτησης δορυφορικών εικόνων από το Copernicus Open Access Hub

(Πηγή: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)

Εφόσον ορίστηκε η περιοχή και έγινε μετάβαση σε “Επιλογή πλοήγησης”, στο ακόλουθο παράθυρο προσδιορίστηκε το χρονικό πλαίσιο προσέγγισης του πλημμυρικού γεγονότος με

εύρος τριών εβδομάδων. Δορυφορικές εικόνες Sentinel 1 a ή 1b, προϊόντα GRD, τύπου IW (Εικόνα 38).

Insert search criteria...

Advanced Search

Sort By: Sensing Date

Order By: Descending

Sensing period: 2020/01/01 to 2022/01/21

Ingestion period:

☒ Mission: Sentinel-1

Satellite Platform:

Product Type: GRD

Polarisation:

Sensor Mode: IW

Relative Orbit Number (from 1 to 175):

☐ Mission: Sentinel-2

Satellite Platform:

Product Type:

Relative Orbit Number (from 1 to 143):

Cloud Cover % (e.g.[0 TO 9.4]):

☐ Mission: Sentinel-3

Satellite Platform:

Product Type:

Timeliness:

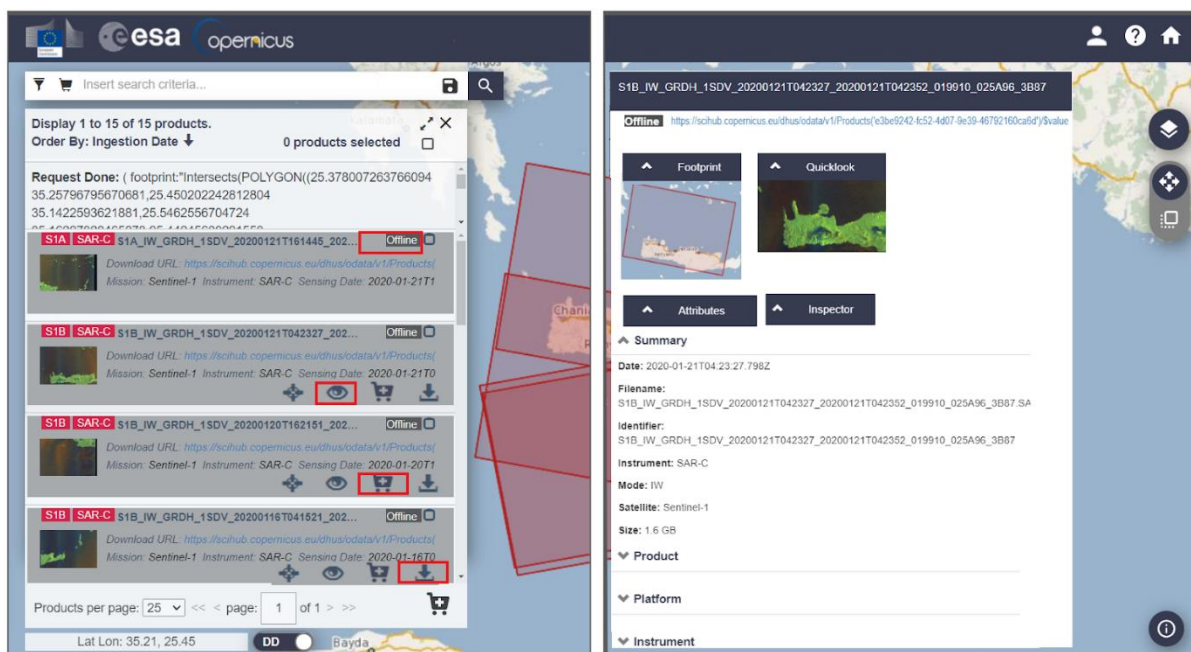
Instrument:

Product Level:

Relative Orbit Start [1-385]:

Εικόνα 38: Ορισμός κριτηρίων αναζήτησης (Πηγή: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)

Η επιλογή μεταξύ των αποτελεσμάτων αναζήτησης έγινε με κριτήριο την πλήρη κάλυψη της ερευνώμενης περιοχής, τη χρονική εγγύτητα και συνέχεια. Το εργαλείο “Quick look” (Εικόνα 39) παρέχει συνοπτική και ολική πληροφόρηση για την ημερομηνία λήψης, την έκταση και τα χαρακτηριστικά λήψης. Επελέγησαν οι λήψεις πριν - κατά τη διάρκεια - μετά το γεγονός. Η διαδικασία επαναλήφθηκε ξεχωριστά για τα τρία πλημμυρικά γεγονότα.

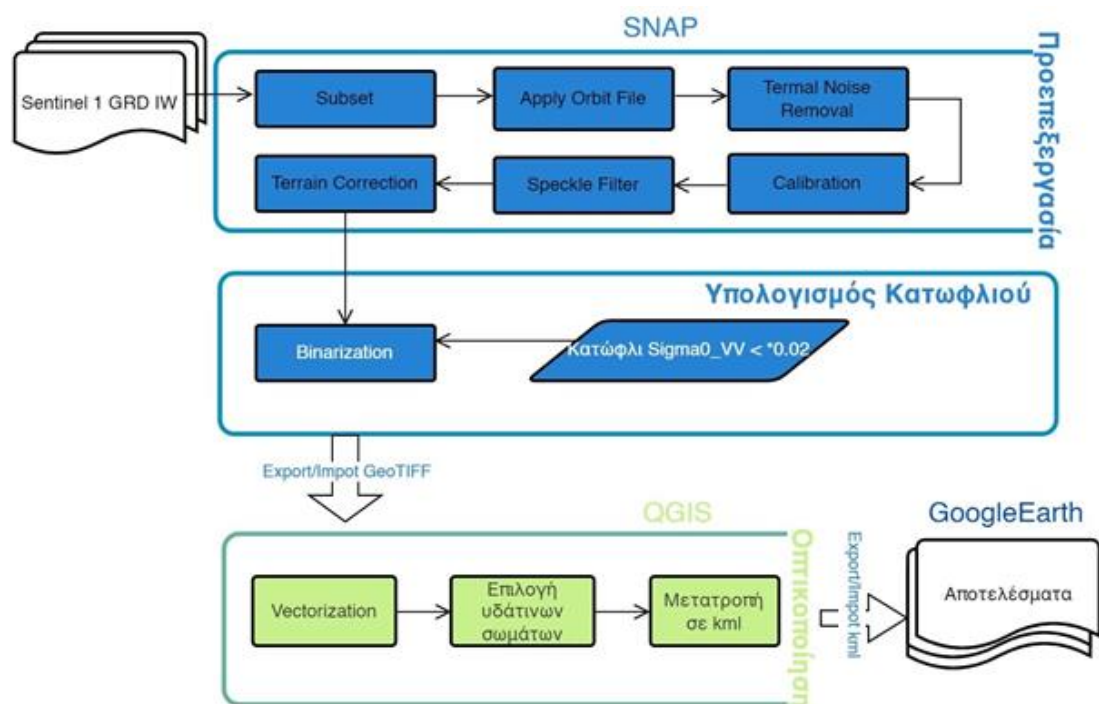


Εικόνα 39: Δυνατότητες - χαρακτηριστικά (Πηγή: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)

Όπως διακρίνεται παραπάνω (Εικόνα 39) τα δεδομένα είναι σε κατάσταση “offline”. Η πολιτική που ακολουθείται είναι η παροχή σύγχρονης πρόσβασης στα δεδομένα του τελευταίου μήνα και ασύγχρονης σε διάστημα μεγαλύτερο. Απαιτείται πρώτον η αποθήκευση τους στην κάρτα του λογαριασμού μας και εκκίνηση της επαναφοράς τους. Παρέχεται η δυνατότητα ταυτόχρονης επαναφοράς έως και δύο προϊόντων στη διάρκεια μιας ώρας. Εντός ολίγων ωρών η ένδειξη “online” ενεργοποιείται. Η ανάκτηση μπορεί να γίνει μέσα στα επόμενα τρία 24ωρα. Γι’ αυτό το διάστημα θα βρίσκονται στην κάρτα μας. Μετά το πέρας αυτού θα είναι και πάλι “offline”. Επιτρέπεται η ταυτόχρονη λήψη δύο εικόνων. Οι εικόνες βρίσκονται σε συμπιεσμένη μορφή “zip”, ενώ δεν χρειάζεται να υποβληθούν σε αποσυμπίεση.

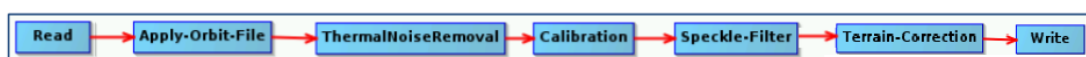
5.5.2 Προεπεξεργασία εικόνων SAR

Εφόσον ανακτήθηκαν τα δεδομένα, προτού μεταβούμε στην επεξεργασία τους, είναι απαραίτητο να προηγηθούν ορισμένες διαδικασίες (Εικόνα 40), ώστε να βρίσκονται σε κατάλληλη μορφή η οποία θα επιτρέπει τον υπολογισμό της πλημμυρισμένης έκτασης με όσο το δυνατόν λιγότερες αποκλίσεις από την πραγματικότητα. Το λογισμικό SNAP διαθέτει εργαλεία γι’ αυτά τα δύο στάδια.



Εικόνα 40: Η ροή (προ-)επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων SAR

Από την εκκίνηση του λογισμικού και καθ' όλη τη διάρκεια είναι χρήσιμο να βρίσκονται ενεργοποιημένα τα υποπαράθυρα “Product explorer”, “Color manipulation” και “Pixel Info”, που επιτρέπουν τη διαχείριση των εικόνων και τη διερεύνηση των τιμών των pixel και της κατανομής τους. Η προεπεξεργασία στο σύνολο της περιγράφεται (Εικόνα 41) ως ένα άθροισμα εντολών βελτίωσης και μορφοποίησης, με τελικό σκοπό την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων, που μπορεί να μεταφερθούν από αυτό το στάδιο σε εκείνο της επεξεργασίας.



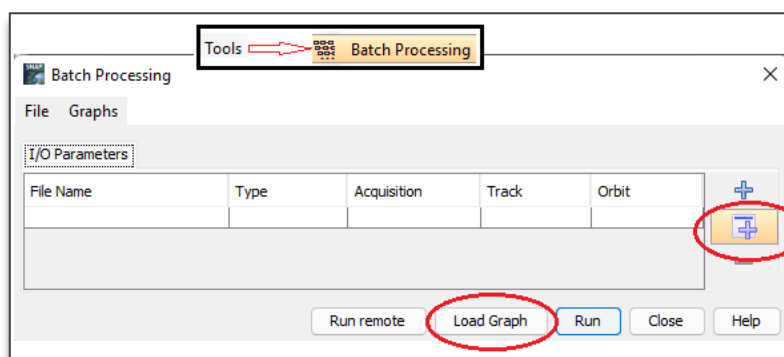
Εικόνα 41: Η ροή των εντολών που εφαρμόζονται μέσω του GraphBuilder

Οι εικόνες εισάγονται με την εντολή “open product”. Απαραίτητο αρχικό βήμα είναι η ενημέρωση των μεταδεδομένων τροχιάς των εικόνων με την εντολή Apply Orbit File. Τα συγκεκριμένα αρχεία είναι διαθέσιμα μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα από την δημιουργία της εικόνας, συνήθως αυτό είναι μερικές ημέρες. Περιέχουν ακριβείς πληροφορίες για την ταχύτητα και την τοποθεσία του δορυφόρου κατά τη λήψη. Έτσι, προλαμβάνονται πιθανά λάθη στις μετέπειτα επεξεργασίες. Διατηρούμε τις επιλογές “by default” και επιλέγουμε το πεδίο “Do

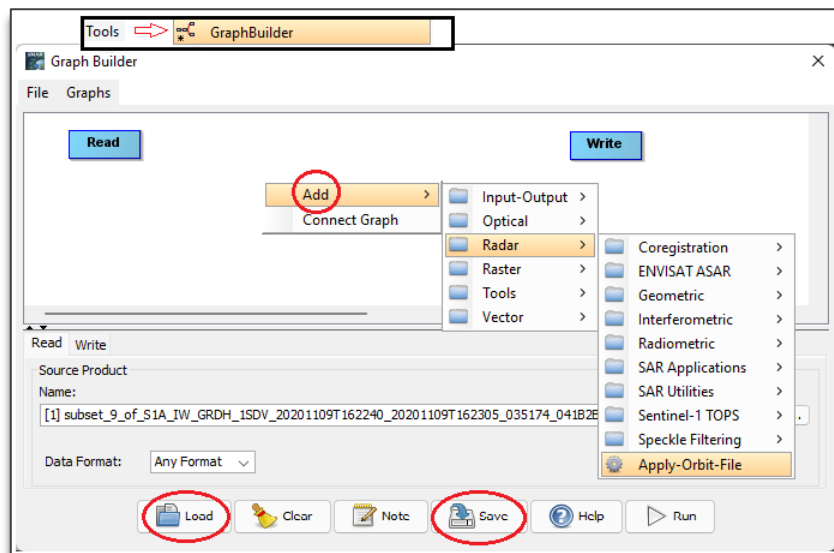
not fail if new orbit file is not found...”, που επί της ουσίας αποτρέπει τη μετάβαση του αλγορίθμου σε σφάλμα, στην περίπτωση που τα αρχεία δεν είναι διαθέσιμα.

Τα προϊόντα GRD είναι πολύ μεγαλύτερα σε έκταση απ’ ότι στην πραγματικότητα μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε. Καλύπτουν έκταση μήκους 250 km. Έτσι, η εκκίνηση της προεπεξεργασίας γίνεται με την εντολή Subset, που γίνεται αποκοπή στην περιοχή ενδιαφέροντος, μειώνοντας το χρόνο επεξεργασίας, αλλά και αυξάνοντας τον ελεύθερο αποθηκευτικό χώρο. Επεκτείνοντας τα “bands” επιλέγεται η προβολή του band “Intensity_VH”, το οποίο θα αποτελέσει τον οδηγό περικοπής. Όπως προκύπτει από την ανασκόπηση βιβλιογραφίας η καταλληλότερη πόλωση είναι η VV (Ezzine et al., 2018). Με τη χρήση του ποντικιού οριοθετείται η περιοχή ενδιαφέροντος. Επειδή οι λήψεις δεν έχουν την ίδια γεωμετρία, η κάθε εικόνα περικοπήκε ξεχωριστά. Οι ρυθμίσεις παρέμειναν ως είχαν “by default”.

Επειδή η εφαρμογή της διαδικασίας επί πολλαπλών εικόνων είναι χρονοβόρα και απαιτεί τη δέσμευση χώρου στο δίσκο μας, δομούμε μέσω του “Graph Builder” (Εικόνα 43) τα βήματα επεξεργασίας. Εκεί ορίζονται και οι παράμετροι κάθε εντολής και το γράφημα αποθηκεύεται. Για να εφαρμοστούν σε όλες τις εικόνες αξιοποιούμε το εργαλείο “Batch Processing” (Εικόνα 42), που μας επιτρέπει να εισάγουμε όλες μας τις λήψεις και το γράφημα που έχουμε δημιουργήσει και αποθηκεύσει, ώστε να το εφαρμόσουμε. Πιο συγκεκριμένα, ως δεδομένα εισόδου βάζουμε τις εικόνες που έχουν αποκοπεί προηγουμένως. Στο τέλος της διαδικασίας θα αποθηκευτούν μόνο τα αρχεία των τελικών αποτελεσμάτων.



Εικόνα 42: Εργαλείο μαζικής επεξεργασίας “Batch Processing”



Εικόνα 43: Εργαλείο δημιουργίας γραφήματος αλυσιδωτών εντολών επεξεργασίας “Graph Builder”

Λόγω του οργάνου σάρωσης και γενικότερα των χαρακτηριστικών του συστήματος προκαλείται θερμικός θόρυβος, ο οποίος επιδρά στον υπολογισμό της ανακλαστικότητας, επηρεάζοντας περισσότερο τις υψηλές τιμές (Παρχαρίδης, 2015). Η αφαίρεση του γίνεται με την εντολή “Thermal Noise Removal”, την οποία βρίσκουμε από το μενού “Radar”, “Radiometric”. Επιλέγουμε την πόλωση VV και το κουτάκι “Remove Thermal Noise”.

Έπεται η βαθμονόμηση των εικόνων, που σκοπό έχει την άμεση αντιστοίχιση των εικονοστοιχείων με την οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία του RADAR, διορθώνοντας τις στρεβλώσεις που υπάρχουν, λόγω διακοπής σήματος, υγρασίας, θορύβου κ.ά. Δίχως αυτή τη μετατροπή, οι εικόνες δεν μπορούν να μελετηθούν ποσοτικά, παρά μόνο ποιοτικά. Ακόμη, επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ λήψεων διαφορετικού αισθητήρα, λειτουργίας ή χρόνου. Η διαδικασία καλείται Calibration και παραμένουν οι “by default” παράμετροι (SNAP Help).

Επόμενο βήμα είναι το φιλτράρισμα το θορύβου “Speckle filter”. Το φαινόμενο γνωστό ως “κόκκοι αλατιού-πιπεριού” απαντάται στις εικόνες στο επιτρεπτό όριο, καθώς κατά την επεξεργασία που υφίστανται τα δεδομένα level 0 προς τη δημιουργία των level 1 θυσιάζεται η ευκρίνεια παρά η ανάλυση. Το φίλτρο βοηθά στην συμπίεση του θορύβου για την καλύτερη ερμηνεία της εικόνας, ωστόσο κατά τη διαδικασία αυτή αφαιρούνται παρατηρήσεις που περιέχουν πολύτιμες πληροφορίες, χωρίς να έχουν δεχθεί την επίδραση του θορύβου

(Satheendran, 2018). Επιλέγεται η πόλωση VV και το φίλτρο “Lee Filter” με 7×7 “window size”, που με τη χρήση στατιστικών επιτρέπει τη διατήρηση της λεπτομέρειας.

Τελικό στάδιο αποτελεί η Γεωμετρική διόρθωση “Terrain Correction” η οποία διορθώνει την εσφαλμένη προβολή που έχει η εικόνα λόγω της πλάγια λήψης και την προβάλλει βάσει ελλειψοειδούς μοντέλου, στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται το Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα WGS84 (Automatic).

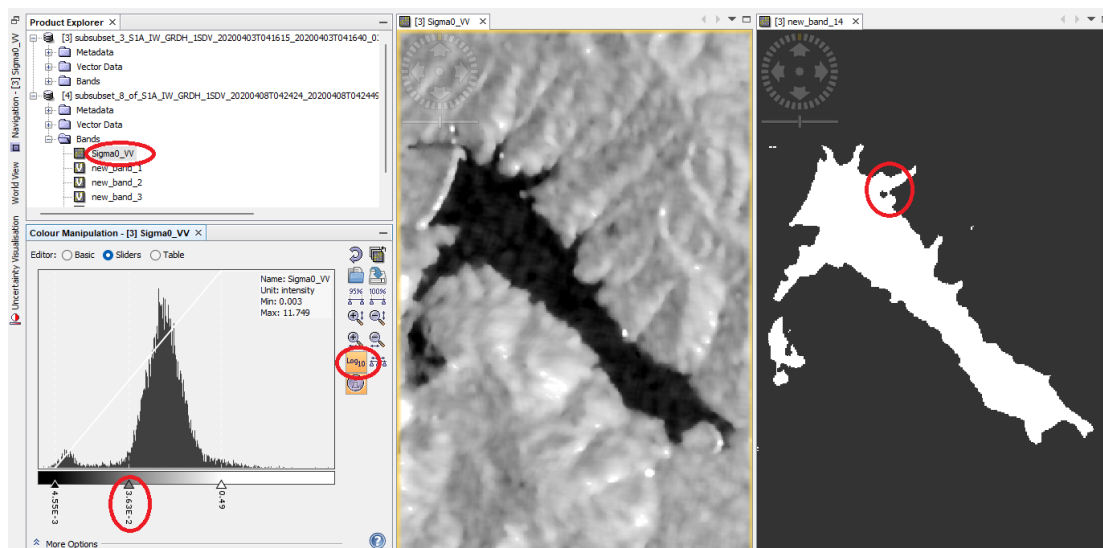
5.5.3 Επεξεργασία

Στην περίοδο αυτή περιγράφονται λεπτομερώς οι βασικότερες ενέργειες της μεθοδολογίας, που σταδιακά οδήγησαν στην αποτελεσματική αναπαράσταση των πλημμυρισμένων εκτάσεων. Αποτελεί συνέχεια του προηγούμενου υποκεφαλαίου, όπου λαμβάνονται τα απαλλαγμένα από αλλοιωτικούς παράγοντες δεδομένα.

Binarization

Στο συγκεκριμένο βήμα γίνεται προσπάθεια δυαδοποίησης των τιμών των εικόνων, ώστε οι πλημμυρισμένες εκτάσεις και κατ’ επέκταση το εύρος του υδάτινου ταμιευτήρα να έχουν την τιμή 1 και όλες οι υπόλοιπες τιμή 0.

Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται στο κανάλι “Sigma0_VV”. Το βασικό εργαλείο που συμβάλλει στην ευκολότερη επιλογή της κατάλληλης τιμής είναι το ιστόγραμμα. Για να έχουμε συνολική οπτική επ’ αυτού κάνουμε λογαριθμική μετατροπή με την εντολή “Log10” (Εικόνα 44), που αυξάνει το εύρος του ιστογράμματος και ενισχύει τις χαμηλές τιμές που αντιστοιχούν στα πλημμυρισμένα πεδία συμπιέζοντας τα pixel με μεγαλύτερη τιμή (Boryan et al., 2018). Προς το σκοπό αυτό αξιοποιούμε και τα υπόλοιπα εργαλεία εστίασης “Stretch histogram”, “Shrink histogram”. Με την χρήση του μέσου γκρι δείκτη παραμετροποιούμε το ιστόγραμμα, έτσι ώστε να βρούμε την τιμή εκείνη στην οποία οι υδάτινες μάζες είναι πολύ σκοτεινές και το υπόλοιπο περιβάλλον πολύ ανοιχτό (Εικόνα 44).

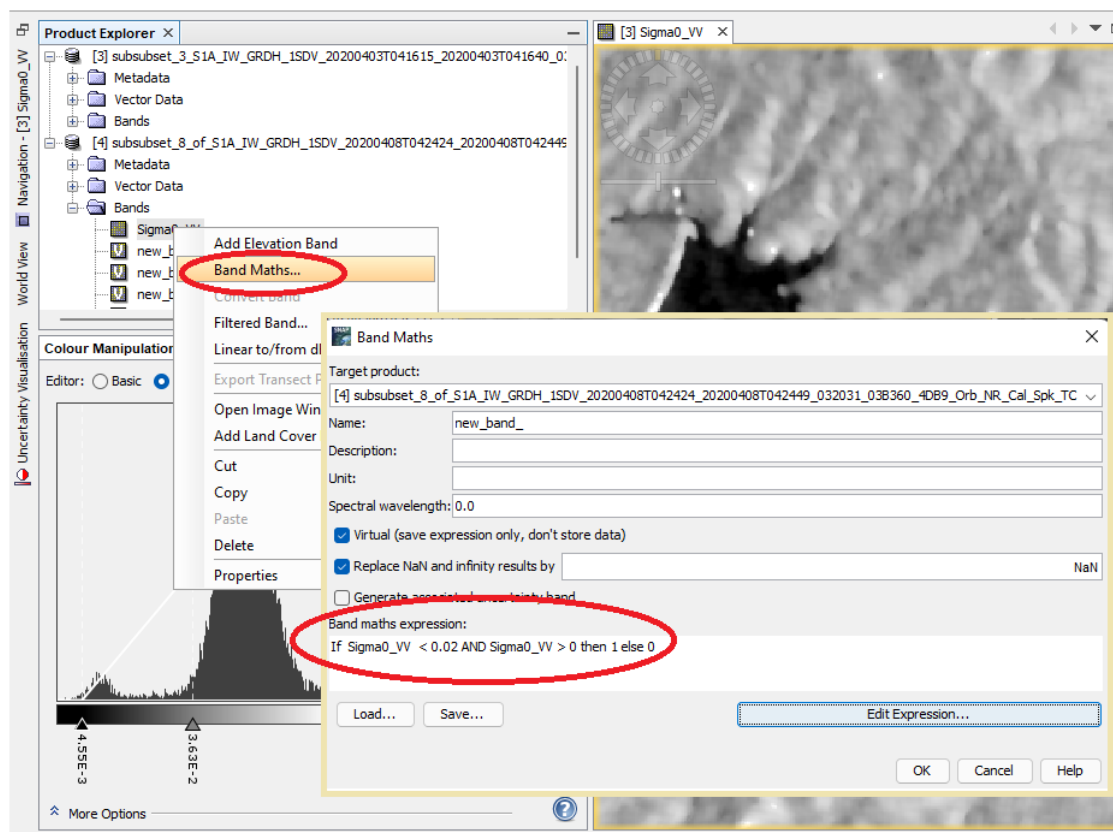


Εικόνα 44: Παραμετροποίηση ιστογράμματος προς τον εντοπισμό του κατωφλίου

Εφόσον, έχουμε εντοπίσει αυτή την τιμή ή επιθυμούμε να κάνουμε δοκιμές για να συνεχίσουμε την αναζήτηση, με δεξί κλικ στην εικόνα εφαρμόζουμε την εντολή “Band Maths” για τη δημιουργία της δυαδικής εικόνας, όπως φαίνεται δεξιά (Εικόνα 44), χρησιμοποιώντας τη σχέση (Εικόνα 45):

If Sigma0_VV < 0.02 AND Sigma0_VV > 0 then 1 else 0

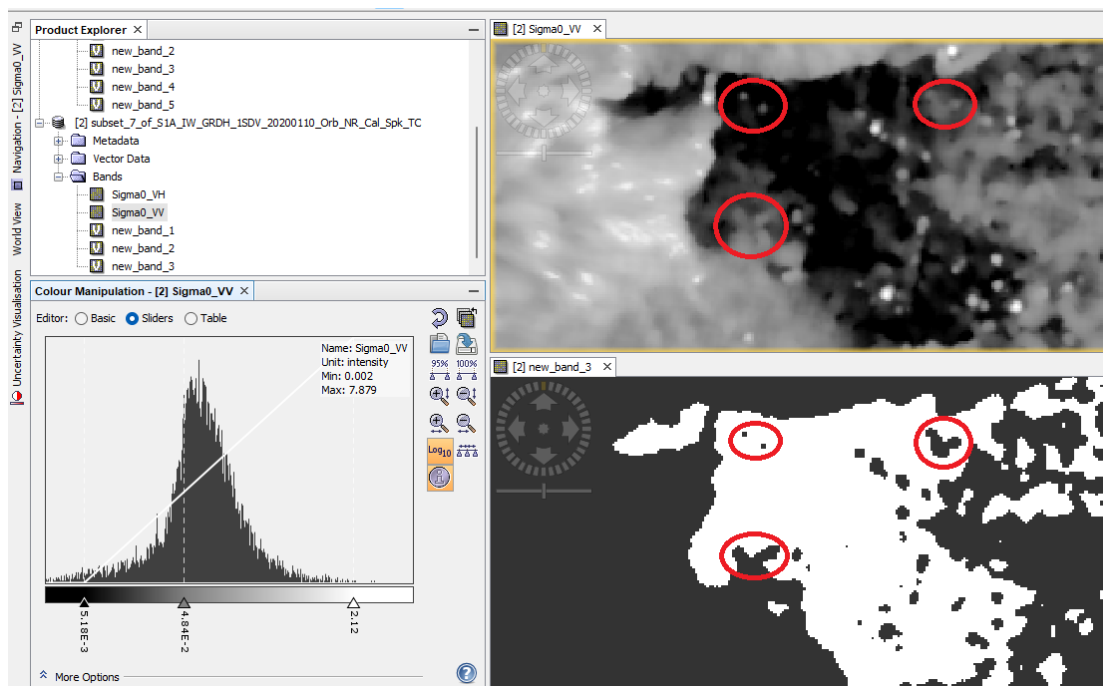
Η δημιουργία της εξίσωσης γίνεται άπαξ στο “Edit expression” και για λόγους εξοικονόμησης χρόνου την επικολλούμε από το πρόχειρο και την τροποποιούμε ανάλογα.



Εικόνα 45: Δημιουργία εξίσωσης στο “Band Math”

Επομένως, κάθε ριxel με τιμή χαμηλότερη του κατωφλίου που τέθηκε θα εμφανίζεται λευκό και οποιοδήποτε άλλο μαύρο. Έτσι η έκταση και τα σημεία που έχουν πληγεί θα είναι πολύ ευδιάκριτα (Εικόνα 44).

Μπορούμε να συγκρίνουμε τις δυαδικές εικόνες που δημιουργούμε με την αρχική έχοντας τις ανοιχτές και ενωμένες σε δύο παράθυρα με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης “Window arrangement” και “Tile Evenly” (Εικόνα 46).



Εικόνα 46: Διαδικασία επιλογής κατάλληλου κατώφλιού

Έτσι μπορούμε να δούμε αν η τιμή που επιλέξαμε ανταποκρίνεται στην πραγματική έκταση. Πιο συγκεκριμένα, αυτό το διαπιστώνουμε στα λεπτά σημεία καμπής της «σιλουέτας» των υδάτων (Εικόνα 46). Μετά από πολλές δοκιμές τα κατώφλια των εικόνων ορίστηκαν όπως στους παρακάτω πίνακες (

Πίνακας 8, Πίνακας 9, Πίνακας 10). Σε ορισμένες εικόνες χρειάστηκε να οριστούν δύο διαφορετικά κατώφλια, με γνώμονα την ακριβή αποτύπωση της δεξαμενής και του οροπεδίου, ενώ η τεχνητή λίμνη στις εικόνες 9/1/2020 και 9/11/2020 παρουσίαζε θολότητα, πιθανότατα λόγω τουρβιδισμού των υδάτων. Για το λόγο αυτό ο προσδιορισμός αντιπροσωπευτικής τιμής ήταν πολύ δύσκολος έως ακατόρθωτος στο συγκεκριμένο πλαίσιο. Το ίδιο παρουσιάζεται μερικώς και στη λίμνη Αγ.Γεωργίου στην ίδια λήψη του Ιανουαρίου.

Πίνακας 8: Τιμές κατωφλιού που επιλέχθηκαν για τη δυαδοποίηση των δορυφορικών εικόνων

Ημ/νία λήψης	Κατώφλι ταμιευτήρα	Κατώφλι οροπεδίου
3/1/2020	$3,081 \cdot 10^{-2}$	$3,081 \cdot 10^{-2}$
4/1/2020	$1,06 \cdot 10^{-2}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$
8/1/2020	$1,68 \cdot 10^{-2}$	$1,68 \cdot 10^{-2}$
9/1/2020	-	$3,4 \cdot 10^{-2}$
10/1/2020	$1 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$

Πίνακας 9: Τιμές κατωφλιού που επιλέχθηκαν για τη δυαδοποίηση των δορυφορικών εικόνων

Ημ/νία λήψης	Κατώφλι ταμιευτήρα	Κατώφλι οροπεδίου
3/4/2020	$1 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$
7/4/2020	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$
8/4/2020	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-2}$
9/4/2020	$1,08 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$

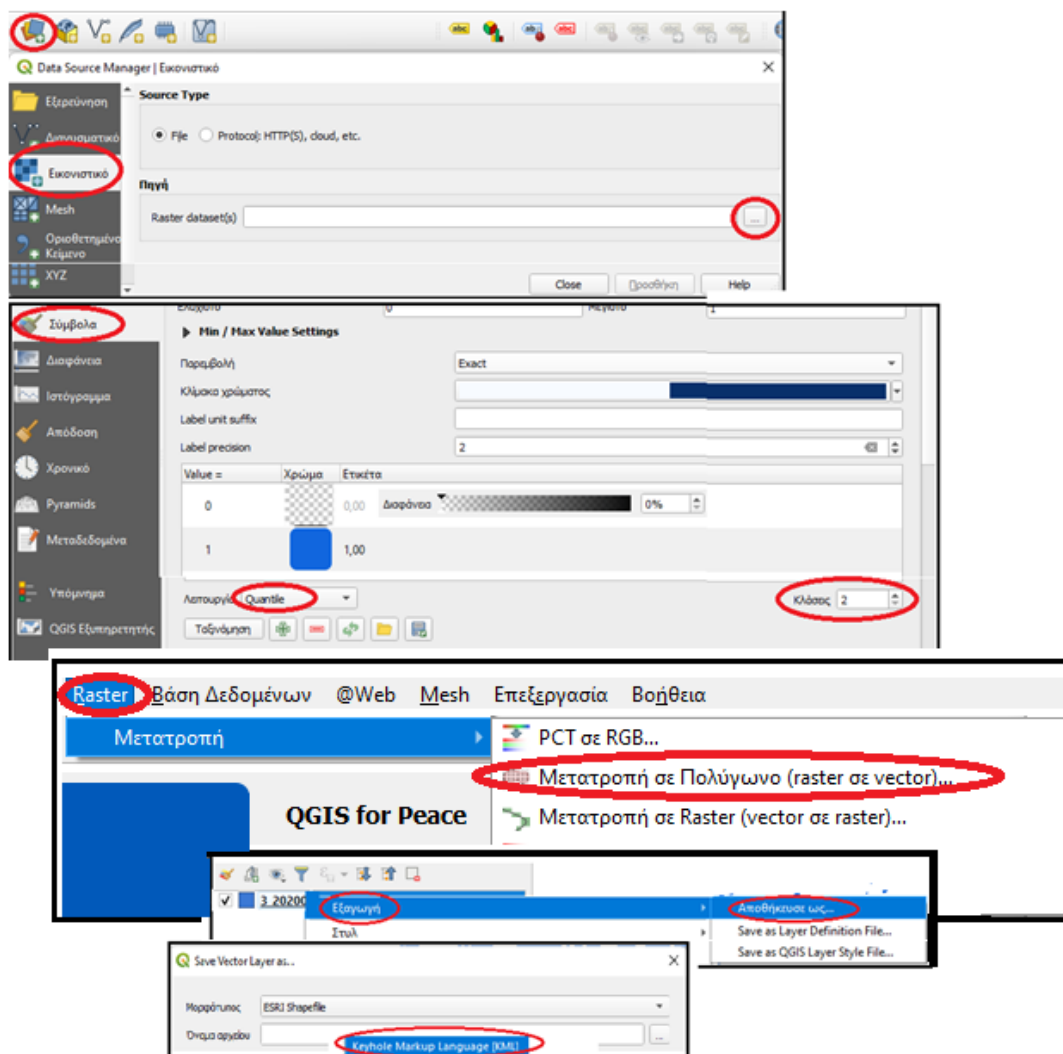
Πίνακας 10: Τιμές κατωφλιού που επιλέχθηκαν για τη δυαδοποίηση των δορυφορικών εικόνων

Ημ/νία λήψης	Κατώφλι ταμιευτήρα	Κατώφλι οροπεδίου
4/11/2020	$2,31 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$
5/11/2020	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
9/11/2020	-	$3 \cdot 10^{-2}$
10/11/2020	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$
11/11/2020	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$

5.5.4 Οπτικοποίηση σε ΣΓΠ και Google Earth

Αφού έχουμε ολοκληρώσει την παραπάνω διαδικασία σε σημείο που οι δυαδικές εικόνες μας έχουν την επιθυμητή μορφή, για να απομακρύνουμε τις σκιάσεις του Radar και να τις προβάλλουμε σε κάποιο χαρτογραφικό υπόβαθρο. Μπορούμε να τις εξάγουμε από το “SNAP” και ακολούθως να τις εισάγουμε σε πρόγραμμα ΣΓΠ “Qgis” σε μορφή raster και μετέπειτα στο *Google Earth*. Το SNAP μας δίνει αυτή τη δυνατότητα εξαγωγής από το μενού “File”, “Export”. Ο τύπος αρχείου που δέχεται το Qgis και μπορεί να το επεξεργαστεί εφόσον είναι γεωαναφερμένο, είναι το “GeoTIFF”.

Εισάγοντας το raster αρχείο μπορούμε να το οπτικοποιήσουμε δημιουργώντας δύο κλάσεις. Για τη μετατροπή σε kml, μετατρέπουμε αρχικά σε vector με την εντολή “Μετατροπή σε πολύγωνο” και ακολούθως κάνουμε εξαγωγή (Εικόνα 47).



Εικόνα 47: Διαδικασία εισαγωγής στο Qgis και εξαγωγής σε KML

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

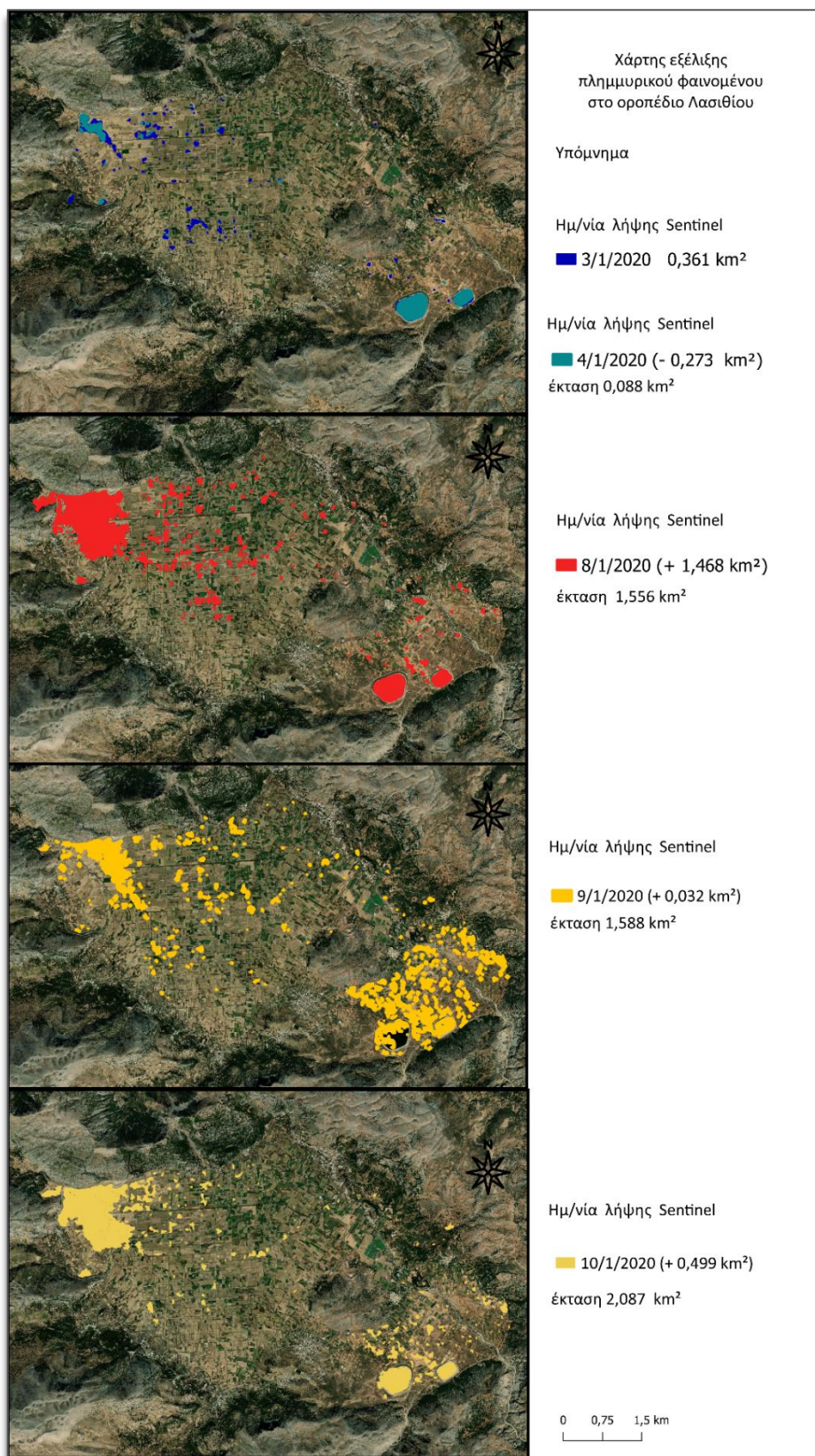
Η αποτύπωση των πλημμυρισμένων εκτάσεων έγινε με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα, οι παρακάτω χάρτες, για την εξέλιξη που εμφάνισαν τα φαινόμενα στις καλλιεργητικές εκτάσεις και στη στάθμη της λίμνης, δημιουργήθηκαν στο περιβάλλον του λογισμικού QGIS, με χαρτογραφικό υπόβαθρο της εταιρείας ESRI.

6.1 Χαρτογράφηση Πλημμυρικού Φαινομένου

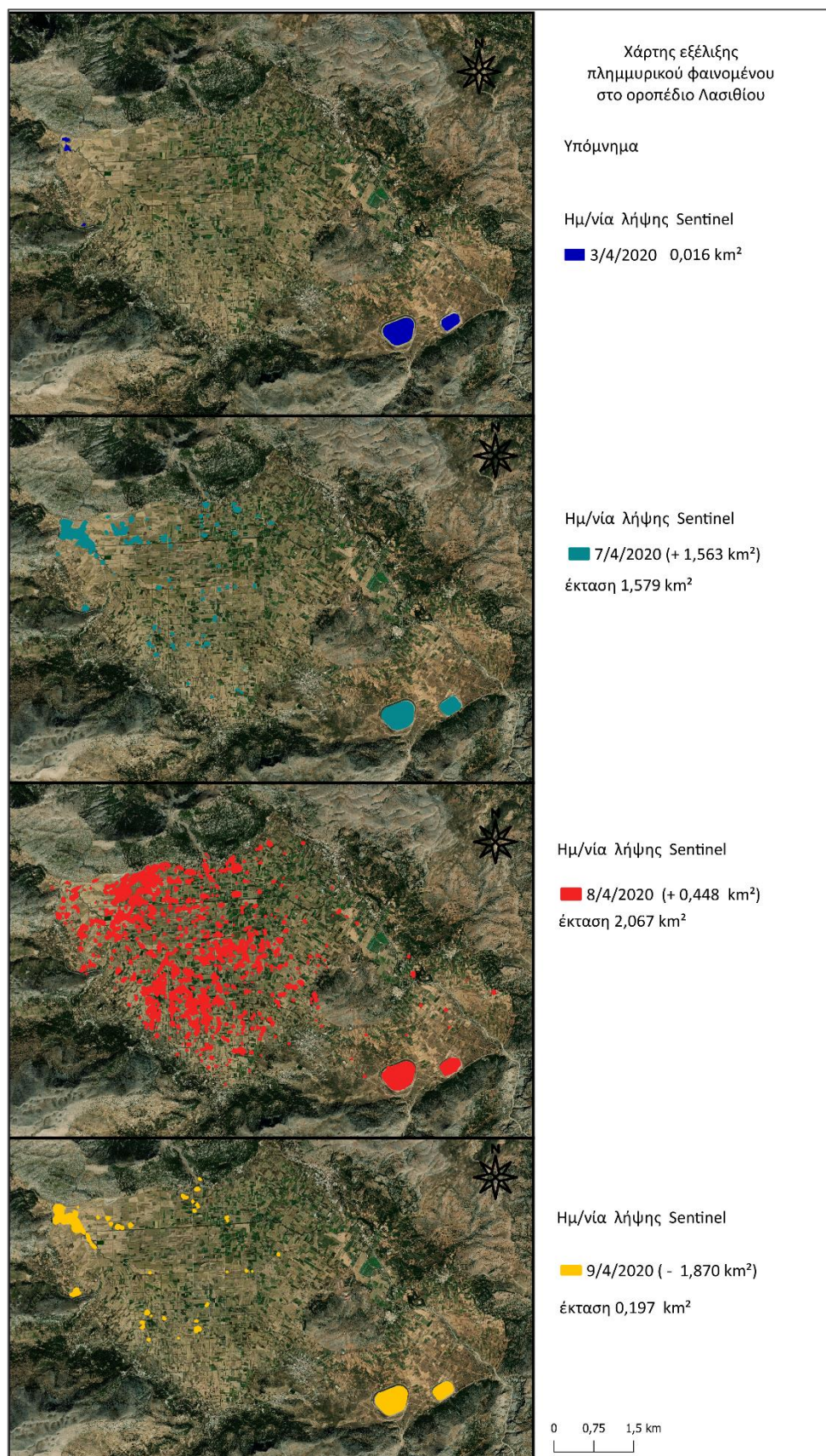
Τα πλημμυρικά φαινόμενα σημειώθηκαν λόγω των ισχυρών βροχοπτώσεων που επικράτησαν, με αποτέλεσμα να πλημμυρίσουν καλλιεργητικές εκτάσεις και να αυξηθεί η στάθμη της τεχνητής λίμνης. Η χαρτογραφική παραγωγή βασίστηκε στη μελέτη των δορυφορικών εικόνων Sentinel-1 SAR, οι οποίες ανακτήθηκαν, προ-επεξεργάστηκαν και επεξεργάστηκαν. Το τοπογραφικό ανάγλυφο λήφθηκε υπόψη κατά την αφαίρεση της επίδρασης του φαινομένου σκίασης του ραντάρ. Στην μέτρηση της έκτασης δε λαμβάνονται υπόψη οι δύο τεχνητές λίμνες του Αγ.Γεωργίου και Χαυγά, καθώς αποτελούν μόνιμα ύδατα.

Στους χάρτες που ακολουθούν (*Εικόνα 48*, *Εικόνα 49*, *Εικόνα 50*) αποτυπώνεται τόσο η έκταση, όσο και η αντίστοιχη μεταβολή της.

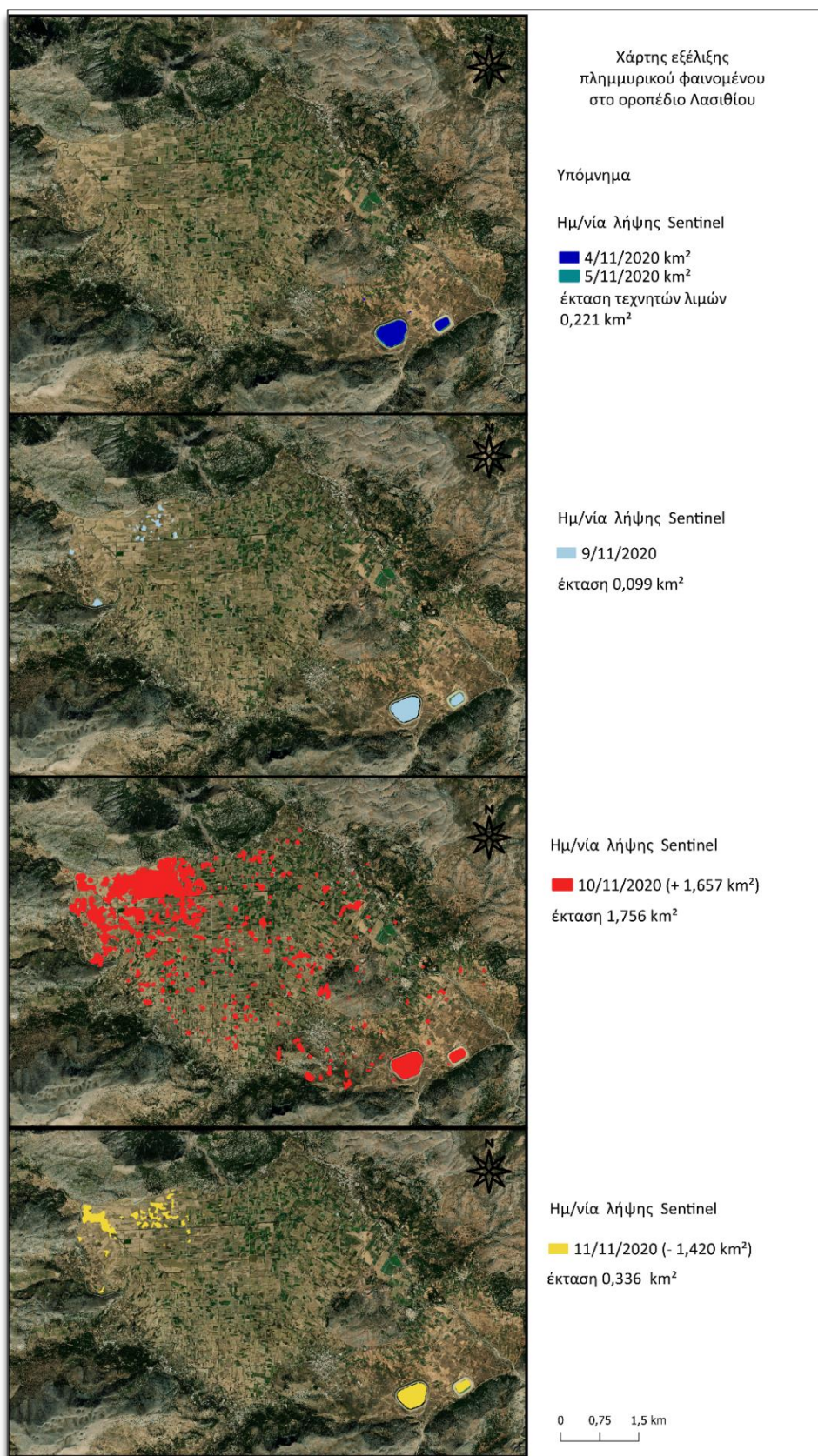
Όπως παρατηρούμε η πλημμυρισμένη έκταση εμφανίζει κορύφωση στις ημέρες με τα μεγαλύτερα ποσοστά κατακρημνισμάτων και σταδιακή μείωση στις αμέσως επόμενες. Η σημαντικότερη σχετικά με το εύρος πάνω από 2 km² ήταν του μήνα Απριλίου. Ταυτόχρονα, όμως είχε και τη μικρότερη διάρκεια, αφού στην λήψη της ακόλουθης ημέρας τα εναπομείναντα σημεία ήταν ελάχιστα. Παρομοίως και στο γεγονός του Νοεμβρίου δεν υπήρξε διάρκεια.



Εικόνα 48: Εξέλιξη πλημμυρικού φαινομένου στο οροπέδιο Λασιθίου κατά την περίοδο 3/1/2020 έως 10/1/2020



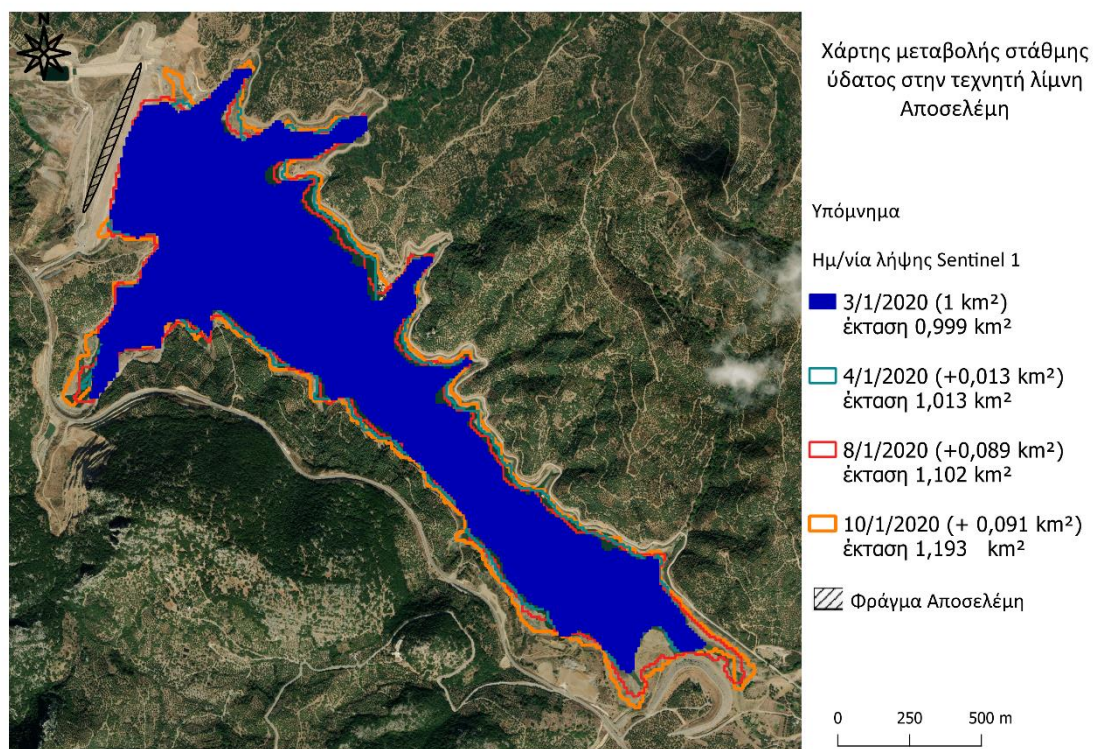
Εικόνα 49: Εξέλιξη πλημμυρικού φαινομένου στο οροπέδιο Λασιθίου κατά την περίοδο 3/4/2020 έως 9/4/2020



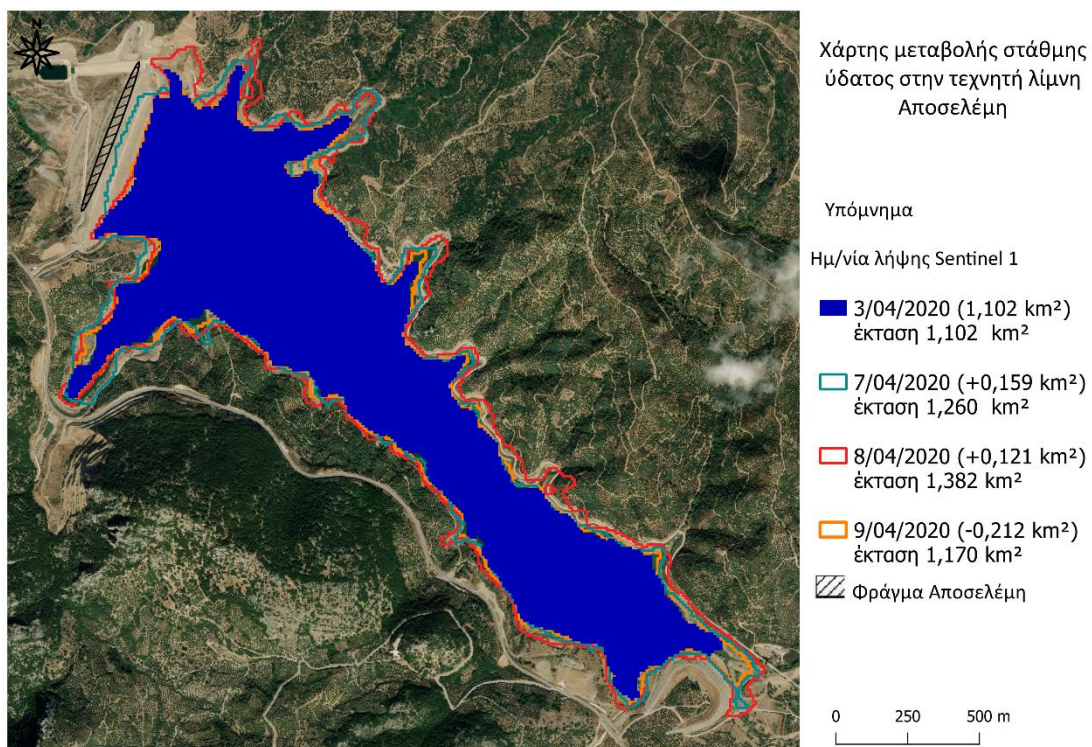
Εικόνα 50: Εξέλιξη πλημμυρικού φαινομένου στο οροπέδιο Λασιθίου κατά την περίοδο 4/11/2020 έως 11/11/2020

6.2 Χαρτογράφηση μεταβολής στάθμης ύδατος την τεχνητή λίμνη Αποσελέμη

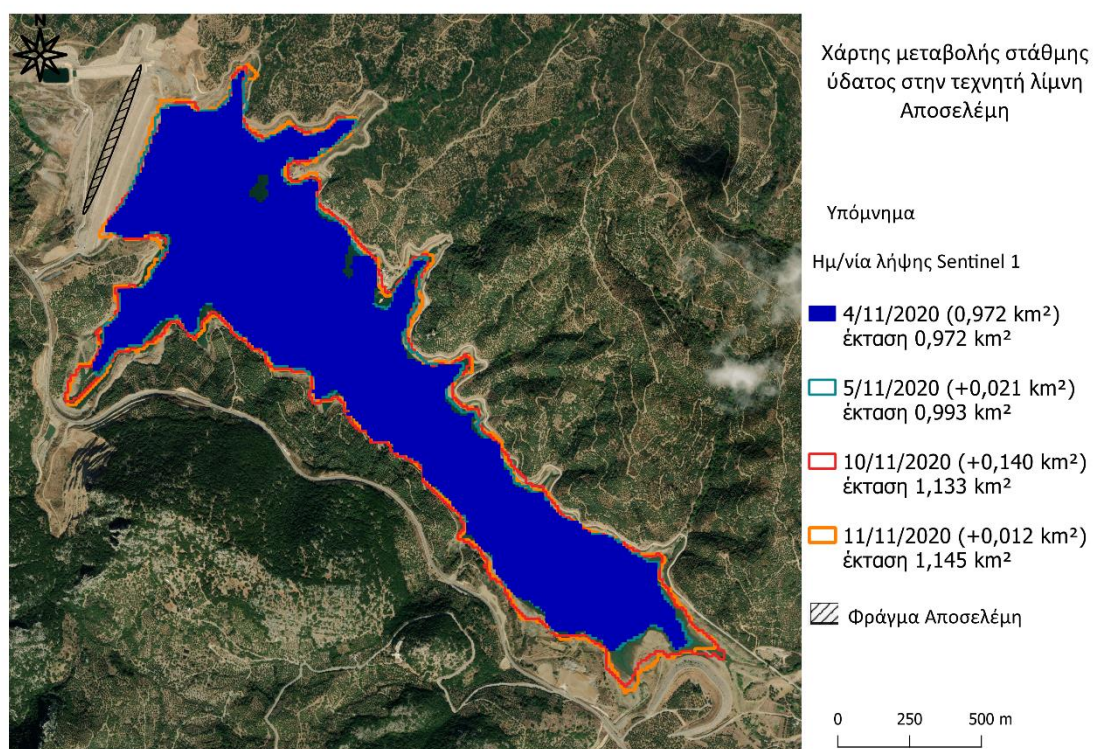
Όπως φαίνεται στους παρακάτω χάρτες (Εικόνα 51, Εικόνα 52, Εικόνα 53) η στάθμη της τεχνητής λίμνης έχει δεχθεί τις επιδράσεις της ισχυρής βροχόπτωσης. Η πιο μεγάλη μεταβολή στη μάζα της ήταν στα 1,133 km² κατά την ημερομηνία όπου το φαινόμενο κορυφώθηκε και στο οροπέδιο στις 10/11/2020, ενώ η πιο εκτενής ήταν στις 8 Ιανουαρίου 2020 που έφτασε στα 1,382 km².



Εικόνα 51: Χάρτης μεταβολής στάθμης ύδατος στην τεχνητή λίμνη Αποσελέμη κατά την περίοδο 3/1/2020 έως 10/1/2020



Εικόνα 52: Χάρτης μεταβολής στάθμης ύδατος στην τεχνητή λίμνη Αποσελέμη κατά την περίοδο 3/4/2020 έως 9/4/2020



Εικόνα 53: Χάρτης μεταβολής στάθμης ύδατος στην τεχνητή λίμνη Αποσελέμη κατά την περίοδο 4/11/2020 έως 11/11/2020

7 ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τον κορμό της εργασίας αποτέλεσαν οι στόχοι, που είχαν τεθεί από την αρχή και μέσω του συνολικού πονήματος διεκπεραιώθηκαν. Η χαρτογράφηση της εξέλιξης του πλημμυρικού φαινομένου στο οροπέδιο Λασιθίου και της μεταβολής που σημειώθηκε τις ίδιες περιόδους στη στάθμη της τεχνητής λίμνης Αποσελέμη, ήταν εφικτή με τη συμβολή των ελεύθερων δεδομένων του δορυφόρου παρατήρησης της Γης Sentinel 1 του προγράμματος Copernicus.

Το ίδιο καθοριστική είναι η συνεισφορά των λογισμικών SNAP, η διάθεση του οποίου είναι αδέσμευτη και υπό τους ίδιους όρους αξιών που υιοθετούνται από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα, καθώς και του Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών Qgis. Η σύγχρονη εφαρμογή τους διαμορφώνει ένα εύχρηστο και συνεκτικό περιβάλλον ισχυρής δυναμικής στον τομέα της διαχείρισης των φυσικών καταστροφών, όπου επικρατεί η εύθραυστη ισορροπία της άμεσης ανταπόκρισης των αρμόδιων φορέων και του μετριασμού των επιπτώσεων.

Από την μελέτη των πηγών η μέθοδος προσδιορισμού κατωφλίου προκύπτει αποδοτική σε όρους ικανότητας, χρόνου και συνέπειας με τα πραγματικά μεγέθη του φαινομένου. Η επικρατούσα πολικότητα που χρησιμοποιείται, καθώς φαίνεται να δίνει πιο καλά αποτελέσματα στη μελέτη των πλημμυρών είναι η VV. Βέβαια, όπως είναι φυσικό καμία πρακτική δεν αποτελεί πανάκεια και συστήνεται ο έλεγχος και της πόλωσης VH, όπως εφαρμόστηκε κι εδώ, που οδήγησε στην επαλήθευση της κυρίαρχης.

Από την υλοποίηση της μεθοδολογίας απορρέει πως η ανάλυση και τα γενικότερα πλεονεκτήματα των χαρακτηριστικών που διαθέτει το όργανο καταγραφής SAR μπορούν να κατευθύνουν αποτελεσματικά παρόμοιες μελέτες, χωρίς την ύπαρξη δεδομένων πεδίου. Η συχνή επαναληψιμότητα σάρωσης της ίδιας περιοχής, όπως φάνηκε, είναι ικανή να προσφέρει την παρακολούθηση της κατάστασης ενός καταστροφικού γεγονότος σε καθημερινή βάση, όπως σε συνθήκες νέφωσης, νυχτερινής κάλυψης, αλλά και διαχρονικής σύγκρισης.

Στην προσδιοριζόμενη περιοχή υφίστανται προβλήματα, η διευθέτηση των οποίων εκκρεμεί μακροχρόνια, ενώ δεν έχει υπάρξει παρόμοια μελέτη αξιοποίησης των δορυφορικών συστημάτων, ενώ το διαχρονικό πρόβλημα έχει αναλυθεί μονοδιάστατα με τη χρήση μετρήσεων επιτόπιων υδρολογικών σταθμών. Σημαντικό ποσοστό ανακούφισης μπορεί να προκύψει από την απορριμματική αποσυμφόρηση του Χώνου και του αρδευτικού – αποστραγγιστικού δικτύου, με την παράλληλη διάνοιξη του δύναται να προσφέρουν. Σαφώς, όπως αναφέρεται

στα παράπλευρα οφέλη του έργου του φράγματος Αποσελέμη, ο υδάτινος ταμιευτήρας έχει επικουρικό ρόλο στην αποστράγγιση του οροπεδίου, εντούτοις η πιο λεπτομερής και αριθμητική προσέγγιση του έχει ανάγκη από περισσότερα δεδομένα και παραμένει ανοιχτό ζήτημα για μελλοντική θεραπεία.

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Το μέγιστο που έλαβε η έκταση των πλημμυρισμένων περιοχών του οροπεδίου Λασιθίου βρέθηκε στα 1,588 km², 2,067 km² και 1,756 km² αντίστοιχα τις ημέρες 9 Ιανουαρίου, 8 Απριλίου και 10 Νοεμβρίου του 2020.
2. Ο υδάτινος ταμιευτήρας Αποσελέμη εμφάνισε μέγιστη κάλυψη 1,193 km², 1,382 km², 1,145 km² στις 10 Ιανουαρίου, 8 Απριλίου και 11 Νοεμβρίου 2020.
3. Επιβεβαιώνεται μέσω της παρούσας μελέτης η σημαντική συμβολή των ελεύθερων δεδομένων Copernicus για την αξιόπιστη, γρήγορη και ακριβή αποτύπωση των πλημμυρικών εκτάσεων.
4. Η καταλληλότητα των Sentinel 1 SAR και της εφαρμοζόμενης μεθόδου αποδείχθηκε πως είναι εργαλεία, η αξιοποίηση των οποίων μπορεί να λάβει χώρα εκεί που δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα, όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω της πυκνής και διαρκούς νεφοκάλυψης, τα οπτικά Sentinel 2 απολύουν την οπτική του πεδίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση

ASF. (2022). *Alaska Satellite Facility* [Web page]. <https://asf.alaska.edu/>

Attema, E., E., Alpers, W., Wooding, M., & Harris, R., A., (1998). *ASAR Science and Applications* (R. Harris A., Ed.; pp. 1–50). ESA Publications Division.
<https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/Envisat-ASAR-science-and-applications.pdf?text=SP-1225>

Barasa, B., & Wanyama, J. (2020). Freshwater lake inundation monitoring using Sentinel-1 SAR imagery in Eastern Uganda. *Annals of GIS*, 26(2), 191–200.
<https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1743754>

Born, G. H., Dunne, J. A., & Lame, D. B. (1979). Seasat mission overview. *Science*, 204(4400), 1405–1406. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.204.4400.1405>

Boryan, C. G., Yang, Z., Sandborn, A., Willis, P., & Haack, B. (2018). Operational agricultural flood monitoring with Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar. *IGARSS 2018 - IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 5831–5834.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519458>

Bouzinac, C. (2019). *CryoSat-2 product handbook*. ESA.
<https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/CryoSat-Baseline-D-Product-Handbook.pdf/c76df710-2a5c-c8b8-00c1-13c8db0e9f51>

- CEOS. (2022). *Committee on Earth Observation Satellites database* [Database].
<http://database.eohandbook.com/>
- Chan, Y. K., & Koo, V. C. (2008). An introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR). *Progress In Electromagnetics Research B*, 2, 27–60. <https://doi.org/10.2528/PIERB07110101>
- Chapman, B., Freeman, A., Siqueira, P., Shimada, M., & Rosenqvist, A. (1998). *JERS-1 SAR global rain forest mapping (GRFM) project: Data quality for multi-temporal studies* (Beacon library, California Institute of Technology). <http://hdl.handle.net/2014/19431>
- Cheng, S., Zhao, W., & Yin, Z. (2019). PS-InSAR analysis of collapsed dam and extraction of flood inundation areas in Laos using Sentinel-1 SAR images. *2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference*, 2605–2608. <https://doi.org/10.1109/IAEAC47372.2019.8997848>
- Cian, F., Marconcini, M., & Ceccato, P. (2018). Normalized difference flood index for rapid flood mapping: Taking advantage of EO big data. *Remote Sensing of Environment*, 209, 712–730. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.006>
- Collecte Localisation Satellites (CLS). (2016). *Sentinel-1 Product Definition*. ESA. <https://sentinel.esa.int/documents/247904/1877131/Sentinel-1-Product-Definition>
- Copernicus. (2018). *CORINE Land Cover* [Web page]. <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>
- Copernicus EMS. (2022). *Copernicus Emergency Management System* [Web page]. <https://emergency.copernicus.eu/>

- Creutin, J. D., & Borga, M. (2003). Radar hydrology modifies the monitoring of flash-flood hazard. *Hydrological Processes*, 17(7), 1453–1456. <https://doi.org/10.1002/hyp.5122>
- CSA. (2022). *Canadian Space Agency* [Web page]. <https://www.asc-csa.gc.ca/>
- Dell’Amore, L. (2019). *Assessment of image quality of waveform-encoded Synthetic Aperture Radar using real data* [Thesis, Università degli studi di Trento]. https://elib.dlr.de/119218/1/Thesis_compressed.pdf
- Diep, N. T. H., Duy, T. H., Diem, P. K., Nam, N. T. B., & Huong, N. T. T. (2019). Flood hazard mapping at Long Xuyen quadrangle in 2015 using geographic information and remote sensing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3-W8, 275–281. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-275-2019>
- DLR. (2022). *German Aerospace Center* [Web page]. https://www.dlr.de/EN/Home/home_node.html
- EODMS. (2022). *Earth Observation Data Management System of the government of Canada*. <https://www.eodms-sgdot.nrcan-rncan.gc.ca/index-en.html>
- ESA. (2022a). *Sentinels Online* [Web page]. <https://sentinels.copernicus.eu/>
- ESA. (2022b). *The European Space Agency* [Web page]. <https://www.esa.int/>
- Ezzine, A., Darragi, F., Rajhi, H., & Ghatassi, A. (2018). Evaluation of Sentinel-1 data for flood mapping in the upstream of Sidi Salem dam (Northern Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences* 2018 11:8, 11(8), 1–9. <https://doi.org/10.1007/S12517-018-3505-7>

- Faizan, M., & Palanisamy, G. (2021). Mapping of flood areas using Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) images with Google Earth Engine cloud platform: A case study of Chamoli district, Uttarakhand India. *3rd Intercontinental Geoinformation Days*, 18–21. <https://igd.mersin.edu.tr/>
- Fasano, L., & De Luca, G. F. (2018). The exploitation of the COSMO-SkyMed interoperability, expandability, multimission-multisensor capabilities for the SIASGE system of systems. *4th INCOSE Italia Conference on Systems Engineering*, 2248, 45–52. <http://ceur-ws.org/Vol-2248/>
- Febrianti, N., Yulianto, F., Arda, M., & Haryani, N. (2020). Flood inundation mapping using Synthetic Aperture Radar data single polarization: A case study of flood in lake Tempe, South Sulawesi Indonesia. *The 9th International Symposium for Sustainable Humanosphere*, 572. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/572/1/012028>
- Flores, A., Herndon, K., Thapa, R. B., & Cherrington, E. A. (2019). *Synthetic Aperture Radar (SAR) handbook: Comprehensive methodologies for forest monitoring and biomass estimation*. NASA. <http://dx.doi.org/10.25966/nr2c-s697>
- Frappart, F., Biancamaria, S., Normandin, C., Blarel, F., Bourrel, L., Aumont, M., Azemar, P., Vu, P. L., Le Toan, T., Lubac, B., & Darrozes, J. (2018). Influence of recent climatic events on the surface water storage of the Tonle Sap Lake. *Science of The Total Environment*, 636, 1520–1533. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.326>
- Geodata. (2022). *Εθνικός κατάλογος ανοικτών δεδομένων* [Web page]. <http://geodata.gov.gr/>

- Giordan, D., Notti, D., Villa, A., Zucca, F., Calò, F., Pepe, A., Dutto, F., Pari, P., Baldo, M., & Allasia, P. (2018). Low cost, multiscale and multi-sensor application for flooded area mapping. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(5), 1493–1516. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1493-2018>
- Google Earth. (2022). [Web page]. <https://earth.google.com/>
- Goumehei, E., Tolpekin, V., Stein, A., & Yan, W. (2019). Surface water body detection in polarimetric SAR data using contextual complex Wishart classification. *Water Resources Research*, 55(8), 7047–7059. <https://doi.org/10.1029/2019WR025192>
- Hahne, A., Lefebvre, A., Callies, J., & Zobl, R. (1993). The global ozone monitoring experiment (GOME): A New instrument for ERS-2. *ESA Bulletin*, 73. <https://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/ESA-Bulletin-073/offline/download.pdf>
- Hajaj, P. M. T., & Yarrakula, K. (2019). Application of Synthetic Aperture Radar imagery for spatio-temporal assessment of flood in Nagavali river. *Indian Journal of Ecology*, 46(3), 521–524.
- ICEYE. (2022). [Web page]. <https://www.iceye.com/>
- Iglesias, R., Garcia-Boadas, E., Vicente-Guijalba, F., Centolanza, G., & Duro, J. (2018). Towards unsupervised flood mapping generation using automatic thresholding and classification approaches. 4927–4930. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519111>
- JAXA. (2022). Japan Aerospace Exploration Agency [Web page]. <https://global.jaxa.jp/>

- Kim, Y., & Lee, M. J. (2020). Rapid change detection of flood affected area after collapse of the Laos Xe-Pian Xe-Namnoy Dam using Sentinel-1 GRD data. *Remote Sensing*, 12(12), 1978. <https://doi.org/10.3390/rs12121978>
- Knowelden, R. (2019). *Copernicus Sentinel data access annual report 2018*. <https://scihub.copernicus.eu/twiki/do/view/SciHubWebPortal/AnnualReport2018>
- Li, J., Wang, J., & Ye, H. (2021). Rapid flood mapping based on remote sensing cloud computing and Sentinel-1. *Journal of Physics: Conference Series*, 1952(2), 022051. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1952/2/022051>
- Liuzzo, L., Puleo, V., Nizza, S., & Freni, G. (2020). Parameterization of a bayesian normalized difference water index for surface water detection. *Geosciences*, 10(7), 260. <https://doi.org/10.3390/GEOSCIENCES10070260>
- Lv, J., Chen, J., Hu, J., Zhang, Y., Lu, P., & Lin, J. (2018, May). *Area change detection of Luoma lake based on Sentinel-1 A*. 2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Chengdu, China. <https://doi.org/10.1109/ICMMT.2018.8563989>
- Macdonald, H., & Hoque, E. (2021). *Floods bring new misery for Rohingya refugees in Bangladesh camps* [News article]. The UN Refugee Agency. <https://www.unhcr.org/news/stories/2021/7/6103c43c4/floods-bring-new-misery-rohingya-refugees-bangladesh-camps.html>
- Martinis, S., & Rieke, C. (2015). Backscatter analysis using multi-temporal and multi-frequency SAR data in the context of flood mapping at River Saale, Germany. *Remote Sensing*, 7(6), 7732–7752. <https://doi.org/10.3390/RS70607732>

- Mehta, A., McCartney, S., Zaitchik, B., & Bolten, J. (2019). Using Earth observations to monitor water budgets for river basin management. *NASA Applied Remote Sensing Training Program (ARSET)*. <https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/english/arset-using-earth-observations-monitor-water-budgets-river-basin-0>
- Moharrami, M., Javanbakht, M., & Attarchi, S. (2021). Automatic flood detection using Sentinel-1 images on the Google Earth engine. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(5), 248. <https://doi.org/10.1007/S10661-021-09037-7>
- Moya, L., Endo, Y., Okada, G., Koshimura, S., & Mas, E. (2019). Drawback in the change detection approach: False detection during the 2018 western Japan floods. *Remote Sensing*, 11(19), 2320. <https://doi.org/10.3390/RS11192320>
- NASA. (2022a). *National Aeronautics and Space Administration*. <https://www.nasa.gov/>
- NASA. (2022b). [Web page]. Earth Observing System Project Science Office. <https://eospso.nasa.gov>
- Ogilvie, A., Belaud, G., Massuel, S., Mulligan, M., Le Goulven, P., & Calvez, R. (2018). Surface water monitoring in small water bodies: Potential and limits of multi-sensor Landsat time series. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(8), 4349–4380. <https://doi.org/10.5194/HESS-22-4349-2018>
- Pena-Regueiro, J., Sebastiá-Frasquet, M. T., Estornell, J., & Aguilar-Maldonado, J. A. (2020). Sentinel-2 application to the surface characterization of small water bodies in Wetlands. *Water*, 12(5), 1487. <https://doi.org/10.3390/W12051487>

- Peng, Z., Shifeng, H., Yongmin, Y., Jianwei, M., Yayong, S., & Siyuan, G. (2019). *High-frequency monitoring of inland lakes water extent using time-series Sentinel-1 SAR data*. 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing, Chongqing, china. <https://doi.org/10.1109/ICSIDP47821.2019.9173066>
- Perrou, T., Garioud, A., & Parcharidis, I. (2018). Use of Sentinel-1 imagery for flood management in a reservoir-regulated river basin. *Frontiers of Earth Science*, 12(3), 506–520. <https://doi.org/10.1007/S11707-018-0711-2>
- Pettorelli, N., Bühne, H. S. T., Shapiro, A., & Glover-Kapfer, P. (2018). Satellite remote sensing for conservation. *Conservation Technology*. WWF Satellite Remote Sensing: Conservation Technology Series Issue 4, Gland, Switzerland. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25962.41926>
- QGIS. (2022). *Quantum Geographical Information System* [Web page]. <http://www.qgis.org>
- Quang, D. N., Linh, N. K., Tam, H. S., & Viet, N. T. (2021). Remote sensing applications for reservoir water level monitoring, sustainable water surface management, and environmental risks in Quang Nam province, Vietnam. *Journal of Water and Climate Change*, 12(7), 3045–3063. <https://doi.org/10.2166/WCC.2021.347/898424/JWC2021347.PDF>
- Richards, J. A. (2009). *Remote Sensing with Imaging Radar*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-02020-9>
- Risk Management Solutions. (2002). *Central Europe Flooding* [Event report]. https://forms2.rms.com/rs/729-DJX-565/images/fl_2002_central_europe_flooding.pdf

- RSIab ITE. (2019). Οι δορυφόροι δείχνουν τα γεμάτα φράγματα της Κρήτης. *Πατρίς*.
<https://www.patris.gr/2019/01/30/oi-doryforoi-deichnoyn-ta-gemata-fragmata-tis-kritis/>
- Satheendran, S. (2018). *Synthetic Aperture Radar for reservoir monitoring analysing the capability of Sentinel-1 SAR data for flood monitoring and mapping in Idukki dam reservoir, southern western Ghats of India*. Lap Lambert Academic Publishing: Republic of Moldova.
- Shimoda, H., & Kimura, T. (2018). Japanese Space Program. In L. Shunlin (Ed.), *Comprehensive Remote Sensing* (Vol. 1, pp. 246–279). Elsevier: Oxford, UK.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10320-3>
- Sipelgas, L., Aavaste, A., & Uiboupin, R. (2020). Mapping recurrent flooding zone along Estonian inland waters from Sentinel-1 and -2. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B3-2020*, 627–632.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-627-2020>
- Stelmaszczuk, M. (2020). *Flood mapping with Synthetic Aperture Radar* [Lecture presentation, University of Jena, Germany]. <http://www.eo4geo.eu/training/flood-mapping-with-synthetic-aperture-radar/>
- Tavus, B., Kocaman, S., & Gokceoglu, C. (2022). Flood damage assessment with Sentinel-1 and Sentinel-2 data after Sardoba dam break with GLCM features and random forest method. *Science of The Total Environment*, 816, 151585.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151585>

- Tellman, B., Sullivan, J. A., Kuhn, C., Kettner, A. J., Doyle, C. S., Brakenridge, G. R., Erickson, T. A., & Slayback, D. A. (2021). Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature*, 596(7870), 80–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w>
- Tsyganskaya, V., Martinis, S., & Marzahn, P. (2019). Flood monitoring in vegetated areas using multitemporal Sentinel-1 data: Impact of time series features. *Water*, 11(9), 1938. <https://doi.org/10.3390/w11091938>
- Villano, M. (2016). *Staggered Synthetic Aperture Radar* [Ερευνητική έκθεση - διατριβή, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)- German Aerospace Center]. <https://elib.dlr.de/110713/>
- Vishnu, C. L., Sajinkumar, K. S., Oommen, T., Coffman, R. A., Thrivikramji, K. P., Rani, V. R., & Keerthy, S. (2019). Satellite-based assessment of the August 2018 flood in parts of Kerala, India. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 758–767. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1543212>
- Yao, F., Wang, J., Wang, C., & Crétaux, J.-F. (2019). Constructing long-term high-frequency time series of global lake and reservoir areas using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111210. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111210>
- Zeng, L., Schmitt, M., Li, L., & Zhu, X. X. (2017). Analysing changes of the Poyang Lake water area using Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38(23), 7041–7069. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1370151>

Ελληνική

Αγαπάκης, Γ. (2015). *Φράγμα Αποσελέμη: Γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά*

[Παρουσίαση: Ειδική Υπηρεσία Δημοσίων Έργων Αποσελέμη].

<https://slideplayer.gr/slide/2613064/>

Βεληβασάκης, Ε. (2014). *Διαχείριση πλημμυρικών φαινομένων και υπόγειας ροής με χρήση GIS:*

Εφαρμογή στο Οροπέδιο Λασιθίου Κρήτης [Διπλωματική εργασία, Ελληνικό Ανοικτό

Πανεπιστήμιο]. <https://apothesis.eap.gr/handle/repo/27691>

ΓΓΠΠ. (2019). *Σχεδιασμός και δράσεις πολιτικής προστασίας για την αντιμετώπιση κινδύνων από*

την εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων [Σχέδιο δράσεων πλημμυρών 2019: Υπουργείο

Κλιματικής Κρίσης και Πολιτικής Προστασίας].

[https://www.civilprotection.gr/el/shediasmos-kai-driseis-politikis-prostasias-gia-tin-](https://www.civilprotection.gr/el/shediasmos-kai-driseis-politikis-prostasias-gia-tin-antimetopisi-kindynon-apo-tin-ekdilosi)

[antimetopisi-kindynon-apo-tin-ekdilosi](https://www.civilprotection.gr/el/shediasmos-kai-driseis-politikis-prostasias-gia-tin-antimetopisi-kindynon-apo-tin-ekdilosi)

Δεληκαράογλου, Δ. (2005). Γεωδαιτικές εφαρμογές συμβολομετρίας SAR. In *Ειδικά θέματα*

δορυφορικής γεωδαισίας. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Δήμος Οροπεδίου Λασιθίου. (2022). [Web page]. <https://lasithi.gov.gr/>

Ελληνικό Κτηματολόγιο. (2022). [Web page]. <https://www.ktimatologio.gr/>

ΕΛΣΤΑΤ. (2011). *Ελληνική Στατιστική Αρχή* [Web page]. <https://www.statistics.gr/>

Καββαλάκης, Α. (2017). *Μελέτη βιωσιμότητας ενεργειακής αξιοποίησης του φράγματος*

Αποσελέμη [Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης].

<https://dias.library.tuc.gr/view/68255>

- Κανονισμός (ΕΕ) αριθ.2021/696. (2021). *Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο Και Συμβούλιο*.
<http://data.europa.eu/eli/reg/2021/696/oj>
- Κουγιουμουτζή, Γ. (2021). *Ινστιτούτο Αγροτικών Ερευνών στο οροπέδιο Λασιθίου Κρήτης*
 [Πτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο].
<http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.20451>
- Μάλλη, Ε. Ε. (2017). *Μηχανική διάνοιξη μέσα σε καρστικούς σχηματισμούς της σήραγγας*
Αποσελέμη [Πτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο].
<http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.14314>
- Νιφάκου, Μ., & Σαρλά, Σ. (Eds.). (2013). *Τα φράγματα της Ελλάδας*. Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων
 Φραγμάτων. http://www.eeft.gr/Fragmata_Elladas_201311.pdf
- Παρχαρίδης, Ι. (2015). *Αρχές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Πετρίδου, Δ. (2020). *Οι δορυφοροι Sentinel του ευρωπαϊκού προγράμματος Copernicus*
 [Ερευνητική]. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Σταγάκης, Σ. (2012). *Αξιολόγηση και χρήση τεχνικών τηλεπισκόπησης για την παρακολούθηση*
της δυναμικής χερσαίων οικοσυστημάτων [Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο
- Ιωαννίνων]. <http://dx.doi.org/10.12681/eadd/28458>
- Τσιούνια, Α. (2012). *Εκτίμηση των παραμέτρων του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης*
απορροής του ποταμού Αποσελέμη (Ν. Κρήτη) [Διπλωματική εργασία, Χαροκόπειο
- Πανεπιστήμιο]. <https://estia.hua.gr/browse/8710>
- ΥΠΕΚΑ. (2018). *Ανάλυση Χαρακτηριστικών Περιοχής και Μηχανισμών Πλημμύρας—Σχέδια*
Διαχείρισης *Κινδύνων* *Πλημμύρας*.

https://floods.ypeka.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=262&Itemid=838

Φαλάρας, Τ. Σ. (2021). *Ανάλυση και αξιολόγηση παράλληλης χρονικά παρακολούθησης ενδοχώριου υδάτινου ταμιευτήρα και της γειτονικής αγροτικής λεκάνης του στην εποχή της Κλιματικής Αλλαγής* [Διπλωματική εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο]. <https://estia.hua.gr/browse/25158>

Φαρασλής, Ι. Ν., & Μωυσιάδης, Α. Κ. (2015). *Η Τηλεπισκόπηση σε 13 ενότητες*. www.kallipos.gr