



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**Ανάπτυξη μεθόδου χαρτογράφησης πλημμύρων με χρήση δεδομένων
Sentinel 1**

Σοφία Ανδρονπούλου

Επιβλέπουσα καθηγήτρια:
Βασιλεία Καραθανάση, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2021

Πρόλογος και Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας στο εργαστήριο Τηλεπισκόπησης της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. αποτελεί το τελευταίο στάδιο των προπτυχιακών σπουδών μου. Το θέμα της διπλωματικής μου εργασίας είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη χαρτογράφηση πλημμύρων με χρήση δεδομένων Sentinel 1. Στόχος της εργασίας καθίσταται η ανάδειξη της συνεισφοράς της επιστήμης της Τηλεπισκόπησης και των εικόνων ραντάρ στη χαρτογράφηση φυσικών καταστροφών που συμβαίνουν και αποτελούν κίνδυνο πολλές φορές για τους ζωντανούς οργανισμούς στον πλανήτη.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν για την εκπόνηση της εργασίας μου χωρίς τους οποίους η περάτωσή της θα ήταν αδύνατη.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Βασιλεία Καραθανάση για την ανάθεση της εργασίας και που μου έδωσε την ευκαιρία να μελετήσω ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Με καθοδήγησε σε κάθε βήμα και ήταν διαθέσιμη και υποστηρικτική καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας. Οι γνώσεις της πάνω στο θέμα, το ενδιαφέρον της και οι προτάσεις της για τα βήματα της διπλωματικής εργασίας ήταν καθοριστικές για όλη την περίοδο που διήρκεσε η εκπόνηση της εργασίας μου.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Υποψήφιο Διδάκτορα της σχολής κ. Κλεάνθη Καραμβάση ο οποίος μου προσέφερε την πολύτιμη βοήθειά του. Ήταν πάντα διαθέσιμος και έδειχνε συνεχώς το ενδιαφέρον του για το θέμα της εργασίας. Οι συμβουλές του με παρότρυναν να βελτιώνομαι και εκτός αυτού ήταν πάντα πρόθυμος να με βοηθήσει σε όλα τα τεχνικά ζητήματα και τις δυσκολίες που προέκυπταν, με στόχο το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου που ήταν δίπλα μου, αλλά και για την στήριξή τους κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	6
Abstract	8
Εισαγωγή.....	11
1. Θεωρητικό Υπόβαθρο	12
1.1 Η επιστήμη της Τηλεπισκόπησης	12
1.2 Μικροκυματική ακτινοβολία- Παθητικοί και Ενεργητικοί δέκτες	12
1.3 Ραντάρ και απεικονίσεις Συνθετικού Ανοίγματος Ραντάρ.....	13
1.4 Sentinel-1 Copernicus.....	14
1.5 Απεικονίσεις ΣΑΡ και χαρτογράφηση πλημμυρών	14
1.6 Ιστόγραμμα δορυφορικών εικόνων	15
1.7 Η μέθοδος κατωφλίωσης Otsu.....	17
2. Διεθνής Βιβλιογραφία.....	20
2.1 Χαρτογράφηση πλημμύρας με χρήση πιθανοτήτων	20
2.1.1 Χαρτογράφηση πλημμύρας με χρήση μίας εικόνας SAR.....	20
2.1.2 Χαρτογράφηση πλημμύρας με χρήση χρονοσειράς εικόνων ΣΑΡ	20
2.1.3 Χαρτογράφηση πλημμύρας με συνδυασμό εικόνων ραντάρ και οπτικών δεδομένων	21
2.2 Χαρτογράφηση πλημμύρας χωρίς τη χρήση πιθανοτήτων	22
2.2.1 Χαρτογράφηση πλημμύρας με fuzzy logic	22
2.2.2 Χαρτογράφηση πλημμύρας με κατωφλίωση.....	23
3. Μέθοδος και επεξεργασία δεδομένων.....	25
3.1 Επιλογή πλημμυρικών επεισοδίων	25
3.2 Επιλογή των εικόνων	26
3.3 Προεπεξεργασία εικόνων Sentinel-1	26
3.4 Αφαιρέσεις εικόνων με χρονολογική σειρά.....	29
3.5 Εικόνες μέσου όρου των διαφορών και αφαίρεσή τους	31
3.6 Κατωφλίωση της εικόνας της διαφοράς των μέσων όρων.....	31
3.7 Φιλτράρισμα με τις κατάλληλες μάσκες-κριτήρια.....	31
3.8 Εκτέλεση αλγορίθμου Otsu για βελτιστοποίηση του αποτελέσματος – Χάρτης πιθανοτήτων	32
4. Εφαρμογή της μεθοδολογίας – Αποτελέσματα	35
4.1 Περιοχή μελέτης στη Νορβηγία – Δασώδης περιοχή	35
4.1.1 Εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν.....	36

4.1.2 Αφαίρεσεις εικόνων με χρονολογική σειρά.....	41
4.1.3 Εικόνες μέσου όρου των διαφορών.....	43
4.1.4 Διαφορά των εικόνων μέσου όρου- Κατωφλίωση	44
4.1.5 Μασκάρισμα – Απαλοιφή λανθασμένα «πλημμυρισμένων» σημείων.....	46
4.1.6. Εκτέλεση αλγορίθμου Otsu για βελτιστοποίηση του αποτελέσματος- Χάρτης πιθανοτήτων.....	50
4.2 Περιοχή μελέτης στην Ελλάδα – Αγροτική περιοχή.....	52
4.2.1 Εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν.....	52
4.2.2 Αφαίρεση εικόνων με χρονολογική σειρά	56
4.2.3 Εικόνες μέσου όρου των διαφορών.....	58
4.2.4 Διαφορά των εικόνων μέσου όρου- Κατωφλίωση	59
4.2.5 Εκτέλεση αλγορίθμου Otsu για βελτιστοποίηση του αποτελέσματος- Χάρτης πιθανοτήτων.....	60
4.3 Περιοχή μελέτης στην Ιταλία – Αστική περιοχή.....	62
4.3.1 Εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν.....	63
4.3.2 Αφαίρεση των εικόνων.....	65
4.3.3 Μασκάρισμα των υδάτινων επιφανειών	65
4.3.4 Κατωφλίωση της μασκαρισμένης εικόνας.....	66
5. Αξιολόγηση της μεθόδου	68
5.1 Δασώδης περιοχή.....	68
5.1.1 Αξιολόγηση της μεθόδου στη δασώδη περιοχή	69
5.2 Αγροτική περιοχή	76
5.2.1 Αξιολόγηση της μεθόδου στην αγροτική περιοχή	77
5.3 Αστική περιοχή	82
5.3.1 Αξιολόγηση της μεθόδου στην αστική περιοχή.....	82
6. Σχολιασμός και Συμπεράσματα	86
Βιβλιογραφία.....	89
Παράρτημα – Κώδικας στο περιβάλλον Matlab	91
1. Αλγόριθμος αφαίρεσης μεταξύ δύο εικόνων:	91
2. Αλγόριθμος υπολογισμού μέσου όρου των εικόνων σε έναν φάκελο.....	92
3. Αλγόριθμος με κεντροειδή και μέθοδο Otsu, δημιουργία χάρτη πιθανοτήτων	93
4. Αλγόριθμος με μέθοδο Otsu και δημιουργία χάρτη πιθανοτήτων	95
Λίστα Εικόνων	97

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο την ανάπτυξη μιας μεθόδου για τη χαρτογράφηση πλημμύρας σε διαφορετικές καλύψεις γης με χρήση δεδομένων Συνθετικού Ανοίγματος Ραντάρ (ΣΑΡ), Sentinel 1. Οι εικόνες οι οποίες λαμβάνονται από το δορυφόρο Sentinel 1 δημιουργούνται με την καταγραφή της μικροκυματικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον ίδιο τον δέκτη στη γήινη επιφάνεια και επιστρέφει σ' αυτόν. Η χρήση εικόνων ραντάρ για την ανίχνευση αλλαγών που συμβαίνουν στην επιφάνεια της γης είναι πολύ διαδεδομένη, καθώς οι δορυφόροι που εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στα μικροκύματα παρέχουν τη δυνατότητα για χαρτογράφηση της επιφάνειας της γης ανεξαρτήτως ώρας και καιρικών συνθηκών.

Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκε μία μέθοδος η οποία χαρτογραφεί και παρακολουθεί επεισόδια πλημμύρας με χρήση εικόνων ραντάρ. Η μέθοδος βασίζεται στη διάκριση των αλλαγών των τιμών οπισθοσκέδασης στην περιοχή μελέτης σε εικόνες πριν την πλημμύρα και απαλοιφή αυτών των αλλαγών στην εικόνα της πλημμύρας έτσι ώστε να προκύψουν μόνο οι αλλαγές λόγω πλημμύρας. Η μέθοδος αφορά στη δημιουργία χρονοσειράς και επεξεργασία της α) με τη συμμετοχή και β) χωρίς τη συμμετοχή της εικόνας της πλημμύρας, με σκοπό την ανάπτυξη εικόνων διαφορών. Ανάπτυξη μασκών, κατάλληλη κατωφλίωση και εφαρμογή της μεθόδου Otsu επιτρέπουν στη συνέχεια τη δημιουργία χάρτη πιθανοτήτων για τις πλημμυρισμένες περιοχές.

Η μέθοδος εφαρμόστηκε και αξιολογήθηκε για τρεις διαφορετικές χρήσεις/καλύψεις γης - δασώδεις, αγροτικές και αστικές - ενώ τροποποιήθηκε ανάλογα για να ανταποκριθεί στις ιδιαιτερότητες των αστικών περιοχών. Αρχικά αναζητήθηκαν πλημμυρικά επεισόδια για τις τρεις διαφορετικές χρήσεις/καλύψεις γης και στη συνέχεια εφαρμόστηκε και αξιολογήθηκε.

Το πρώτο επεισόδιο αφορά την πλημμύρα που έγινε σε δασώδες περιβάλλον στην περιοχή Κραγκέρο της Νορβηγίας μετά από βροχές στις 21 Οκτωβρίου 2017. Λήφθηκε η εικόνα η οποία απεικόνιζε την πλημμύρα, η οποία είχε ημερομηνία λήψης 22 Οκτωβρίου 2017, καθώς και μία χρονοσειρά εικόνων από τις 4 Σεπτεμβρίου έως και τις 16 Οκτωβρίου του ίδιου έτους. Εξαιρέθηκαν όσες ημερομηνίες σε αυτό το διάστημα είχαν βροχερές καιρικές συνθήκες και έμειναν 6 εικόνες πριν την πλημμύρα, ενώ επεξεργάστηκαν και δύο ακόμη εικόνες μετά την πλημμύρα για την παρακολούθηση του επεισοδίου.

Το δεύτερο επεισόδιο πλημμύρας ήταν αυτό που έγινε στον Πηνειό ποταμό ο οποίος διασχίζει αγροτική περιοχή. Οι έντονες βροχοπτώσεις που συνέβησαν στην περιοχή από τις 26 Φεβρουαρίου 2018 μέχρι τις 28 Φεβρουαρίου 2018 οδήγησαν στην υπερχείλιση του ποταμού και σε πλημμύρα μεγάλης έκτασης καλλιεργειών. Για τη περίπτωση του Πηνειού, λήφθηκε η εικόνα πλημμύρας με ημερομηνία λήψης 28 Φεβρουαρίου 2018 και μία χρονοσειρά εικόνων από τις 5 Ιανουαρίου 2018 έως τις 16 Φεβρουαρίου. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 8 εικόνες για την εφαρμογή της μεθοδολογίας στη συγκεκριμένη περιοχή. Για την παρακολούθηση του επεισοδίου, η μέθοδος εφαρμόστηκε σε δύο ακόμη εικόνες μετά την πλημμύρα.

Το τρίτο επεισόδιο αφορούσε αστική περιοχή, συγκεκριμένα τον πυκνό αστικό ιστό της πόλης της Βενετίας. Η Βενετία είναι μια πόλη η οποία δυστυχώς πλημμυρίζει συχνά εξαιτίας βροχοπτώσεων επειδή υπερχειλίζουν τα κανάλια που την διασχίζουν. Το πλημμυρικό επεισόδιο που μελετήθηκε συνέβη στις 12 Νοεμβρίου 2019, το οποίο ήταν το πιο καταστροφικό στην ιστορία της Βενετίας από το 1966. Η εικόνα η οποία λήφθηκε ως πλημμυρισμένη είχε ημερομηνία λήψης 15 Νοεμβρίου 2019.

Λήφθηκαν στην αρχή αρκετές εικόνες ώστε να χρησιμοποιηθεί μια χρονοσειρά εικόνων όπως στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις που αναφέρθηκαν. Όμως οι διαρκείς αλλαγές που συμβαίνουν στο πυκνό και πολύπλοκο αστικό τοπίο δεν επέτρεψαν την επιτυχή χαρτογράφηση του πλημμυρικού γεγονότος με χρήση πολλών εικόνων. Έτσι, για την περίπτωση της Βενετίας χρησιμοποιήθηκαν 3 εικόνες συνολικά και η μέθοδος τροποποιήθηκε κατάλληλα.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι η μέθοδος μπορεί με επιτυχία να χαρτογραφήσει και να παρακολουθήσει πλημμυρικά επεισόδια σε δασώδεις και αγροτικές περιοχές χρησιμοποιώντας δεδομένα SAR Sentinel-1 χωρικής ανάλυσης 20x22μ. Για το αστικό περιβάλλον, η αδυναμία της μεθόδου οφείλεται στη χωρική ανάλυση των Sentinel-1 δεδομένων η οποία δεν επαρκεί για να αποδώσει δυναμικά φαινόμενα που εξελίσσονται στο πυκνό αστικό περιβάλλον.

Abstract

This diploma thesis aims at the development of a method for flood mapping in different land covers using Sentinel 1 Synthetic Aperture Radar (SAR) data. Sentinel 1 is an active radar sensor; it emits a pulse that is propagated to the ground and then it records the backscattered pulse from the ground. Radar images are used broadly for detecting changes on the earth's surface because the microwave electromagnetic region where the radar sensor operates provides the ability to map the earth's surface regardless of time and weather conditions.

In the context of this thesis, a method was developed that is based on the detection of changes in the backscattering values in pre-flood images and elimination of these changes in the flood image so that only changes that are due to the flood will be highlighted after its comparison with pre-flood images. The method concerns the creation of a Sentinel 1 image time series and its processing a) with the participation and b) without the participation of the flood image, in order to develop images of differences. Image masking, proper thresholding, and application of the Otsu method allow the creation of a probability map for the flooded areas.

The method was applied and evaluated for three different land use / cover categories - forest, agricultural and urban categories - while it was modified accordingly in order to meet the complex and dynamic changes of urban areas. Flood events were initially retrieved for the three different land use / land cover categories and then applied and evaluated.

The first event concerns the flood that occurred in the forested area of Kragero, Norway, after heavy rain on October 21, 2017. The image showing the flood event was downloaded. It was acquired on October 22, 2017. A time series of images from September 4th to and on October 16th of the same year were downloaded as well. The dates in this period that had rainy weather were excluded, so just 6 images before the flood event were left to apply the methodology. In addition, two more images acquired after the flood event were processed according to the proposed method, to monitor the evolution of the flood.

The second flood event was the one that occurred in the river Pinios, Greece which crosses a rural area. The heavy rains that occurred in the area from 26 February 2018 to 28 February 2018 led to the overflow of the river and to the flooding of large crop areas. In the case of Pinios, the flood image was acquired on February 28, 2018 and the image time series were acquired from the 5th of January to 16th of February 2018. Totally 8 images were used in this area. To monitor the event, the method was applied on two more images, acquired after the flood event.

The third application concerned an urban area, namely the dense urban area of the city of Venice, Italy. Unfortunately, Venice is a city that often floods due to rainfall because of the overflow of the canals that cross it. The flood incident studied occurred on November 12, 2019, which was the most catastrophic in the history of Venice since 1966. The image of the flood was acquired on November 15th, 2019. Several images were initially downloaded so an image time series is used, as in the previous two cases. However, the frequent changes that occur in the dense and complex urban landscape did not allow the successful mapping of the flood event using Sentinel 1 image time series. Thus, in the case of Venice, a total of 3 images were used and the method was modified accordingly.

The evaluation of the results showed that the method successfully maps and monitors flood events in wooded and rural areas using Sentinel-1 SAR data with 20x22m spatial resolution. For the urban environment, the weakness of the method is due to the spatial analysis of Sentinel-1 data which is not sufficient to assess the dynamic phenomena that occur in the dense urban environment.

Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη μεθόδου για την χαρτογράφηση πλημμύρων με χρήση δεδομένων Sentinel 1. Η μέθοδος που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε σε διαφορετικές καλύψεις/χρήσεις γης και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα.

Η επεξεργασία των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν έγινε με τη χρήση του λογισμικού SNAP και η δημιουργία μασκών και η προβολή των αποτελεσμάτων με τη χρήση του QGIS. Επιπλέον, στο πλαίσιο της εργασίας ήταν απαραίτητη η δημιουργία αλγορίθμων, διαδικασία η οποία έγινε σε περιβάλλον Matlab.

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή της εργασίας:

Στο πρώτο κεφάλαιο περιέχεται το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τις εικόνες ΣΑΡ και τις μεθόδους επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν στη διπλωματική εργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιληπτική περιγραφή των εργασιών της διεθνούς βιβλιογραφίας οι οποίες αφορούν το θέμα της παρούσας εργασίας, δηλαδή σε μεθόδους χαρτογράφησης πλημμύρων με χρήση εικόνων ραντάρ.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η μέθοδος η οποία αναπτύχθηκε για τη χαρτογράφηση και παρακολούθηση των πλημμύρων σε διαφορετικές καλύψεις/χρήσεις γης, δασώδεις, αγροτικές και αστικές.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται τα τρία διαφορετικά επεισόδια πλημμύρας στα οποία εφαρμόστηκε η μέθοδος και τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν. Επιπλέον, αιτιολογείται η τροποποίηση της μεθόδου για το αστικό περιβάλλον.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της μεθόδου σε κάθε κάλυψη γης ξεχωριστά.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο γίνεται σχολιασμός και συζήτηση του θέματος που αναλύεται στην εργασία.

1. Θεωρητικό Υπόβαθρο

1.1 Η επιστήμη της Τηλεπισκόπησης

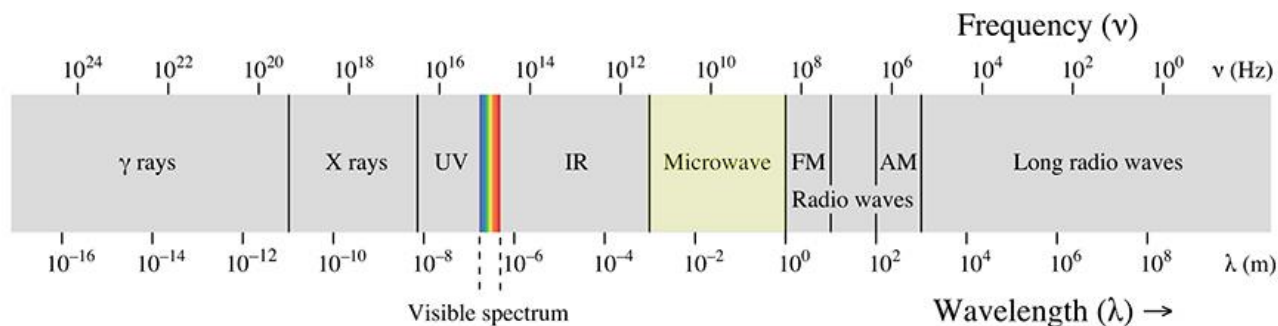
Με τον όρο τηλεπισκόπηση εννοείται η επιστήμη παρατήρησης αντικειμένων, φαινομένων και συμβάντων από απόσταση. Πιο συγκεκριμένα, είναι η επιστήμη και η τεχνολογία παρατήρησης και μελέτης των χαρακτηριστικών της γήινης επιφάνειας βάσει της αλληλεπίδρασης των υλικών που βρίσκονται πάνω σε αυτή με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. (Jensen, 2015)

Η γήινη επιφάνεια μελετάται με τη χρήση ψηφιακών σαρωτών οι οποίοι καταγράφουν την ανάκλαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας της γήινης επιφάνειας και την αποδίδουν ως ψηφιακή εικόνα. Στην τηλεπισκόπηση είναι δυνατή η χρήση αισθητήρων που καταγράφουν ακτινοβολία πέρα από το ορατό φάσμα, δηλαδή στο μέσο υπέρυθρο, στο εγγύς υπέρυθρο, στα μικροκύματα, στα ραδιοκύματα κτλ., με αποτέλεσμα να λαμβάνεται μια ποικιλία εικόνων.

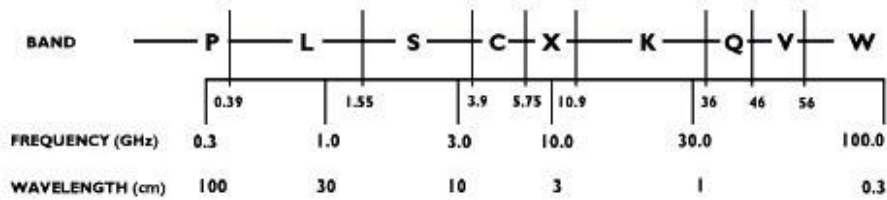
Η τηλεπισκόπηση χρησιμοποιείται από πολλούς επιστημονικούς τομείς όπως για τη χαρτογράφηση φυσικογεωγραφικών και ανθρωπογεωγραφικών φαινομένων, την παρακολούθηση της ατμόσφαιρας, το σχεδιασμό χρήσεων γης, για την μεταβολή της παγοκάλυψης του πλανήτη, τον εντοπισμό πετρελαιοκηλίδων, την παρακολούθηση πυρκαγιών, για τον υπολογισμό μεταβολών του ανάγλυφου μετά από σεισμό κ.α. (Jensen, 2015)

1.2 Μικροκυματική ακτινοβολία- Παθητικοί και Ενεργητικοί δέκτες

Ο κλάδος της Μικροκυματικής Τηλεπισκόπησης αφορά στη χρήση παθητικών ή ενεργητικών δεκτών οι οποίοι αναγνωρίζουν, ανιχνεύουν και παρακολουθούν αντικείμενα στην επιφάνεια της γης μέσω των οπτικών ιδιοτήτων τους στη μικροκυματική περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το μήκος κύματος των μικροκυμάτων εκτείνεται από $\lambda=3\text{mm}$ έως 1m και υποδιαιρείται στις περιοχές - κανάλια P,L,S,C,X,K,Q,V,W. (Καραθανάση, 2014)



Εικόνα 1: Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα - Πηγή: <https://gsp.humboldt.edu/>



Εικόνα 2: Μήκη κύματος και συχνότητες καναλιών - Πηγή: <https://earth.esa.int/>

Στην Εικόνα 1 απεικονίζονται οι περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και η θέση των μικροκυμάτων σε αυτό. Βρίσκεται μετά από την υπέρυθη ακτινοβολία και πριν τα ραδιοκύματα. Στην Εικόνα 2 φαίνεται η ταξινόμηση των καναλιών των μικροκυμάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω, στο φάσμα. Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα διπλωματική εργασία ήταν Sentinel 1, δηλαδή λήφθηκαν στη C μπάντα η οποία αντιστοιχεί σε μήκη κύματος 5.6 εκατοστά.

Οι δέκτες διακρίνονται σε παθητικούς και ενεργητικούς. Οι παθητικοί δέκτες είναι ραδιόμετρα τα οποία καταγράφουν την εκπεμπόμενη από τα σώματα μικροκυματική ακτινοβολία ή και την ανακλώμενη από τα αντικείμενα ηλιακή μικροκυματική ακτινοβολία. (Καραθανάση, 2014)

1.3 Ραντάρ και απεικονίσεις Συνθετικού Ανοίγματος Ραντάρ

Τα ραντάρ αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την ανίχνευση φαινομένων, την παρακολούθησή τους και την απεικόνιση αντικειμένων. Μεγάλο πλεονέκτημα χρήσης συστήματος ραντάρ αποτελεί η δυνατότητα που έχει στην ανίχνευση αντικειμένων από μεγάλες αποστάσεις, τις οποίες μετρά με μεγάλη ακρίβεια, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες και τις συνθήκες φωτισμού. Αποτελεί ένα σύστημα το οποίο εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς στα μικροκύματα και στη συνέχεια λαμβάνει την οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία από τα διάφορα αντικείμενα στα οποία αυτή προσπίπτει. Αυτό συμβαίνει μέσω της κεραίας εκπομπής και λήψης των παλμών. Με τη μέτρηση του χρόνου εκπομπής-επιστροφής του παλμού καθώς επίσης και της ισχύος του, είναι δυνατή η ταυτόχρονη μέτρηση της απόστασης στόχου-δέκτη και της ανακλώμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας από το στόχο.

Τα ραντάρ διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

1. Τα ραντάρ πραγματικού ανοίγματος
2. Τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (ΣΑΡ)

Η βασική διαφορά των δύο παραπάνω κατηγοριών είναι η χωρική διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση των αζιμουθίων.

Στα ραντάρ πραγματικού ανοίγματος η χωρική διακριτική ικανότητα εξαρτάται από το εύρος δέσμης της κεραίας. Για την επίτευξη ικανοποιητικής διακριτικής ικανότητας πχ. 1χλμ το μέγεθος της κεραίας που απαιτείται είναι περίπου 800μ., πράγμα που είναι πρακτικά αδύνατον.

Αντίθετα, στα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, επειδή γίνεται επεξεργασία του σήματος για σύνθεση εύρους δέσμης κεραίας μεγαλύτερου από αυτό που θα ήταν το πραγματικό, έχουν καλύτερη ακρίβεια κατά μήκος της γραμμής πτήσης, καθώς αυτή δεν εξαρτάται πλέον από το εύρος δέσμης που πραγματικά μπορεί να εκπέμψει η κεραία. Λειτουργούν συνήθως με μεγάλα μήκη κύματος και μικρού μήκους κεραία. (Καραθανάση, 2014)

1.4 Sentinel-1 Copernicus

Η αποστολή Sentinel-1 είναι η πρώτη από το πρόγραμμα Copernicus η οποία δημιουργήθηκε από την Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (European Space Agency). Αποτελείται από δύο δορυφόρους, τον Sentinel-1A και τον Sentinel-1B, οι οποίοι έχουν την ίδια τροχιά. Ο Sentinel-1A μπήκε σε τροχιά το 2014 ενώ ο Sentinel-1B βρίσκεται σε τροχιά από το 2016. Η συχνότητα με την οποία λαμβάνονται δεδομένα από κάθε δορυφόρο είναι 12 μέρες, ενώ διέρχονται από την ίδια περιοχή με διαφορά έξι ημερών. Εκπέμπουν παλμούς σε μικρά μήκη κύματος, δηλαδή στη C-band και προσφέρουν δεδομένα ανεξαρτήτως ώρας και καιρικών συνθηκών. Φωτίζουν πλάγια την επιφάνεια της γης, όχι κατακόρυφα. Τα δεδομένα τους χρησιμοποιούνται για παρακολούθηση του χερσαίου και υδάτινου περιβάλλοντος (λιώσιμο των πάγων, πετρελαιοκηλίδες, δασική παρακολούθηση) καθώς και για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης (πλημμύρες, κατολισθήσεις, ηφαιστεια, σεισμοί).

Τα επίπεδα επεξεργασίας Sentinel-1 δεδομένων είναι τρία. Το level 0, το level 1 και το level 2. Το level 0 περιλαμβάνει τα δεδομένα όπως είναι πριν υποστούν επεξεργασία. Στο Level 1 περιλαμβάνονται προϊόντα για τους περισσότερους χρήστες δεδομένων τα οποία είναι είτε σε μορφή SLC (Single Look Complex) είτε σε μορφή GRD (Ground Range Detected). Το Level 2 περιλαμβάνει δεδομένα για τους ωκεανούς και τις γεωφυσικές τους παραμέτρους, μετρά την ταχύτητα και την κατεύθυνση του αέρα 10 μέτρα πάνω από το έδαφος. Η βασική διαφορά μεταξύ των προϊόντων GRD (Ground Range Detected) και SLC (Single Look Complex) είναι το γεγονός ότι τα SLC προϊόντα περιλαμβάνουν και τις δύο πληροφορίες, αυτή του πλάτους και αυτή της φάσης, ενώ τα δεδομένα GRD διαθέτουν πληροφορίες μόνο για το πλάτος του κύματος, καθώς η πληροφορία της φάσης χάνεται. Η ανάλυση των GRD μπορεί να είναι full, high ή medium. (Sentinel 1 Data Products)

1.5 Απεικονίσεις ΣΑΡ και χαρτογράφηση πλημμυρών

Οι ΣΑΡ εικόνες είναι γνωστό ότι είναι ευαίσθητες στις αλλαγές που συμβαίνουν στη γήινη επιφάνεια και μπορούν να απεικονίσουν τις διαφορές οι οποίες προκύπτουν σε περιοχές του εδάφους εξαιτίας πολλών αλλαγών στην επιφάνεια της γης που λαμβάνουν χώρα ανά τις εποχές. Για παράδειγμα ανιχνεύονται οι αλλαγές στο έδαφος στις καλλιέργειες, όταν μαζεύεται η σοδιά, οι αλλαγές εξαιτίας σεισμών, εξαιτίας ηφαιστειακών εκρήξεων, τσουνάμι και πλημμυρών.

Η χρήση απεικονίσεων ΣΑΡ είναι πολύ διαδεδομένη για τη χαρτογράφηση πλημμυρών, καθώς η ανίχνευσή τους δεν εμποδίζεται από ενδεχόμενη νεφοκάλυψη της περιοχής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μικροκύματα διαπερνούν τα σύννεφα. Είναι γνωστό ότι η λεία επιφάνεια των στάσιμων νερών, όταν προσπίπτει επάνω της ακτινοβολία από το ραντάρ, λειτουργεί σαν κάτοπτρο ανακλώντας έτσι όλη την ακτινοβολία μακριά από το δέκτη. Έτσι, η επιφάνεια αυτή επιστρέφει

μικρότερη οπισθοσκέδαση στο δέκτη από ότι μια εδαφική επιφάνεια. Επομένως, είναι φανερή η παρουσία στάσιμων νερών και είναι αισθητή η διαφορά στις εικόνες στις οποίες το έδαφος είναι πλημμυρισμένο.

Όσον αφορά τις αστικές περιοχές, είναι γνωστό ότι τα αστικά κτίρια, τα αυτοκίνητα, οι γέφυρες και πολλά άλλα στοιχεία των αστικών δομών συμπεριφέρονται σαν διέδροι ανακλαστήρες, οι οποίοι ανακλούν μεγάλο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας πίσω στο δέκτη. Ως αποτέλεσμα, οι αστικές περιοχές στις απεικονίσεις ραντάρ έχουν φωτεινές φασματικές υπογραφές. Επομένως, για την ανίχνευση πλημμύρων σε αστικές περιοχές χρειάζονται συγκεκριμένες μέθοδοι, αφού δεν είναι ευδιάκριτες οι πλημμυρισμένες περιοχές είτε εξαιτίας του φαινομένου της διέδρης γωνίας είτε εξαιτίας χαμηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας.

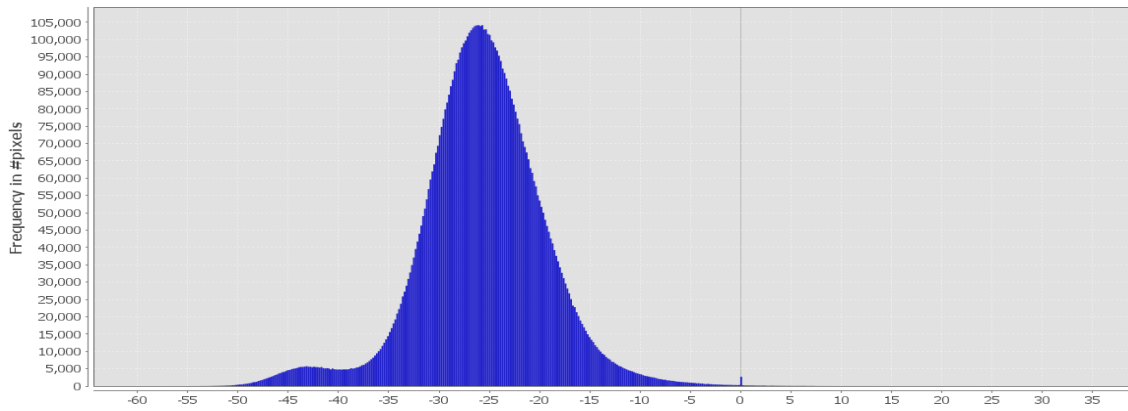
Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η χαρτογράφηση πλημμύρων με χρήση χρονοσειράς εικόνων Sentinel 1A και Sentinel 1B σε αστική περιοχή, σε αγροτική περιοχή με καλλιέργειες και στο φυσικό περιβάλλον.

1.6 Ιστόγραμμα δορυφορικών εικόνων

Η κάθε εικόνα χαρακτηρίζεται από το ιστόγραμμά της. Το ιστόγραμμα μιας εικόνας είναι ένα διάγραμμα το οποίο δείχνει τη συχνότητα με την οποία εμφανίζονται στην εικόνα εικονοστοιχεία με την κάθε τιμή. Το κάθε εικονοστοιχείο στις δορυφορικές εικόνες έχει μια τιμή η οποία εκφράζει το μέγεθος της οπισθοσκέδασης εκείνου του τμήματος της γήινης επιφάνειας που απεικονίζεται σε αυτό, η οποία επιστρέφει στο δορυφόρο. Ένα παράδειγμα ιστογράμματος μιας δορυφορικής εικόνας φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 3: Πηνειός πλημμύρα 28/02/2018



Εικόνα 4: Ιστογράμμο Εικόνας 3

Στο παραπάνω ιστόγραμμα φαίνεται στον κατακόρυφο άξονα ο αριθμός των εικονοστοιχείων και στον οριζόντιο άξονα βρίσκονται τα νούμερα με τις τιμές οπισθοσκέδασης. Η οπισθοσκέδαση είναι το ποσό της ακτινοβολίας που επιστρέφει στο δορυφόρο μετά την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε μια περιοχή του εδάφους.

Η Εικόνα 3 απεικονίζει τον Πηνειό ποταμό όταν πλημμύρισε το Φεβρουάριο του 2018. Ο ποταμός και οι πλημμυρισμένες εκτάσεις φαίνονται με σκούρο χρώμα.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3, κάθε στοιχείο της επιφάνειας του εδάφους έχει διαφορετική συμπεριφορά στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας πάνω του. Εδώ παρατηρείται το νερό να φαίνεται με σκούρα απόχρωση, ενώ η ξηρά απεικονίζεται με φωτεινότερους τόνους του γκρι.

Για να καθίσταται δυνατός ο διαχωρισμός των πλημμυρισμένων εκτάσεων νερού από την ξηρά με σκοπό τη χαρτογράφηση μιας πλημμύρας, η διαδικασία που μπορεί να ακολουθηθεί είναι μια δυαδική ταξινόμηση των εικονοστοιχείων που αντιστοιχούν στις δύο κατηγορίες που προαναφέρθηκαν, δηλαδή την ανίχνευση της κατηγορίας- του στόχου που είναι η πλημμύρα και της κατηγορίας της ξηράς.

Μια εύκολη διαδικασία με την οποία μπορεί να επιτευχθεί η ταξινόμηση στις δύο κατηγορίες που προαναφέρθηκαν είναι η εύρεση ενός κατωφλιού μέσω του ιστογράμματος, δηλαδή μιας τιμής η οποία θα χωρίζει τις δύο κλάσεις. Η τιμή αυτή είναι πολύ σημαντική για την κατηγοριοποίηση και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα. Αρκετοί είναι οι αλγόριθμοι οι οποίοι βρίσκουν το κατώφλι το οποίο θα διαχωρίζει τις δύο παραπάνω κατηγορίες. Ο αλγόριθμος ο οποίος επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία ήταν ο αλγόριθμος Otsu.

Το αποτέλεσμα της κατηγοριοποίησης είναι μια εικόνα με 0 και 1, με 0 απεικονίζεται η ξηρά και με 1 απεικονίζεται η πλημμυρισμένη περιοχή.

1.7 Η μέθοδος κατωφλίωσης Otsu

Η μέθοδος κατωφλίωσης Otsu (Otsu, 1979) αποτελεί μια μέθοδο μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης η οποία αφορά τις εικόνες με τόνους του γκρι. Με αυτή τη μέθοδο επιλέγεται αυτόματα ένα κατώφλι το οποίο διαχωρίζει σε κατηγορίες τα περιεχόμενα της κάθε εικόνας ανάλογα με τους τόνους του γκριζου που έχει το κάθε αντικείμενο στην απεικόνιση. Ο στόχος είναι να βρεθεί η τιμή η οποία θα διαχωρίσει το κάθε αντικείμενο σε σχέση με την υπόλοιπη εικόνα.

Ιδανικά, το ιστόγραμμα της εικόνας το οποίο χαρακτηρίζεται από δύο κορυφές έχει ανάμεσα στις κορυφές ένα χαμηλό σημείο το οποίο μπορεί να επιλεχθεί ευκολότερα ως κατώφλι για το διαχωρισμό του “στόχου” και του “background” της εικόνας. Όμως, στις περισσότερες εικόνες είναι δύσκολη η επιλογή μιας συγκεκριμένης τιμής ως κατώφλι καθώς το ιστόγραμμα της εικόνας μπορεί να περιλαμβάνει τα εικονοστοιχεία με θόρυβο, οι κορυφές του ιστογράμματος μπορεί να είναι κοντά η μια με την άλλη, με συνέπεια να μην είναι διακριτή η τιμή της κατωφλίωσης.

Η μέθοδος Otsu αφορά στην επιλογή κατωφλιού μόνο με την επεξεργασία του ιστογράμματος της εικόνας με γκρι αποχρώσεις, χωρίς να χρειάζεται να είναι γνωστό κάτι σχετικό με την εικόνα εκ των προτέρων. Είναι απαραίτητη τεχνική για επεξεργασία εικόνων και για τη μη επιβλεπόμενη αναγνώριση προτύπων στις εικόνες.

Η μέθοδος λειτουργεί ως εξής:

Αν υποθέσουμε ότι τα εικονοστοιχεία της εικόνας ανήκουν σε L επίπεδα των γκρι αποχρώσεων $[1,2,\dots,L]$. Ο αριθμός των pixels σε κάθε επίπεδο i συμβολίζεται με n_i και ο συνολικός αριθμός των εικονοστοιχείων της εικόνας είναι $N = n_1 + n_2 + \dots + n_L$. Για τη διευκόλυνση της διαδικασίας, το ιστόγραμμα της εικόνας είναι κανονικοποιημένο και αντιμετωπίζεται ως μια κατανομή πιθανότητας με $p_i = n_i/N$, $p_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^L p_i = 1$.

Αν χωριστούν τα εικονοστοιχεία σε δύο κατηγορίες C_0 και C_1 (αντικείμενα - «στόχοι» και background) με ένα κατώφλι k , η κλάση C_0 θα περιλαμβάνει εικονοστοιχεία από την τιμή 1 μέχρι την τιμή k $[1, \dots, k]$, ενώ η κλάση C_1 θα περιλαμβάνει τα εικονοστοιχεία $[k+1, \dots, L]$.

Έτσι, οι πιθανότητες να ανήκει ένα εικονοστοιχείο σε κάποια κατηγορία από τις δύο παραπάνω είναι:

$$\omega_0 = \Pr(C_0) = \sum_{i=1}^k p_i = \omega(k)$$

και

$$\omega_1 = \Pr(C_1) = \sum_{i=k+1}^L p_i = 1 - \omega(k)$$

Ενώ η μέση τιμή του επιπέδου της κάθε τάξης είναι:

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^k i \Pr(i|C_0) = \sum_{i=1}^k \frac{i p_i}{\omega_0} = \frac{\mu(k)}{\omega(k)}$$

και

$$\mu_1 = \sum_{i=k+1}^L i \Pr(i|C_1) = \sum_{i=k+1}^L \frac{ip_i}{\omega_1} = \frac{\mu_T - \mu(k)}{1 - \omega(k)}$$

όπου $\omega(k) = \sum_{i=1}^k p_i$ και $\mu(k) = \sum_{i=1}^k ip_i$ είναι τα ολοκληρώματα των ροπών μηδενικής και πρώτης τάξης του ιστογράμματος μέχρι το επίπεδο-κατώφλι k αντίστοιχα και η σχέση $\mu_T = \mu(L) = \sum_{i=1}^L ip_i$ αποτελεί το συνολικό μέσο επίπεδο της αρχικής εικόνας.

Επίσης ισχύει ότι $\omega_0 \mu_0 + \omega_1 \mu_1 = \mu_T$ και $\omega_0 + \omega_1 = 1$

Η μεταβλητότητες υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^k (i - \mu_0)^2 \Pr(i|C_0) = \sum_{i=1}^k (i - \mu_0)^2 p_i / \omega_0$$

και

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=k+1}^L (i - \mu_1)^2 \Pr(i|C_1) = \sum_{i=k+1}^L (i - \mu_1)^2 p_i / \omega_1$$

Για την αξιολόγηση του κατωφλίου k που έχει ορισθεί, ορίζονται και τα παρακάτω κριτήρια:

$$\lambda = \sigma_B^2 / \sigma_W^2, \quad \kappa = \sigma_T^2 / \sigma_W^2 \quad \text{και} \quad \eta = \sigma_B^2 / \sigma_T^2$$

$$\text{με } \sigma_W^2 = \omega_0 \sigma_0^2 + \omega_1 \sigma_1^2,$$

$$\sigma_B^2 = \omega_0 (\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu_T)^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 \quad \text{και} \quad \sigma_T^2 = \sum_{i=1}^L (i - \mu_T)^2 p_i$$

Όπου σ_W^2 είναι η μεταβλητότητα της μίας κατηγορίας, σ_B^2 είναι η μεταβλητότητα μεταξύ των δύο κατηγοριών και σ_T^2 είναι η συνολική μεταβλητότητα των δύο κατηγοριών.

Τότε πρέπει να βρεθεί το κατάλληλο κατώφλι k ώστε να μεγιστοποιηθεί κάποιο από τα λ , κ και η . Το ευκολότερο μέγεθος για να μεγιστοποιηθεί είναι το η , αφού το η εξαρτάται από το σ_B^2 το οποίο εξαρτάται από τους μέσους όρους μ και από τις πιθανότητες ω σε αντίθεση με το κ και το λ που εξαρτώνται από το σ_W^2 το οποίο σχετίζεται με τις μεταβλητότητες.

Επομένως ως κριτήριο για τη βέλτιστη κατωφλίωση είναι η μεγιστοποίηση του η και συνεπώς η μεγιστοποίηση του σ_B^2 .

$$\text{Από τις παραπάνω σχέσεις, καταλήγουμε ότι: } \sigma_B^2(k) = \frac{[\mu_T \omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k)[1 - \omega(k)]}.$$

Το βέλτιστο κατώφλι k^* υπολογίζεται από τη σχέση:

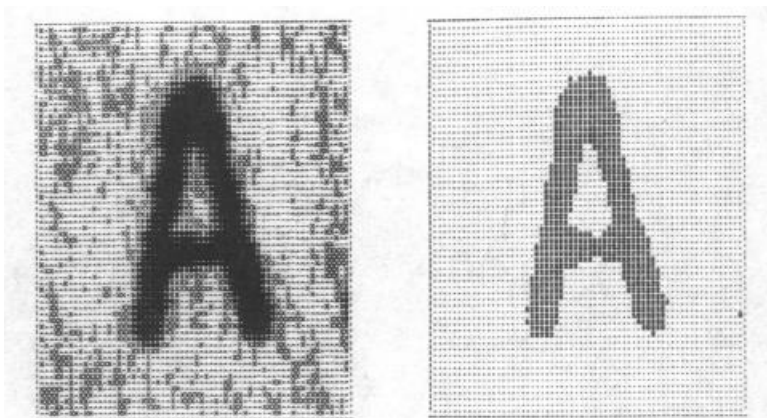
$$\sigma_B^2(k^*) = \max_{1 \leq k < L} \sigma_B^2(k).$$

Εξίσωση 1: Εύρεση βέλτιστου κατωφλίου k^* - Πηγή: Otsu, 1979

Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση εύρεσης δύο κατωφλίων k_1^* , k_2^* , χωρίζοντας τα εικονοστοιχεία της εικόνας σε επίπεδα που ανήκουν σε τρεις κλάσεις, C_0 , C_1 και C_2 . Σε αυτή την περίπτωση, τα βέλτιστα κατώφλια θα είναι ξανά τα μέγιστα της σ_B^2 .

$$\sigma_B^2(k_1^*, k_2^*) = \max_{1 \leq k_1 < k_2 < L} \sigma_B^2(k_1, k_2).$$

Εξίσωση 2: Εύρεση βέλτιστου κατωφλίου k_1^*, k_2^* - Πηγή: Otsu, 1979



Εικόνα 5: Παράδειγμα κατωφλίωσης. Αριστερά: Αρχική εικόνα με τόνους του γκριζου. Δεξιά: Αποτέλεσμα κατωφλίωσης με τη μέθοδο Otsu. - Πηγή: Otsu, 1979

Η μέθοδος Otsu έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- I. Είναι απλή διαδικασία
- II. Είναι δυνατή η κατωφλίωση σε περισσότερες από δύο κατηγορίες
- III. Το βέλτιστο κατώφλι επιλέγεται αυτόματα και δε βασίζεται στη διαφορά των κορυφών του ιστογράμματος αλλά στο ολοκλήρωμα όλου του ιστογράμματος.
- IV. Η μέθοδος αυτή είναι ευρεία και καλύπτει ένα μεγάλο φάσμα της διαδικασίας της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης.

2. Διεθνής Βιβλιογραφία

Καθίσταται μεγάλης σημασίας η αναφορά σε εργασίες που έχουν γίνει στη διεθνή βιβλιογραφία όσον αφορά το θέμα της εργασίας που μελετάται, δηλαδή τη χαρτογράφηση πλημμύρων με χρήση δεδομένων Sentinel 1.

2.1 Χαρτογράφηση πλημμύρας με χρήση πιθανοτήτων

2.1.1 Χαρτογράφηση πλημμύρας με χρήση μίας εικόνας SAR

Οι Giustarini, Hostache, Kavetski, Chini, Corato, Schlaffer και Matgen (2016) δημοσίευσαν μια εργασία με τίτλο “Probabilistic Flood Mapping Using Synthetic Aperture Radar Data”. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται η μέθοδος πιθανοτήτων του Bayes για την ανίχνευση πλημμυρισμένων εικονοστοιχείων σε εικόνες συνθετικού ανοίγματος με βάση την τιμή της οπισθοσκέδασης τους. Η διαδικασία αποτελείται από δύο βήματα. Αρχικά, προσδιορίζονται οι κατανομές των εικονοστοιχείων που θεωρούνται πλημμυρισμένα και οι κατανομές εικονοστοιχείων των οποίων η τιμή της οπισθοσκέδασης είναι μεγαλύτερη από το κατώφλι ώστε να θεωρούνται μη πλημμυρισμένα. Έπειτα, προσεγγίζεται η πιθανότητα ενός εικονοστοιχείου να είναι πλημμυρισμένο βάσει της τιμής οπισθοσκέδασης του.

Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων, έγινε σύγκριση ενός δυαδικού χάρτη που δημιουργήθηκε από αεροφωτογραφίες και εφαρμογή μοντέλων με το χάρτη πιθανοτήτων που προέκυψε από τη μέθοδο Bayes. Δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα εμπιστοσύνης για να συγκριθούν οι παραπάνω χάρτες, ως προς το πόσο πλησιάζουν τα αποτελέσματα μεταξύ τους. Ύστερα, υπολογίστηκε ο δείκτης εμπιστοσύνης των αποτελεσμάτων.

Το συμπέρασμα ήταν ότι οι χάρτες πιθανοφάνειας πλημμυρισμένων εκτάσεων μπορούν να προβλέψουν ποιες περιοχές είναι πιθανότερο να πλημμύρισαν μετά από βροχοπτώσεις, αλλά υπήρχαν παράλληλα και περιοχές οι οποίες πλημμύρισαν και δεν προέκυψαν από τον αλγόριθμο ως πλημμυρισμένες. Επιπλέον, εξαιτίας των φαινομένων σκίασης και αναδίπλωσης που συναντώνται στις SAR εικόνες, η μέθοδος αυτή μπορεί να μη λειτουργεί ορθά σε αστικές περιοχές, σε περιοχές με έντονες σκιάσεις και έντονο ανάγλυφο, αφού πολλά εικονοστοιχεία μπορεί να θεωρούνται λανθασμένα πλημμυρισμένα επειδή έχουν χαμηλή οπισθοσκέδαση, όπως οι υδάτινες περιοχές.

2.1.2 Χαρτογράφηση πλημμύρας με χρήση χρονοσειράς εικόνων SAR

Οι Schlaffer, Chini, Giustarini και Matgen (2017) δημοσίευσαν ένα άρθρο με τίτλο “ Probabilistic mapping of flood-induced backscatter changes in SAR time series” . Η μελέτη αυτή αφορά τη χρήση χρονοσειράς εικόνων radar για τη χαρτογράφηση πλημμύρας σε συνδυασμό με χρήση συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας. Χρησιμοποιήθηκαν 677 εικόνες SAR που καλύπτουν χρονικό διάστημα 10 ετών, με στόχο να διαχωριστούν οι σταθερές υδάτινες περιοχές από την ξηρά και να μην θεωρούνται πλημμυρισμένες περιοχές με έντονο ανάγλυφο και σκιάσεις. Κάποιες από τις εικόνες ήταν από διαφορετική τροχιά και διαφορετική κατεύθυνση (ανερχόμενη ή κατερχόμενη). Εφόσον οι γωνίες παρατήρησης διέφεραν, διορθώθηκαν ώστε να είναι ίδια η γωνία πρόσπτωσης θ σε όλες τις εικόνες.

Οι παράμετροι των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας εκτιμήθηκαν αναλύοντας τη χρονοσειρά των εικόνων. Όσον αφορά τις παραμέτρους που σχετίζονται με τα μη πλημμυρισμένα εικονοστοιχεία, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας υπολογίστηκε ξεχωριστά για κάθε pixel, έτσι ώστε να καθίσταται γνωστή η κατάσταση του εδάφους σε συνθήκες εκτός πλημμύρας. Σχετικά με τις περιοχές με νερό, έγινε η υπόθεση ότι ακολουθούν την κανονική κατανομή με τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση υπολογισμένες από τις παρατηρήσεις των εικόνων. Επίσης τα εικονοστοιχεία τα οποία θεωρούνταν «ανάμεικτα» δηλαδή άλλες φορές είχαν νερό και τις άλλες όχι, δε συμπεριλήφθηκαν στους υπολογισμούς.

Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων του χάρτη πιθανοφάνειας χρησιμοποιήθηκαν αεροφωτογραφίες υψηλής χωρικής ανάλυσης με διάγραμμα εμπιστοσύνης.

Τα συμπεράσματα που βγήκαν μετά από τη συγκεκριμένη μελέτη ήταν ότι υπήρξε μια υποτίμηση της πλημμυρισμένης έκτασης, η οποία μπορεί να οφείλεται στις σκιάσεις του ραντάρ γύρω από την πλημμυρισμένη έκταση. Τα αποτελέσματα έδειξαν τη σημασία της γωνίας πρόσπτωσης του ραντάρ για το διαχωρισμό μεταξύ πλημμυρισμένων και μη πλημμυρισμένων εκτάσεων καθώς ότι η κατοπτρική ανάκλαση του ραντάρ στις επιφάνειες του νερού αυξάνεται με μία πιο πλάγια γωνία πρόσπτωσης.

2.1.3 Χαρτογράφηση πλημμύρας με συνδυασμό εικόνων ραντάρ και οπτικών δεδομένων

Οι D' Addabbo, Refice, Pasquariello, Lovergine και Manfreda (2016) δημοσίευσαν την εργασία με τίτλο "Following Flood Dynamics by SAR/Optical Data Fusion" στην οποία αναλύεται ένα επεισόδιο πλημμύρας που συνέβη έπειτα από μια έντονη βροχόπτωση στην περιοχή μελέτης η οποία διήρκησε μία εβδομάδα.

Για τη μελέτη του φαινομένου που προέκυψε, χρησιμοποιήθηκαν τρεις σειρές από εικόνες συνθετικού ανοίγματος ραντάρ με μέγεθος εδαφοψηφίδας 3 x 3 τ.μ. , οι οποίες είχαν ίδια γεωμετρία, πόλωση, και γωνία θέασης ώστε να διευκολυνθεί η επεξεργασία των δεδομένων και για την ευκολότερη εξαγωγή αποτελεσμάτων. Χρησιμοποιήθηκε μία εικόνα πριν το γεγονός, μία κατά την περίοδο την οποία το φαινόμενο ήταν πιο έντονο και μία κατά την περίοδο στην οποία η πλημμύρα υποχωρεί. Υπολογίστηκε και η εικόνα συνάφειας που αποδίδει την ποιότητα της συμβολομετρικής φάσης (coherence) μεταξύ της εικόνας του φαινομένου και της εικόνας στην οποία αυτό υποχωρεί.

Για την καλύτερη ανίχνευση της πλημμύρας, χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον 7 απεικονίσεις ΣΑΡ της περιοχής μελέτης προ του φαινομένου της πλημμύρας. Επίσης, υπολογίστηκε η συνάφεια μεταξύ δύο ζευγαριών εικόνων από τις 7 εικόνες πριν την πλημμύρα με σκοπό τη σύγκριση της συνάφειας πριν και κατά τη διάρκεια του φαινομένου της πλημμύρας.

Επιπλέον, για την ανίχνευση περιοχών με νερό χρησιμοποιήθηκε μια οπτική εικόνα με χωρική ανάλυση 2 μέτρα. Σε αυτή εφαρμόστηκε ο δείκτης NDVI αφού η εικόνα είχε 4 φασματικά κανάλια και ανιχνεύθηκαν οι περιοχές με νερό και οι περιοχές με βλάστηση πριν την πλημμύρα. Για τον καλύτερο συνδυασμό των πληροφοριών που εξήχθησαν από τη χρήση οπτικών εικόνων, ΣΑΡ εικόνων και των εικόνων που προέκυψαν από τη συνάφεια φάσης χρησιμοποιήθηκαν σχέσεις πιθανοφάνειας του Bayes, έτσι ώστε να χαρακτηριστούν τα εικονοστοιχεία ως πλημμυρισμένα ή ως μη πλημμυρισμένα.

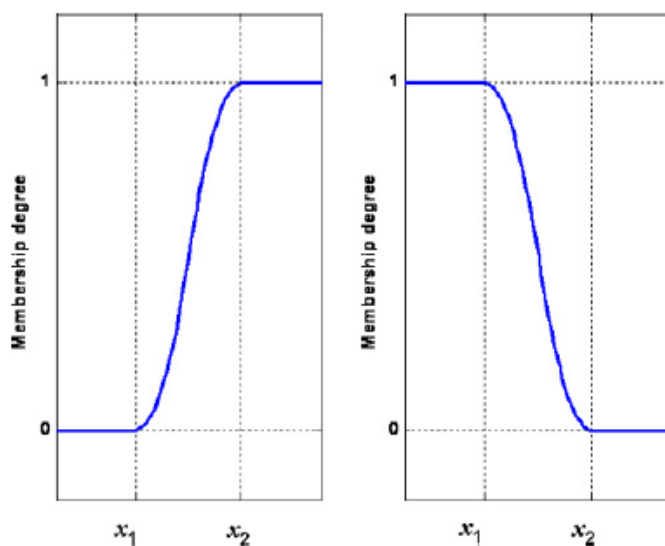
2.2 Χαρτογράφηση πλημμύρας χωρίς τη χρήση πιθανοτήτων

2.2.1 Χαρτογράφηση πλημμύρας με fuzzy logic

Οι Pulvirenti, Pierdicca, Chini και Guerriero (2011) δημοσίευσαν το άρθρο με τίτλο “An algorithm for operational flood mapping from Synthetic Aperture Radar (SAR) data using fuzzy logic”. Εδώ, μελετάται η χαρτογράφηση πλημμύρας που έγινε στην Αλβανία τον Ιανουάριο του 2010, με χρήση δεδομένων υψηλής ανάλυσης ΣΑΡ COSMO-SkyMed στη μπάντα Χ.

Η συγκεκριμένη μελέτη αφορά στη χαρτογράφηση πλημμύρας με ΣΑΡ εικόνες χρησιμοποιώντας τη λογική “fuzzy”, δηλαδή σε τι βαθμό συμμετέχει ένα εικονοστοιχείο στην πλημμύρα, και όχι αν απλώς συμμετέχει ή όχι. Ενώ συνήθως ένα στοιχείο ανήκει ή όχι στην πλημμύρα, με τη λογική fuzzy προσδιορίζεται κατά πόσο ανήκει σε αυτή σε βαθμό μεταξύ των 0 και 1.

Για την επίτευξη του στόχου αυτού, χρησιμοποιήθηκαν οι τυπικές συναρτήσεις S και Z , όπως φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 6: Δεξιά η σιγμοειδής συνάρτηση S και αριστερά η συνάρτηση Z . - Πηγή: Pulvirenti et al.:An algorithm for operational flood mapping from SAR.

Οι παράμετροι χ_1 και χ_2 είναι τα κατώφλια με βάση τα οποία έγινε η ταξινόμηση των στοιχείων των εικόνων. Για τον καθορισμό των κατωφλίων χ_1 και χ_2 χρησιμοποιήθηκαν τρία μοντέλα οπισθοσκέδασης που είχαν αναπτυχθεί σε άλλες μελέτες έτσι ώστε να προσομοιωθούν τα μεγέθη οπισθοσκέδασης των αγροτικών και των δασικών περιοχών αλλά και των αστικών περιοχών. Πιο αναλυτικά, τα μοντέλα αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές μπάντες, πολώσεις (οριζόντια και κάθετη) και γωνίες πρόσπτωσης (25° , 35° για την L και τη C μπάντα και 25° , 35° , 45° , 55° για τη X μπάντα). Οι ιδιότητες οπισθοσκέδασης έχουν βασισθεί στη συχνότερη βλάστηση και στα είδη φυτών που κυριαρχούν στο Μεσογειακό περιβάλλον.

Τα κατώφλια έχουν οριστεί για συγκεκριμένες γωνίες πρόσπτωσης. Αν η γωνία πρόσπτωσης μιας εικόνας είναι διαφορετική, τότε πρέπει να γίνεται παρεμβολή για τον υπολογισμό των νέων κατωφλίων. Έπειτα, απαιτούνται επιπλέον δεδομένα: η εικόνα για παρατήρηση της πλημμυρισμένης περιοχής, ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους και ένα μοντέλο το οποίο επίσης διαχωρίζει τις επιφάνειες στις οποίες υπάρχει νερό (LCM).

Γίνεται η επιλογή της εικόνας με την περιοχή ενδιαφέροντος και αφού αυτή επιλεγεί, το πρόγραμμα παρουσιάζει τα στατιστικά στοιχεία, δηλαδή τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της οπισθοσκέδασης στην περιοχή ενδιαφέροντος για όλες τις διαθέσιμες εικόνες ΣΑΡ. Τέλος, ανάλογα με τα αποτελέσματα των στατιστικών ο χειριστής μπορεί να αναβαθμίσει τα κατώφλια.

Εφαρμόζεται η συνάρτηση Z πρώτα στην πρώτη εικόνα για τον υπολογισμό του βαθμού συμμετοχής των εικονοστοιχείων τα οποία ανήκουν στις περιοχές μικρής οπισθοσκέδασης. Αν η οπισθοσκέδαση $\sigma_0 < \chi_1$ τότε ο βαθμός συμμετοχής στα πλημμυρισμένα εικονοστοιχεία είναι 1, ενώ αν $\sigma_0 > \chi_2$, τότε ο βαθμός συμμετοχής τους είναι μηδενικός (όπου σ_0 σε Decibels). Σχετικά με τις περιοχές στις οποίες υπάρχει το φαινόμενο της διεδρής γωνίας, εφαρμόζεται τρεις φορές η συνάρτηση S από εικονοστοιχείο σε εικονοστοιχείο.

Χρησιμοποιώντας το DEM υπολογίζονται τα όρια των πλημμυρισμένων περιοχών με βάση το υψόμετρο και την απόσταση των εικονοστοιχείων από την υδάτινη περιοχή.

Συμπερασματικά, η μέθοδος αυτή επιτρέπει στο χρήστη είτε να παράξει γρήγορα έναν χάρτη ταξινόμησης, είτε να παράξει έναν πιο ακριβή χάρτη πλημμύρας πιο χρονοβόρα. Επιπλέον, είναι μια μέθοδος η οποία παρέχει τη δυνατότητα όχι μόνο να ανιχνευτούν οι ανοιχτές υδάτινες επιφάνειες, αλλά και οι δασικές και αγροτικές πλημμυρισμένες περιοχές, κάτι που γενικά θεωρείται αρκετά δύσκολο και απαιτεί αρκετή επίβλεψη και αρκετό χρόνο από το χρήστη.

2.2.2 Χαρτογράφηση πλημμύρας με κατωφλίωση

Οι Chini, Hostache, Giustarini και Matgen (2017) δημοσίευσαν μία μελέτη με τίτλο “A Hierarchical Split-Based Approach for Parametric Thresholding of SAR Images: Flood Inundation as a Test Case”. Στη μελέτη αυτή συστήνεται μία μέθοδος διαχωρισμού της κλάσης- στόχου που επιθυμείται να αναδειχθεί και της κλάσης υποβάθρου (background) με χρήση ενός κατωφλιού το οποίο προέρχεται από το ιστόγραμμα της εικόνας.

Ο προσδιορισμός του κατωφλιού δεν είναι εύκολη υπόθεση, αφού συνήθως η κλάση- στόχος προς ανάδειξη καταλαμβάνει ένα πολύ μικρό μέρος των εικονοστοιχείων της εικόνας. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται σε αυτή την μελέτη χρησιμοποιεί παράθυρα μεταβλητού μεγέθους πάνω στην εικόνα με στόχο τη διαφοροποίηση των δύο κλάσεων.

Στόχος είναι να ανιχνευθούν οι αλλαγές πάνω στις εικόνες οι οποίες προκαλούνται εξαιτίας των πλημμύρων. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από εικόνες ΣΑΡ και το φαινόμενο που μελετήθηκε ήταν μια πλημμύρα του ποταμού Severn στο Ηνωμένο Βασίλειο το 2007.

Ο στόχος είναι με τις εικόνες ΣΑΡ να προσδιοριστούν οι περιοχές στις οποίες συνέβησαν αλλαγές και αυτές στις οποίες δεν υπήρξαν αλλαγές εξαιτίας της πλημμύρας.

Με σκοπό να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της πολύ μικρής ποσότητας εικονοστοιχείων που ανήκουν στην κλάση- στόχο σχετικά με το μέγεθος της εικόνας, προτάθηκε μια μέθοδος ώστε να επιλεχθούν περιοχές στις οποίες οι δύο κλάσεις (στόχος και υπόβαθρο) είναι ισορροπημένες. Η μέθοδος HSBA (hierarchical split-based approach) αποτελείται από δύο βήματα. Το πρώτο είναι η διαχωρισμός της αρχικής εικόνας σε μικρότερες υπο-περιοχές διαφορετικού μεγέθους μεταξύ τους. Το δεύτερο βήμα είναι η επιλογή των παραθύρων της εικόνας στην οποία οι κλάσεις είναι ισορροπημένες έτσι ώστε να είναι δυνατή η επιλογή κατωφλιού. Για παράδειγμα, στην αρχή γίνεται διαχωρισμός της εικόνας σε τέσσερα ίσα μέρη, μετά σε 16 ίσα μέρη κ.ο.κ. Το μικρότερο μέγεθος παραθύρου καθορίζεται από το ελάχιστο μέγεθος στο οποίο είναι εφικτό να υπάρχουν στατιστικά στοιχεία που μπορούν να αξιοποιηθούν.

Το αποτέλεσμα της μεθόδου ενσωματώνεται σε έναν ήδη υπάρχων αλγόριθμο χαρτογράφησης πλημμύρας όπως ο Region Growing και ο αλγόριθμος Change Detection ο οποίος ανιχνεύει τις αλλαγές στην εικόνα.

3. Μέθοδος και επεξεργασία δεδομένων

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η μέθοδος που αναπτύχθηκε για τη χαρτογράφηση των πλημμύρων σε τρεις διαφορετικές καλύψεις εδάφους: σε φυσικό περιβάλλον, σε αγροτικές περιοχές-καλλιέργειες και στο αστικό περιβάλλον. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με τη βοήθεια του QGIS και του λογισμικού SNAP.

Η μέθοδος συνοψίζεται με τα παρακάτω βήματα:

1. Επιλογή πλημμυρικών γεγονότων
2. Επιλογή των εικόνων Sentinel 1 που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε περιοχή μελέτης
3. Προεπεξεργασία των εικόνων Sentinel 1
4. Αφαιρέσεις των εικόνων μεταξύ τους δύο φορές, με και χωρίς την συμμετοχή της εικόνας της πλημμύρας αντίστοιχα
5. Υπολογισμός δύο εικόνων μέσου όρου των δύο συνόλων διαφορών εικόνων του προηγούμενου βήματος
6. Διαφορά εικόνων μέσου όρου
7. Κατωφλίωση της εικόνας της διαφοράς των μέσων όρων με την κατάλληλη τιμή
8. Φιλτράρισμα με κατάλληλες μάσκες και κριτήρια
9. Εκτέλεση αλγορίθμου Otsu για βελτιστοποίηση του αποτελέσματος και για τη δημιουργία χάρτη πιθανότητας πλημμύρας

Τα παραπάνω βήματα επεξηγούνται παρακάτω πιο αναλυτικά.

3.1 Επιλογή πλημμυρικών επεισοδίων

Το πρώτο βήμα ήταν η έρευνα πλημμυρικών επεισοδίων τα οποία συμβαίνουν στον πλανήτη και η επιλογή τριών από αυτά με βάση την τοποθεσία και τις καλύψεις/χρήσεις γης σε αυτήν. Γι' αυτό το λόγο επιλέχθηκαν τρεις διαφορετικές συνθήκες κάλυψης/χρήσης γης για τη μελέτη της παραπάνω μεθοδολογίας σε αυτές. Ο στόχος ήταν η αξιολόγηση της μεθόδου για διαφορετικές καλύψεις/χρήσεις γης.

Επιλέχθηκαν τρεις διαφορετικές περιοχές με διαφορετικές καλύψεις/χρήσεις γης. Αυτές ήταν:

- i. Η λίμνη Bjornann στη Νορβηγία, κοντά στην πόλη Κράγκερο
- ii. Ο Πηνειός ποταμός στην Ελλάδα, στην περιφέρεια Θεσσαλίας
- iii. Η πόλη της Βενετίας στην Ιταλία

Οι περιοχές αυτές πλημμύρισαν εξαιτίας έντονων βροχοπτώσεων που έγιναν κατά τους χειμερινούς μήνες, το 2017, το 2018 και το 2019 αντίστοιχα.

3.2 Επιλογή των εικόνων

Το δεύτερο βήμα της διαδικασίας ήταν η επιλογή των εικόνων που θα χρησιμοποιούνταν σε κάθε περίπτωση.

Για τη μελέτη αυτή, για τις τρεις διαφορετικές καλύψεις/χρήσεις της γήινης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν εικόνες του δορυφόρου Sentinel 1, αφού όπως περιγράφεται και στα Κεφάλαια 1 και 2 είναι κατάλληλες για τον εντοπισμό των αλλαγών που συμβαίνουν στην επιφάνεια της γης ανεξάρτητα καιρικών συνθηκών, ώρας κτλ. και με επιτυχία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη χαρτογράφηση πλημμυρικών συμβάντων. Οι εικόνες ήταν όλες σε μορφή GRD δηλαδή Ground Range Detected με διαστάσεις εικονοστοιχείου 10x10 μέτρα. Οι εικόνες ελήφθησαν από το λογισμικό Open Access Hub του Copernicus και για κάθε περιοχή μελέτης λήφθηκαν εικόνες οι οποίες περιλαμβάνουν την εκάστοτε περιοχή ενδιαφέροντος.

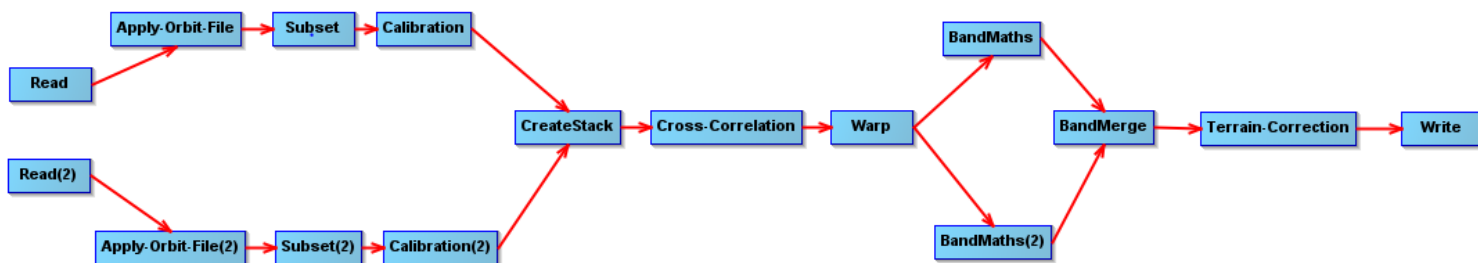
Χρησιμοποιήθηκε χρονοσειρά εικόνων, η οποία αποτελείται από την πρώτη διαθέσιμη εικόνα αμέσως μετά το πλημμυρικό επεισόδιο και εικόνες από προηγούμενες ημερομηνίες στις οποίες όμως δεν είχε βροχερές καιρικές συνθήκες. Η χρονική περίοδος που καλύπτουν οι εικόνες πριν την πλημμύρα δεν είναι συγκεκριμένη αλλά πρέπει να εξασφαλίζει 6-7 εικόνες στις οποίες μπορούν να παρατηρηθούν οι περιοχές μελέτης με σχετικά σταθερό μηχανισμό οπισθοσκέδασης. Για τη μελέτη της εξέλιξης της πλημμύρας χρησιμοποιήθηκαν λίγες εικόνες μετά την ημερομηνία της πλημμύρας οι οποίες αντικαθιστούσαν στη χρονοσειρά την εικόνα της πλημμύρας, κάθε φορά που εφαρμόζοταν η μέθοδος για την παρακολούθηση του συμβάντος.

Η επιλογή των εικόνων που θα συμμετέχουν στη μέθοδο για την εξαγωγή αποτελεσμάτων κρίθηκε από τα παρακάτω κριτήρια:

- I. Έπρεπε όλες οι εικόνες οι οποίες θα χρησιμοποιούνταν σε κάθε περιοχή να είναι στην ίδια τροχιά, έτσι ώστε να έχουν την ίδια γεωμετρία και να είναι εφικτή η σύγκριση μεταξύ τους.
- II. Από τις συνθήκες βροχόπτωσης. Λήφθηκαν τα δεδομένα βροχόπτωσης μέσω της ιστοσελίδας <https://www.worldweatheronline.com/> για τις περιοχές μελέτης εκτός Ελλάδος και της ιστοσελίδας <http://meteosearch.meteo.gr/> για την περιοχή μελέτης εντός του Ελλαδικού χώρου και έγινε ένα διάγραμμα βροχοπτώσεων στο χρόνο για μερικές εβδομάδες πριν και μερικές μέρες μετά την πλημμύρα. Κάθε τιμή του εκάστοτε διαγράμματος αφορά τα χιλιοστά βροχής που είχαν πέσει συνολικά στο διάστημα 3 ημερών πριν την ημερομηνία που λήφθηκε κάθε εικόνα.

3.3 Προεπεξεργασία εικόνων Sentinel-1

Η προεπεξεργασία των Sentinel-1 εικόνων έγινε μέσω του προγράμματος SNAP (Sentinel Application Platform). Εκεί δημιουργήθηκε ένα γράφημα το οποίο εφαρμόστηκε σε όλες τις εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση των πλημμυρισμένων εκτάσεων. Το γράφημα αυτό περιλάμβανε τα βήματα των οποίων κρίθηκε απαραίτητη η εφαρμογή για την επεξεργασία των εικόνων. Σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα, η προεπεξεργασία έγινε ανά ζεύγη εικόνων. Η πρώτη εικόνα ήταν πάντα η ίδια εικόνα επειδή έπρεπε να ευθυγραμμιστούν όλες οι εικόνες σε μία.



Εικόνα 7: Γράφημα επεξεργασίας εικόνων SAR στο λογισμικό SNAP

Read: Πρώτα πραγματοποιείται το διάβασμα των εικόνων.

Apply Orbit File: Στη συνέχεια, με αυτό το βήμα υπολογίζονται ακριβέστερα τα στοιχεία της τροχιάς του δορυφόρου και για τις δύο εικόνες που χρησιμοποιούνται. Με αυτό τον τρόπο γίνονται γνωστές οι συντεταγμένες των εικόνων με μεγαλύτερη ακρίβεια, διευκολύνεται η γεωαναφορά, καθώς αποκτώνται και μερικά ακόμα στοιχεία της τροχιάς του δορυφόρου για καλύτερη επεξεργασία στα μετέπειτα στάδια.

Subset: Το κόψιμο των εικόνων πραγματοποιείται για τη διαχείριση μικρότερων σε όγκο δεδομένων, για τη διευκόλυνση των υπολογισμών αλλά και για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Radiometric Calibration: Η ραδιομετρική διόρθωση καθιστά δυνατή τη χρήση των εικόνων για επεξεργασία των αριθμητικών - ποσοτικών στοιχείων που περιέχουν οι εικόνες SAR. Με αυτή τη διαδικασία είναι εφικτή η σύγκριση των εικόνων μεταξύ τους όταν αυτές έχουν ληφθεί από διαφορετικό αισθητήρα, ή όταν έχουν μεν ληφθεί από τον ίδιο αισθητήρα αλλά σε διαφορετική χρονική στιγμή και έχουν επεξεργαστεί διαφορετικά για να γίνουν level 1 εικόνες.

Τα επόμενα τρία βήματα συμπεριλαμβάνονται στη διαδικασία η οποία ονομάζεται coregistration. Το coregistration είναι ένα βήμα κατά το οποίο επιλέγεται μία εικόνα ως “master” δηλαδή ως κύρια, ενώ οι υπόλοιπες εικόνες (μία ή περισσότερες) καθίστανται “slave” δηλαδή δευτερεύουσες. Οι εικόνες που συμμετέχουν στη διαδικασία πρέπει να απεικονίζουν την ίδια περιοχή. Οι δευτερεύουσες εικόνες ευθυγραμμίζονται πάνω στην κύρια εικόνα και είναι απαραίτητη διαδικασία για την επεξεργασία που ακολουθεί αν ο στόχος είναι η σύγκριση των εικόνων, οι πράξεις μεταξύ τους, η δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους κτλ. Αποτελείται από τα βήματα create stack, cross- correlation και warp τα οποία περιγράφονται παρακάτω.

Create Stack: Σε αυτό το βήμα δημιουργείται μια “στοίβα” στην οποία περιέχεται η δευτερεύουσα εικόνα και η κύρια εικόνα που έχει ορισθεί. Η δευτερεύουσα εικόνα παίρνει τα γεωγραφικά στοιχεία της κύριας εικόνας.

Cross-correlation: Αποτελεί το βασικότερο βήμα της διαδικασίας του coregistration καθώς ευθυγραμμίζει τη δευτερεύουσα εικόνα με την κύρια εικόνα με τρόπο που κάθε εικονοστοιχείο της δευτερεύουσας εικόνας να απεικονίζει την ίδια περιοχή της επιφάνειας της γης με αυτή του εικονοστοιχείου που απεικονίζεται στην κύρια εικόνα. Η διαδικασία πραγματοποιείται με τη χρήση σημείων σταθερών και γνωστών συντεταγμένων Ground Control Points (GCP) τα οποία βρίσκονται στην “κύρια” εικόνα και των οποίων η θέση προσδιορίζεται και στις υπόλοιπες εικόνες του stack.

Warp: Σε αυτό το στάδιο τα ζεύγη των σταθερών και γνωστών συντεταγμένων χρησιμοποιούνται για την δημιουργία μιας συνάρτησης η οποία παράγει ένα χάρτη μεταξύ των εικονοστοιχείων της κύριας και της δευτερεύουσας εικόνας. Μετά την παραγωγή της συνάρτησης η οποία δηλώνει πόσο πρέπει να μετατοπιστεί κάθε δευτερεύουσα εικόνα για να ευθυγραμμιστεί με την κύρια, προκύπτει το τελικό αποτέλεσμα, στο οποίο όλες οι εικόνες είναι ευθυγραμμισμένες σωστά.

Band Maths: Με αυτό το εργαλείο πραγματοποιούνται πράξεις μεταξύ των καναλιών της κάθε εικόνας.

Band Merge: Εδώ τα αποτελέσματα των πράξεων εισάγονται σε ένα αρχείο και έτσι παρουσιάζονται ως 2 μπάντες (κανάλια) μιας απεικόνισης.

Terrain Correction: Σε αυτό το βήμα πραγματοποιείται η γεωαναφορά του τελικού προϊόντος.

Write: Αποθηκεύεται το τελικό προϊόν σε κατάλληλη μορφή.

Σύμφωνα με τα παραπάνω βήματα, στην αρχή το πρόγραμμα διάβαζε δύο εικόνες. Η πρώτη εικόνα ήταν πάντα η ίδια εικόνα επειδή έπρεπε να ευθυγραμμιστούν όλες οι εικόνες σε μία.(Read)

Έπειτα προχωρούσε στην εφαρμογή των στοιχείων της τροχιάς στις εικόνες, στο κόψιμο των εικόνων και στη ραδιομετρική διόρθωση κάθε εικόνας ξεχωριστά. (Apply orbit file, subset, calibration)

Για τη δημιουργία του stack για να γίνει η διαδικασία του coregistration όπως περιγράφηκε παραπάνω, κάθε φορά οριζόταν ως κύρια εικόνα η εικόνα που συμμετείχε σε όλες τις επεξεργασίες και όλες οι εικόνες ευθυγραμμίστηκαν σύμφωνα με τη συγκεκριμένη. Έτσι, δημιουργήθηκαν ζεύγη εικόνων. (Coregistration)

Μετά από τα παραπάνω βήματα, το κάθε αρχείο περιείχε δύο εικόνες, και η κάθε εικόνα περιείχε 2 μπάντες, την Amplitude VV και την Amplitude VH. Για να τονιστούν τα σημεία με υψηλή οπισθοσκέδαση και για να αυξηθεί η αντίθεση στις εικόνες, έγινε πολλαπλασιασμός των δύο πολώσεων VV, VH και με τη λογαριθμική πράξη $10 \cdot \log_{10}(VV \cdot VH)$ τα μεγέθη οπισθοσκέδασης μετατράπηκαν σε decibels . (Band Maths)

Έτσι προέκυψαν δύο νέες εικόνες που περιείχαν τους πολλαπλασιασμούς των πολώσεων των εικόνων του αρχείου. Έπειτα πραγματοποιήθηκε η εγγραφή των αποτελεσμάτων των δύο πολλαπλασιασμών στο ίδιο αρχείο. (Band Merge)

Τέλος έγινε η γεωαναφορά του προϊόντος και η εγγραφή του σε ένα αρχείο geotiff. (Terrain correction και Write)

Από την προεπεξεργασία των εικόνων, προέκυψαν οι εικόνες τις οποίες θα επεξεργαστούμε με σκοπό την χαρτογράφηση της πλημμύρας.

3.4 Αφαιρέσεις εικόνων με χρονολογική σειρά

Στόχος αυτού του βήματος είναι η ανάδειξη της συμπεριφοράς των εικονοστοιχείων των εικόνων στο χρόνο.

Η συμπεριφορά των εικονοστοιχείων στο χρόνο αλλάζει ακόμα και χωρίς να έχει υπάρξει κάποια πλημμύρα ή κάποια καταστροφή λόγω φυσικού ή ανθρωπογενούς παράγοντα. Στη γήινη επιφάνεια αλλάζουν πολλά πράγματα στο χρόνο, όπως η διάταξη των φύλλων γιατί έχουμε διαφορετικής έντασης άνεμο, οι εμφανίσεις των αναπτυσσόμενων καλλιεργειών, η κάλυψη των δρόμων από αυτοκίνητα ου κυκλοφορούν, κλπ.. Οι αστικές περιοχές, οι αγροτικές περιοχές και τα φυσικά τοπία παρουσιάζουν αλλαγές στο χρόνο οι οποίες κατοπτρίζονται στις τιμές της οπισθοσκέδασης. Στις πόλεις κυρίως, οι αλλαγές είναι πολλές και διαφορετικής χωρικής κλίμακας και έντασης επειδή εκεί υπάρχει ο ανθρώπινος παράγοντας που αλλάζει διαρκώς το αστικό περιβάλλον (νέα κτήρια, αλλαγές σε χώρους αστικού πρασίνου, αλλαγές λόγω συντήρησης κτηρίων, πεζοδρομήσεις, κυκλοφοριακές ρυθμίσεις, κλπ.). Αυτές οι αλλαγές όπως και το πυκνό αστικό τοπίο είναι δύσκολο να αποτυπωθούν αξιόπιστα εάν η χωρική ανάλυση του δέκτη δεν το επιτρέπει. Οι δασώδεις και αγροτικές περιοχές που διαπερνώνται από ποταμούς και λίμνες υφίστανται συχνά αλλαγές λόγω καιρικών μεταβολών και αλλαγών της βλάστησης αλλά η χωρική κλίμακα των αλλαγών αυτών είναι μεγαλύτερη και επομένως αποτυπώνεται ευκολότερα σε εικόνες ΣΑΡ δεκάμετρου εικονοστοιχείου.

Για την ανίχνευση αυτών των αλλαγών που συμβαίνουν χωρίς να πλημμυρίζει η περιοχή ή γενικότερα χωρίς να υφίσταται μια φυσική καταστροφή, μετά την παραπάνω επεξεργασία των εικόνων, έγιναν αφαιρέσεις της κάθε εικόνας **εκτός από την εικόνα της πλημμύρας** με όλες τις προηγούμενες χρονικά.

Έπειτα, για την ανίχνευση των αλλαγών που προέκυψαν στην περιοχή μελέτης εξαιτίας της πλημμύρας, πραγματοποιήθηκαν αφαιρέσεις των επεξεργασμένων εικόνων, αυτή τη φορά όμως **μεταξύ της εικόνας της πλημμύρας με όλες τις προηγούμενες εικόνες χρονικά**.

Στους παρακάτω πίνακες φαίνεται ένα παράδειγμα εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέθοδο που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική. Έστω ότι η εικόνα της πλημμύρας είναι η εικόνα με ημερομηνία 22 Οκτωβρίου 2018 (εικόνα με αριθμό 8 στον Πίνακα 1) και οι εικόνες χωρίς πλημμύρα είναι οι εικόνες με ημερομηνίες από 10 Σεπτεμβρίου 2018 μέχρι 16 Οκτωβρίου 2018 (εικόνες με αρίθμηση 1 έως 7 στους Πίνακες 1 και 2).

Τότε, οι διαφορές που έπρεπε να υπολογισθούν για τον εντοπισμό των αλλαγών που έγιναν στην περιοχή μελέτης εξαιτίας της πλημμύρας ήταν οι αφαιρέσεις που φαίνονται στον Πίνακα 1, ενώ για την ανίχνευση αλλαγών που προέκυψαν στην περιοχή χωρίς να υπάρξει φαινόμενο πλημμύρας οι διαφορές φαίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 1: Διαφορές εικόνων για εντοπισμό αλλαγών στην περιοχή μελέτης εξαιτίας της πλημμύρας.

	Εικόνα Πλημμύρας 8
Εικόνα χωρίς πλημμύρα 1	Αφαίρεση εικόνων 8-1
Εικόνα χωρίς πλημμύρα 2	Αφαίρεση εικόνων 8-2
Εικόνα χωρίς πλημμύρα 3	Αφαίρεση εικόνων 8-3
Εικόνα χωρίς πλημμύρα 4	Αφαίρεση εικόνων 8-4
Εικόνα χωρίς πλημμύρα 5	Αφαίρεση εικόνων 8-5
Εικόνα χωρίς πλημμύρα 6	Αφαίρεση εικόνων 8-6
Εικόνα χωρίς πλημμύρα 7	Αφαίρεση εικόνων 8-7
	Εικόνα μέσου όρου των παραπάνω αφαιρέσεων -> Αλλαγές που συνέβησαν εξαιτίας της πλημμύρας

Πίνακας 2: Διαφορές εικόνων για εντοπισμό αλλαγών στην περιοχή μελέτης πριν την πλημμύρα.

Εικόνα χωρίς πλημμύρα 7	Εικόνα χωρίς πλημμύρα 6	Εικόνα χωρίς πλημμύρα 5	Εικόνα χωρίς πλημμύρα 4	Εικόνα χωρίς πλημμύρα 3	Εικόνα χωρίς πλημμύρα 2	Εικόνα χωρίς πλημμύρα 1
Αφαίρεση εικόνων 7-6						
Αφαίρεση εικόνων 7-5	Αφαίρεση εικόνων 6-5					
Αφαίρεση εικόνων 7-4	Αφαίρεση εικόνων 6-4	Αφαίρεση εικόνων 5-4				
Αφαίρεση εικόνων 7-3	Αφαίρεση εικόνων 6-3	Αφαίρεση εικόνων 5-3	Αφαίρεση εικόνων 4-3			
Αφαίρεση εικόνων 7-2	Αφαίρεση εικόνων 6-2	Αφαίρεση εικόνων 5-2	Αφαίρεση εικόνων 4-2	Αφαίρεση εικόνων 3-2		
Αφαίρεση εικόνων 7-1	Αφαίρεση εικόνων 6-1	Αφαίρεση εικόνων 5-1	Αφαίρεση εικόνων 4-1	Αφαίρεση εικόνων 3-1	Αφαίρεση εικόνων 16/9/2018-10/9/2018	
Εικόνα μέσου όρου των παραπάνω αφαιρέσεων -> Αλλαγές που συνέβησαν χωρίς το φαινόμενο της πλημμύρας						

3.5 Εικόνες μέσου όρου των διαφορών και αφαίρεσή τους

Σε αυτή τη φάση, υπολογίστηκαν οι εικόνες μέσου όρου των διαφορών του προηγούμενου βήματος. Δηλαδή υπολογίστηκε μία εικόνα μέσου όρου των διαφορών των εικόνων χωρίς την εικόνα της πλημμύρας, και μία εικόνα μέσου όρου των διαφορών της εικόνας πλημμύρας με όλες τις προηγούμενές της χρονικά.

Η εικόνα μέσου όρου των διαφορών των εικόνων χωρίς την εικόνα πλημμύρας δείχνει τις αλλαγές του περιβάλλοντος της περιοχής μελέτης υπό κανονικές συνθήκες, καθημερινά. Από την άλλη, με την εικόνα μέσου όρου των διαφορών μεταξύ της εικόνας της πλημμύρας και των υπόλοιπων εικόνων εντοπίστηκαν οι αλλαγές που υπήρχαν στην περιοχή εξαιτίας της πλημμύρας.

Έπειτα, το επόμενο βήμα στη διαδικασία ήταν να γίνει αφαίρεση μεταξύ των δύο εικόνων των μέσων όρων. Συγκεκριμένα, η πράξη ήταν «εικόνα μέσου όρου διαφορών με την πλημμυρισμένη εικόνα μείον την εικόνα μέσου όρου των διαφορών των εικόνων χωρίς την πλημμυρισμένη εικόνα». Αυτό έγινε επειδή η διαφορά τους δείχνει τη συμπεριφορά του κάθε εικονοστοιχείου σε δύο καταστάσεις: στην κατάσταση της πλημμύρας και στην κατάσταση χωρίς βροχόπτωση. Στόχος ήταν να φανούν οι περιοχές οι οποίες είχαν τη μεγαλύτερη μεταβολή στις τιμές τους πριν και κατά την πλημμύρα.

3.6 Κατωφλίωση της εικόνας της διαφοράς των μέσων όρων

Στην εικόνα η οποία προέκυψε από τη διαφορά των δύο μέσων όρων, οι μικρότερες τιμές της δείχνουν τις περιοχές στις οποίες η εικόνα του μέσου όρου με την εικόνα πλημμύρας είχε μικρότερες τιμές από την εικόνα μέσου όρου των εικόνων χωρίς βροχή. Συνεπώς αυτές οι περιοχές των οποίων οι τιμές ήταν οι μικρότερες στην εικόνα διαφοράς των μέσων όρων, είναι πιθανότερο να είναι πλημμυρισμένες.

Επομένως, το επόμενο βήμα ήταν να βρεθεί με δοκιμές ένα κατώφλι το οποίο θα έδειχνε μόνο τις πιο μικρές τιμές της εικόνας των διαφορών. Για να φανούν οι χαμηλότερες τιμές στην εικόνα της διαφοράς των μέσων όρων, έγινε κατωφλίωση του ιστογράμματος της εικόνας και αποφασίστηκε ότι όσες τιμές εικονοστοιχείων μείον τη μέση τιμή του ιστογράμματος είναι μικρότερες από την τριπλάσια τιμή της τυπικής απόκλισης της εικόνας ($\text{mean}-3s$), αποτελούν τις πλημμυρισμένες περιοχές. Δηλαδή αν ίσχυε για παράδειγμα σε μία εικόνα ότι $\text{mean}-3s = -6$, το κατώφλι που οριζόταν ήταν ίσο με $3s = -6 - \text{mean}$.

Με αυτό τον τρόπο προέκυψαν οι πιθανώς πλημμυρισμένες περιοχές.

3.7 Φιλτράρισμα με τις κατάλληλες μάσκες-κριτήρια

Το παραπάνω βήμα είχε ως αποτέλεσμα μία εικόνα με σημεία τα οποία είναι πιθανό να είναι πλημμυρισμένα. Προέκυψαν όμως σημεία με χαμηλές τιμές τα οποία με την κατωφλίωση παρέμειναν στην εικόνα και βρίσκονται διάσπαρτα σε αυτή. Αυτά βρίσκονται σε σημεία με έντονο

ανάγλυφο, σε σημεία με σκιάσεις, ή σε δασικές περιοχές. Αυτά τα σημεία είναι απίθανο να είναι πλημμυρισμένα καθώς στις περιοχές μεγάλων κλίσεων και σε δασικές περιοχές σε μεγάλο υψόμετρο, απομακρυσμένες από την πλημμυρισμένη έκταση, δε μπορεί να υπάρχει νερό εξαιτίας της πλημμύρας. Για παράδειγμα αυτό μπορεί να είναι το νερό μιας λίμνης. Επιπλέον προέκυψαν πιθανώς πλημμυρισμένα σημεία μέσα σε υδάτινες επιφάνειες τα οποία έπρεπε να εξαλειφθούν.

Για την αφαίρεση των εικονοστοιχείων που λανθασμένα θεωρούνται πλημμυρισμένα από την εικόνα που προέκυψε από το παραπάνω βήμα, έπρεπε να δημιουργηθούν κάποια επίπεδα πληροφορίας και να γίνουν πράξεις με αυτά ώστε τελικά να προκύψει το ορθό αποτέλεσμα των πλημμυρισμένων σημείων του χάρτη στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Ανάλογα με την περίπτωση της χρήσης γης στην οποία γινόταν η μελέτη, δημιουργούνταν τα κατάλληλα επίπεδα ώστε να εξαλειφθούν τα σημεία που είναι λανθασμένα ταξινομημένα ως πλημμυρισμένα.

Χρησιμοποιώντας το DEM της περιοχής μελέτης, μασκάρονται οι περιοχές οι οποίες έχουν μεγάλη κλίση με τη χρήση κατωφλιού το οποίο κρίθηκε ότι διαχωρίζει σωστά τις περιοχές με απότομες κλίσεις. Προκύπτει έτσι ένα επίπεδο στο οποίο οι περιοχές με μεγάλη κλίση εμφανίζονταν με τιμή 0 και οι περιοχές με ομαλότερο ανάγλυφο είχαν τιμή 1.

Επιπλέον, σε πολλές περιοχές μπορεί να παρουσιάζονται υδάτινα σώματα. Στη δασώδη κάλυψη γης π.χ., υπήρχαν λίμνες και ποτάμια ενώ η αστική περιοχή περιβαλλόταν από νερό και τη διαπερνούσαν κανάλια. Έτσι, προκύπτουν λανθασμένα πλημμυρισμένα σημεία εντός υδάτινων επιφανειών. Γι' αυτό, δημιουργείται μια μάσκα για την εξάλειψη και αυτών των σημείων.

Ένας τρόπος είναι να υπολογιστεί ο μέσος όρος των εικόνων της χρονοσειράς χωρίς την πλημμύρα και βάζοντας ένα κατώφλι στην εικόνα του μέσου όρου να δημιουργηθεί ένα επίπεδο στο οποίο τα υδάτινα στοιχεία θα έχουν τιμή 0 και τα υπόλοιπα τιμή 1.

Εάν τα υδάτινα σώματα είναι θάλασσα, για τη δημιουργία μάσκας μπορούν να ψηφιοποιηθούν οι περιοχές ξηράς με χρήση μιας εικόνας από αυτές πριν την πλημμύρα στο πρόγραμμα QGIS. Στη συνέχεια αυτή η μάσκα να εφαρμοστεί σε όλες τις εικόνες.

3.8 Εκτέλεση αλγορίθμου Otsu για βελτιστοποίηση του αποτελέσματος – Χάρτης πιθανοτήτων

Στόχος αυτού του βήματος της μεθόδου ήταν η εξάλειψη σημείων τα οποία θεωρήθηκαν πλημμυρισμένα και βρισκόνταν είτε σε δασικές εκτάσεις, είτε σε υδάτινες επιφάνειες (συνεπώς δεν ήταν πραγματικά πλημμυρισμένα) και τα οποία δεν απαλείφθηκαν με την εφαρμογή των παραπάνω φίλτρων. Έτσι, αναπτύχθηκε μια μέθοδος η οποία χρησιμοποιούσε το ιστόγραμμα της πλημμυρισμένης εικόνας, δηλαδή της εικόνας που προέκυψε από την αφαίρεση των μέσων όρων των διαφορών με και χωρίς την πλημμυρισμένη εικόνα μετά την εφαρμογή των μασκών όπου αυτό ήταν απαραίτητο, ώστε να προκύψει ένα κατώφλι το οποίο θα ξεχώριζε τις περιοχές που πλημμύρισαν με βάση το αποτέλεσμα της παραπάνω μεθόδου.

Πιο συγκεκριμένα, πρώτα δημιουργήθηκαν τα κεντροειδή των πλημμυρισμένων περιοχών, ένα σημείο στο εσωτερικό κάθε πλημμυρισμένου πολυγώνου ή σε κάθε μονό εικονοστοιχείο που θεωρούταν πλημμυρισμένο.

Για την εξάλειψη των εικονοστοιχείων που λανθασμένα φαίνονται να είναι πλημμυρισμένα, δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος σε περιβάλλον Matlab ο οποίος εντόπιζε τα κεντροειδή και δημιουργούσε γύρω τους ένα παράθυρο με ένα συγκεκριμένο πλήθος εικονοστοιχείων.

Ύστερα υπολόγιζε τον αριθμό των πλημμυρισμένων εικονοστοιχείων τα οποία υπάρχουν σε αυτό το παράθυρο, σύμφωνα με τη εικόνα πλημμύρας που είχε προκύψει από το προηγούμενο βήμα της μεθόδου.

Αν ο αριθμός των πλημμυρισμένων εικονοστοιχείων που μετρήθηκαν και βρίσκονται εντός του παραθύρου είναι μεγαλύτερος από ένα ποσοστό των συνολικών εικονοστοιχείων του παραθύρου π.χ. από το 10% του συνολικού αριθμού εικονοστοιχείων του παραθύρου, τότε υπολογιζόταν με τη μέθοδο Otsu ένα κατώφλι το οποίο θα χώριζε τα εικονοστοιχεία σε δύο κατηγορίες: πλημμυρισμένα και μη πλημμυρισμένα.

Επειδή κάποια εικονοστοιχεία άνηκαν σε περισσότερα από ένα παράθυρα, υπολογίστηκε πόσες φορές μετρήθηκε το κάθε εικονοστοιχείο καθώς σε αυτά θα εφαρμοζόταν περισσότερες φορές ο αλγόριθμος Otsu για την κατωφλίωση. Επομένως στο τέλος έπρεπε να κανονικοποιηθούν όλα τα εικονοστοιχεία ώστε να προκύψει μία εικόνα με τιμές από 0 μέχρι 1. Οι τιμές δήλωναν την πιθανότητα να είναι πλημμυρισμένο το κάθε εικονοστοιχείο. Όσο πιο κοντά στο 1 η τιμή ενός εικονοστοιχείου, τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα να είναι πλημμυρισμένο.

Στην τελική εικόνα κάθε εικονοστοιχείο έχει μία τιμή, η οποία δηλώνει την πιθανότητα που υπάρχει να είναι πλημμυρισμένο. Όσο πιο κοντά είναι μια τιμή ενός εικονοστοιχείου στη μονάδα, τόσο πιο μεγάλες είναι οι πιθανότητες του εικονοστοιχείου να είναι πλημμυρισμένο. Οι πιο χαμηλές τιμές δηλώνουν μικρότερη πιθανότητα να είναι πλημμυρισμένη η περιοχή που απεικονίζει το εικονοστοιχείο.

Η μέθοδος εφαρμόστηκε αρκετές φορές μέχρι να οριστικοποιηθούν οι τιμές των παραμέτρων που δίνουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Η μία παράμετρος που έπρεπε να οριστεί ήταν το ποσοστό των πλημμυρισμένων εικονοστοιχείων στο παράθυρο ώστε να εφαρμοστεί η μέθοδος Otsu. Η άλλη παράμετρος ήταν το μέγεθος του παραθύρου στο οποίο θα εφαρμοστεί η μέθοδος Otsu. Έγιναν δοκιμές με διαφορετικά μεγέθη παραθύρων για να προκύψει ο καλύτερος συνδυασμός των κριτηρίων της μεθόδου.

Παρατηρήθηκε ότι για τη βέλτιστη απεικόνιση των αποτελεσμάτων έπρεπε να συνδυαστούν τα δύο κριτήρια με τέτοιο τρόπο ώστε να απεικονίζονται ορθά οι πλημμυρισμένες περιοχές στο χάρτη, είτε αυτές ήταν μεγάλες είτε πιο μικρές.

Οι τιμές των δύο κριτηρίων εξαρτώνται από την διασπορά και το μέγεθος συσσωρεύσεων των εικονοστοιχείων που δείχνουν πλημμυρισμένες περιοχές. Για μεγάλη διασπορά και μικρές συσσωρεύσεις εικονοστοιχείων το μέγεθος του παραθύρου πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο (π.χ. 45x45), ενώ για μικρή διασπορά και συμπαγείς επιφάνειες αρκεί ένα μικρό μέγεθος παραθύρου (15x15).

Αντίθετα, τα μεγάλα παράθυρα απαιτούν μικρό ποσοστό εικονοστοιχείων (1.5%) να θεωρούνται πλημμυρισμένα για να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος Otsu, ενώ τα μικρά παράθυρα μεγαλύτερο ποσοστό (4%).

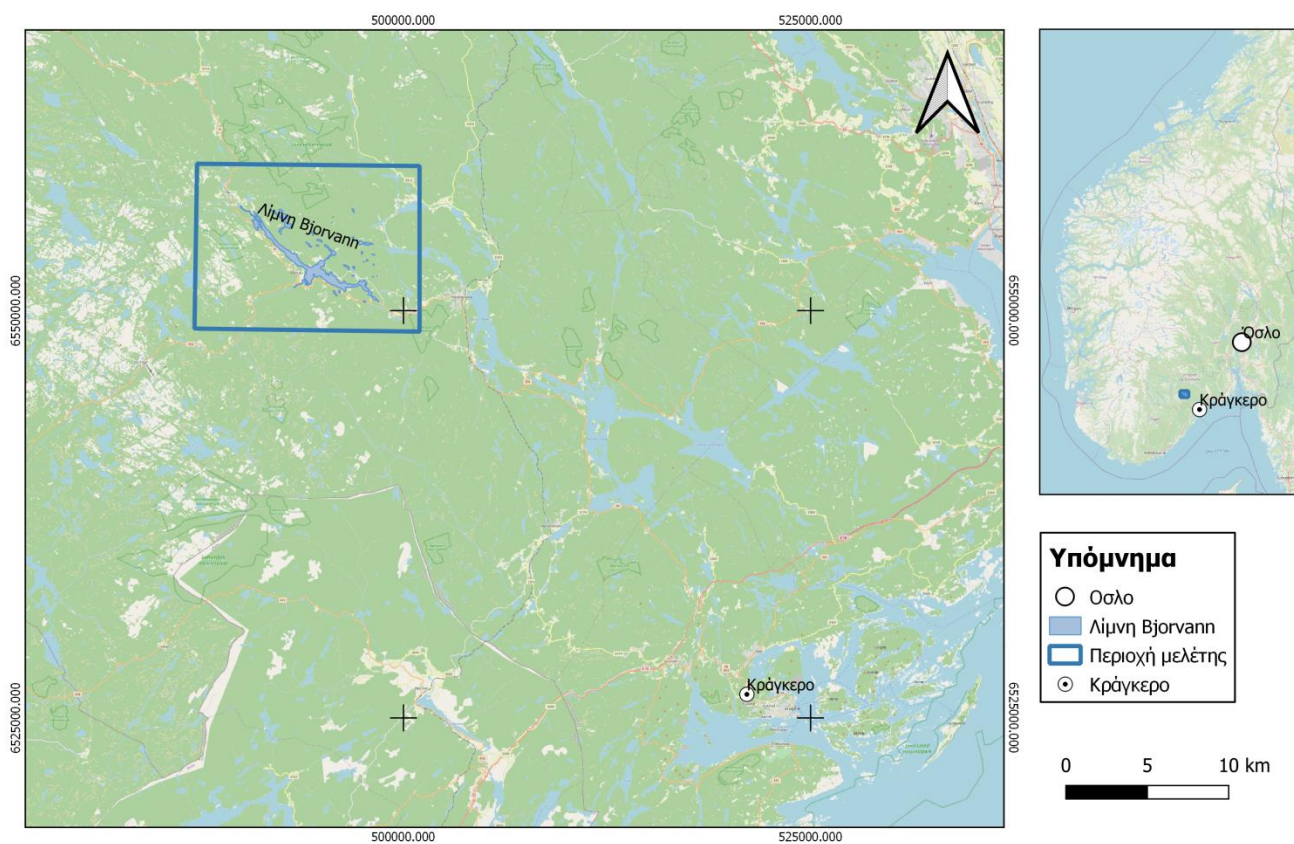
4. Εφαρμογή της μεθοδολογίας – Αποτελέσματα

4.1 Περιοχή μελέτης στη Νορβηγία – Δασώδης περιοχή

Το πρώτο φαινόμενο πλημμύρας το οποίο μελετήθηκε ήταν η πλημμύρα η οποία έλαβε χώρα στις 21 Οκτωβρίου 2017 στη λίμνη Βιορνανν στην περιοχή Κράγκερο της Νορβηγίας. Η πόλη Κράγκερο ανήκει στην ευρύτερη περιοχή που ονομάζεται Telemark και βρίσκεται νότια του Όσλο, της πρωτεύουσας της Νορβηγίας.

Συγκεκριμένα η περιοχή ενδιαφέροντος φαίνεται παρακάτω:

Περιοχή ενδιαφέροντος Νορβηγία



Εικόνα 8: Χάρτης περιοχής μελέτης στη Νορβηγία

Συγκεκριμένα η λίμνη Bjornann η οποία μελετήθηκε ήταν η παρακάτω:



Εικόνα 9: Λίμνη Bjornann, Αριστερά ESRI World Imagery, Δεξιά Open Street Map

4.1.1 Εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν

Οι εικόνες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ήταν μια χρονοσειρά εικόνων Sentinel 1, με εικόνες πριν κατά και μετά την πλημμύρα της 21^{ης} Οκτωβρίου 2017.

Οι εικόνες οι οποίες λήφθηκαν ανήκαν στην τροχιά 44 και έχουν ληφθεί κατά την ανοδική πορεία του δορυφόρου Sentinel 1. Φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 3: Εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για την χαρτογράφηση της πλημμύρας 22 Οκτωβρίου 2017

S1B_IW_GRDH_1SDV_20170730T170131_20170730T170156_006720_00BD1F_DCC0
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170805T170215_20170805T170240_017791_01DCFD_3909
S1B_IW_GRDH_1SDV_20170811T170132_20170811T170157_006895_00C234_F1F8
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170817T170216_20170817T170241_017966_01E248_2979
S1B_IW_GRDH_1SDV_20170823T170133_20170823T170158_007070_00C745_0749
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170829T170217_20170829T170242_018141_01E794_FF11
S1B_IW_GRDH_1SDV_20170904T170133_20170904T170158_007245_00CC5A_B1B5
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170910T170217_20170910T170242_018316_01ECFC_E87D
S1B_IW_GRDH_1SDV_20170916T170134_20170916T170159_007420_00D183_C648
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170922T170217_20170922T170242_018491_01F25B_762E
S1B_IW_GRDH_1SDV_20170928T170134_20170928T170159_007595_00D689_3B04
S1A_IW_GRDH_1SDV_20171004T170218_20171004T170243_018666_01F7B5_F00C
S1B_IW_GRDH_1SDV_20171010T170134_20171010T170159_007770_00DB8C_9B3D
S1A_IW_GRDH_1SDV_20171016T170218_20171016T170243_018841_01FD0D_4B3D
S1B_IW_GRDH_1SDV_20171022T170134_20171022T170159_007945_00E089_5E92
S1A_IW_GRDH_1SDV_20171028T170218_20171028T170243_019016_02025E_7A18
S1B_IW_GRDH_1SDV_20171103T170134_20171103T170159_008120_00E58B_6816

Οι παραπάνω εικόνες φαίνονται με χρονική σειρά με πρώτη την εικόνα με ημερομηνία λήψης 30 Ιουλίου 2017, εικόνα πλημμύρας την εικόνα με ημερομηνία λήψης 22 Οκτωβρίου 2017 και τέλος η τελευταία εικόνα της χρονοσειράς λήφθηκε στις 3 Νοεμβρίου 2017.

Για τη μελέτη και τη χαρτογράφηση της πλημμύρας της λίμνης Bjornvann από τη βροχόπτωση που έγινε στις 21 Οκτωβρίου 2017 χρησιμοποιήθηκαν οι εικόνες με ημερομηνίες λήψης από 4 Σεπτεμβρίου έως 22 Οκτωβρίου.

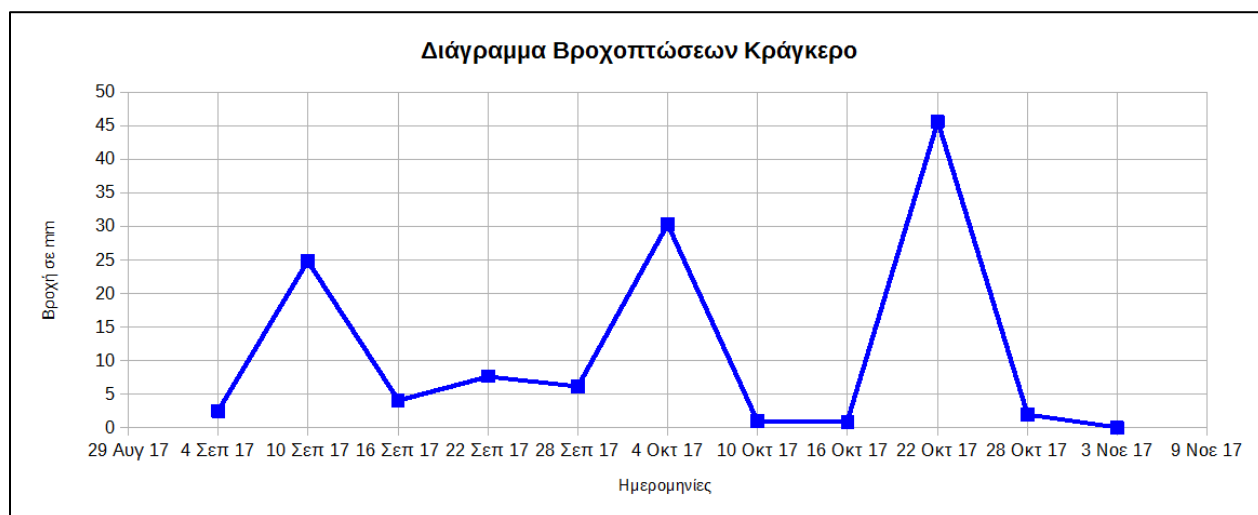
Οι εικόνες χωρίστηκαν σε εικόνες βροχής και εικόνες ξηρασίας. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε να μην υπάρχουν επιπτώσεις βροχόπτωσης στις εικόνες πριν την πλημμύρα, οι οποίες αλλάζουν σημαντικά το σήμα του ραντάρ.

Σύμφωνα με την ιστοσελίδα <https://www.worldweatheronline.com/>, δημιουργήθηκε ο παρακάτω πίνακας και το διάγραμμά του ώστε να διαχωριστούν οι εικόνες στις δύο κατηγορίες. Ο πίνακας και το διάγραμμα αφορούν το χρονικό διάστημα από 4 Σεπτεμβρίου 2017 μέχρι 3 Νοεμβρίου 2017.

Τα χιλιοστά που αναγράφονται στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 4 αποτελούν το άθροισμα των χιλιοστών βροχής που είχαν μετρηθεί τις τρεις προηγούμενες μέρες από την ημερομηνία λήψης της εκάστοτε εικόνας.

Πίνακας 4: Χιλιοστά βροχόπτωσης

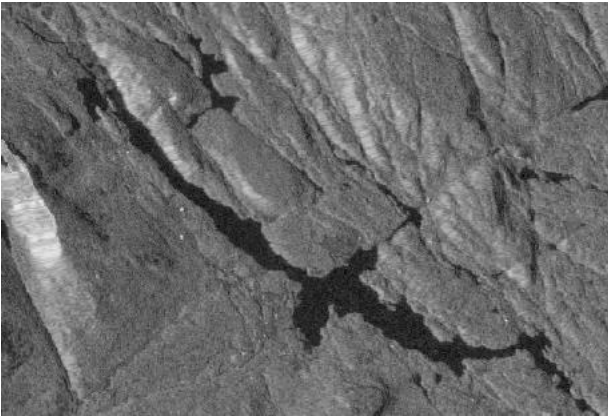
Ημερομηνίες	Βροχή σε mm
4-Σεπ-17	2.5
10-Σεπ-17	24.9
16-Σεπ-17	4.1
22-Σεπ-17	7.7
28-Σεπ-17	6.2
4-Οκτ-17	30.3
10-Οκτ-17	1
16-Οκτ-17	0.8
22-Οκτ-17	45.6
28-Οκτ-17	2
3-Νοε-17	0



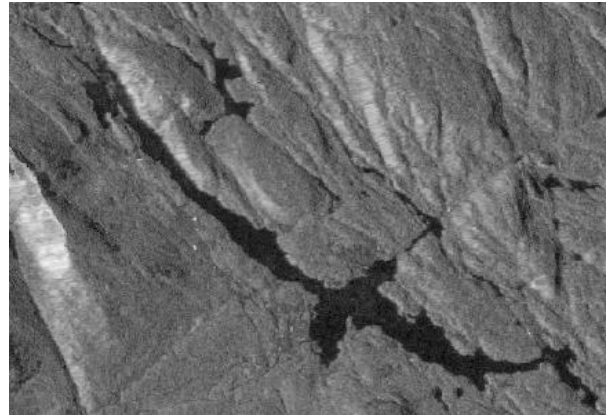
Διάγραμμα 1: Βροχοπτώσεις στην περιοχή Κράγκερο από τις 4 Σεπτεμβρίου 2017 έως και τις 3 Νοεμβρίου 2017

Σύμφωνα με τα δεδομένα, οι μεγαλύτερες βροχοπτώσεις έγιναν τις ημερομηνίες 10 Σεπτεμβρίου 2017, 22 και 28 Σεπτεμβρίου 2017, στις 4 Οκτωβρίου 2017 και 22 Οκτωβρίου 2017. Παρ' όλα αυτά, παρατηρήθηκε ότι οι εικόνες με ημερομηνίες λήψης 22 & 28 Σεπτεμβρίου 2017 δεν φαίνονταν να είναι εικόνες με πλημμυρισμένες περιοχές γύρω από τη λίμνη Bjornann. Σε αντίθεση με τις συγκεκριμένες δύο, στις υπόλοιπες τρεις με τα υψηλότερα χιλιοστά βροχής, φάνηκαν να έχουν πλημμυρίσει αρκετά οι περιοχές γύρω από τη λίμνη.

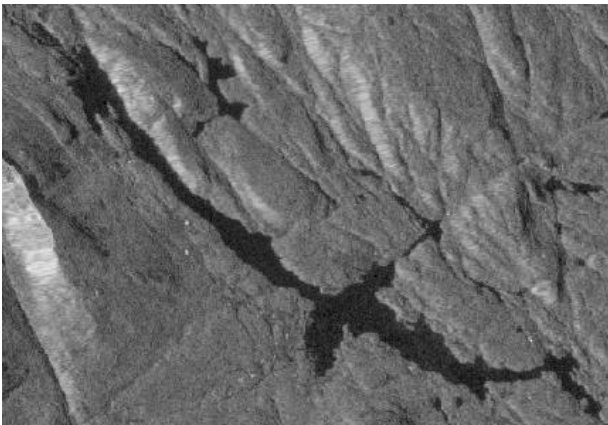
Παρακάτω φαίνονται συγκριτικά οι εικόνες με τα περισσότερα χιλιοστά βροχής.



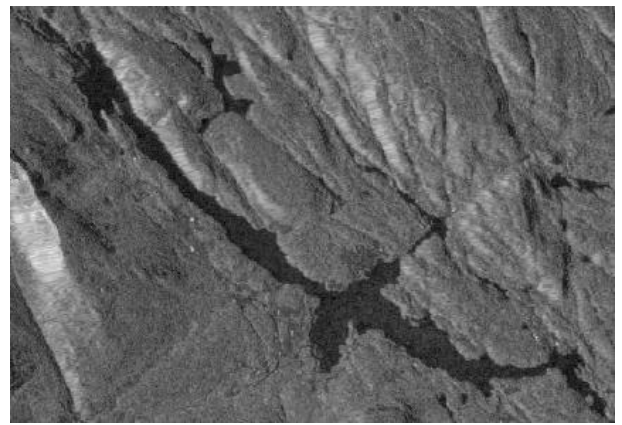
Εικόνα 10: 22 Σεπτεμβρίου 2017



Εικόνα 11: 28 Σεπτεμβρίου 2017



Εικόνα 12: 10 Σεπτεμβρίου 2017



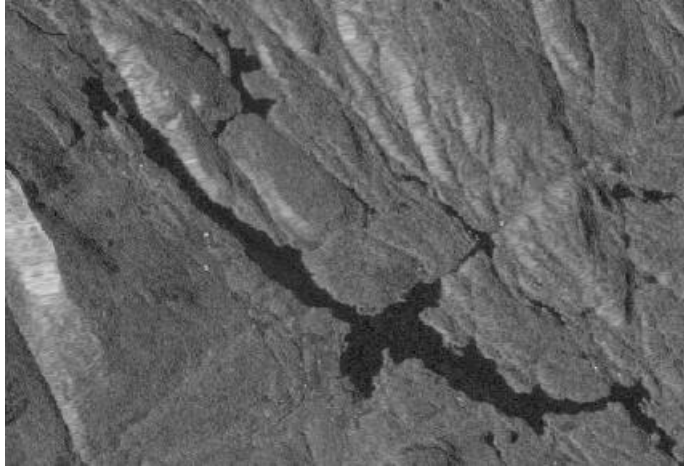
Εικόνα 13: 4 Οκτωβρίου 2017

Επομένως, σύμφωνα με τις εικόνες, αποφασίστηκε να μη ληφθούν οι ημερομηνίες 22 & 28 Σεπτεμβρίου 2017 ως εικόνες βροχής, αλλά ως εικόνες ξηρασίας.

Έτσι λοιπόν οι εικόνες που τελικά χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του χάρτη πλημμύρας για τη βροχόπτωση στις 21 Οκτωβρίου 2017 ήταν αυτές με τις εξής ημερομηνίες λήψης:

- 4 Σεπτεμβρίου 2017
- 16 Σεπτεμβρίου 2017
- 22 Σεπτεμβρίου 2017
- 28 Σεπτεμβρίου 2017
- 10 Οκτωβρίου 2017
- 16 Οκτωβρίου 2017 και
- 22 Οκτωβρίου 2017

Για την περιοχή μελέτης, δύο από τα αποτελέσματα των εικόνων μετά από την προεπεξεργασία στο πρόγραμμα SNAP προέκυψαν όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 14: 16 Οκτωβρίου 2017



Εικόνα 15: 22 Οκτωβρίου 2017 - εικόνα πλημμύρας

Οι εικόνες που συμμετείχαν στην επεξεργασία ήταν 7, μία εικόνα πλημμύρας (22 Οκτωβρίου 2017) και έξι εικόνες στις οποίες ο καιρός ήταν σχετικά ξηρός, χωρίς βροχή.

4.1.2 Αφαιρέσεις εικόνων με χρονολογική σειρά

Για την ανίχνευση αυτών των αλλαγών που συμβαίνουν χωρίς να πλημμυρίζει η περιοχή, έγιναν αφαιρέσεις της κάθε εικόνας εκτός από την εικόνα της πλημμύρας (22 Οκτωβρίου 2017) με όλες τις προηγούμενες χρονικά. Συνολικά ήταν 15 αφαιρέσεις των οποίων υπολογίστηκε ο μέσος όρος.

Έπειτα, για την ανίχνευση των αλλαγών που προέκυψαν εξαιτίας της πλημμύρας, πραγματοποιήθηκαν αφαιρέσεις των επεξεργασμένων εικόνων, αυτή τη φορά όμως μεταξύ της εικόνας της πλημμύρας με όλες τις προηγούμενες εικόνες χρονικά. Σύνολο έγιναν 6 αφαιρέσεις.

Πίνακας 5: Πίνακας αφαιρέσεων μη πλημμυρισμένων εικόνων

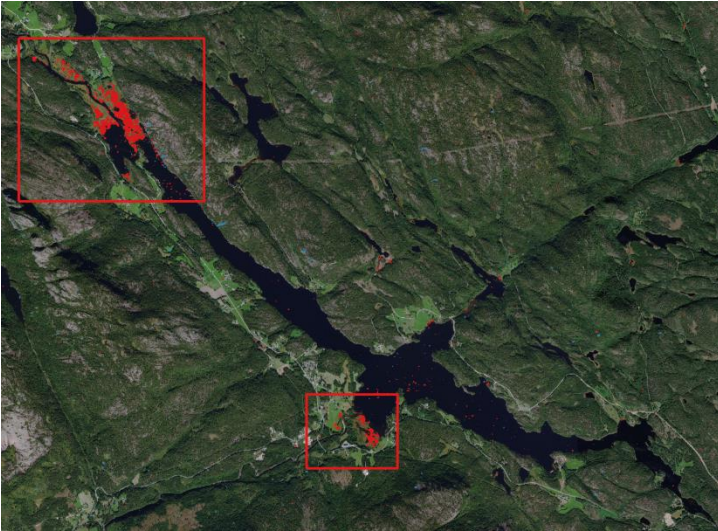
Αφαίρεση εικόνων 16-10-2017 με 10-10-2017
Αφαίρεση εικόνων 16-10-2017 με 28-09-2017
Αφαίρεση εικόνων 16-10-2017 με 22-09-2017
Αφαίρεση εικόνων 16-10-2017 με 16-09-2017
Αφαίρεση εικόνων 16-10-2017 με 04-09-2017
Αφαίρεση εικόνων 10-10-2017 με 28-09-2017
Αφαίρεση εικόνων 10-10-2017 με 22-09-2017
Αφαίρεση εικόνων 10-10-2017 με 16-09-2017
Αφαίρεση εικόνων 10-10-2017 με 04-09-2017
Αφαίρεση εικόνων 28-09-2017 με 22-09-2017
Αφαίρεση εικόνων 28-09-2017 με 16-09-2017
Αφαίρεση εικόνων 28-09-2017 με 04-09-2017
Αφαίρεση εικόνων 22-09-2017 με 16-09-2017
Αφαίρεση εικόνων 22-09-2017 με 04-09-2017
Αφαίρεση εικόνων 16-09-2017 με 04-09-2017

Πίνακας 6: Πίνακας αφαιρέσεων εικόνων ξηράς με την εικόνα πλημμύρας

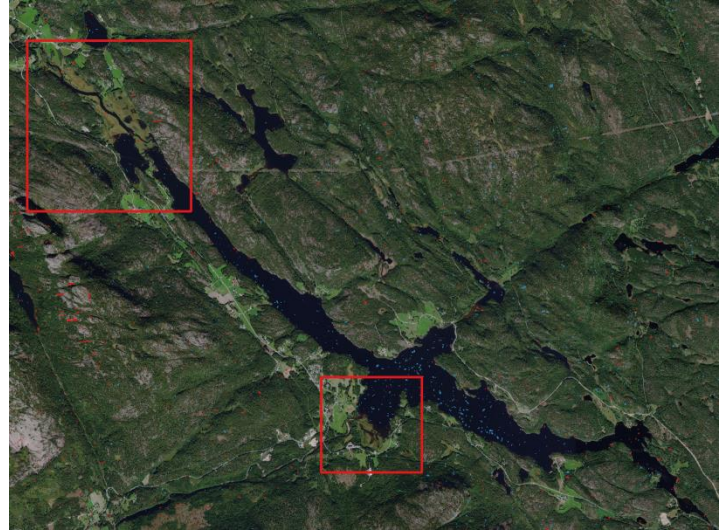
Αφαίρεση εικόνων 22-10-2017 με 16-10-2017
Αφαίρεση εικόνων 22-10-2017 με 10-10-2017
Αφαίρεση εικόνων 22-10-2017 με 28-09-2017
Αφαίρεση εικόνων 22-10-2017 με 22-09-2017
Αφαίρεση εικόνων 22-10-2017 με 16-09-2017
Αφαίρεση εικόνων 22-10-2017 με 04-09-2017

Παρακάτω φαίνονται δύο παραδείγματα αφαίρεσης των εικόνων, μία αφαίρεση δύο «ξηρών» εικόνων και μία αφαίρεση μεταξύ της πλημμυρισμένης εικόνας και μιας «ξηρής» εικόνας.

Στις διαφορές των εικόνων που φαίνονται παρακάτω έχει μπει κατώφλι $mean-3s$ και $mean+3s$ ώστε να φαίνονται μόνο οι μεγαλύτερες διαφορές των εικόνων που συμμετέχουν στην αφαίρεση με κόκκινο (διαφορές με αρνητικό πρόσημο) και με μπλε χρώμα (διαφορές με θετικό πρόσημο). Το υπόβαθρο στο οποίο έχει γίνει η επίθεση των δύο εικόνων διαφοράς είναι εικόνα από τον άτλαντα (World Imagery) του Ινστιτούτου Environmental Systems Research Institute (ESRI).



Εικόνα 16: Αφαίρεση της εικόνας πλημμύρας με την εικόνα 04-09-2017



Εικόνα 17: Αφαίρεση των εικόνων 16-10-2017 και 10-10-2017

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εικόνες, είναι φανερές οι διαφορές των εικόνων πριν και μετά την πλημμύρα. Στην Εικόνα 16 φαίνονται με κόκκινο χρώμα οι πιο μεγάλες αρνητικές διαφορές μεταξύ της εικόνας πλημμύρας και της εικόνας με ημερομηνία λήψης 04-09-2017. Το γεγονός ότι οι διαφορές έχουν αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι στα σημεία με κόκκινο χρώμα, η εικόνα πλημμύρας είχε μικρότερες τιμές από τις τιμές της δεύτερης εικόνας στις περιοχές αυτές. Παρατηρούνται μπλε σημεία διάσπαρτα στην εικόνα, αλλά τα σημεία με κόκκινο χρώμα γύρω από τη λίμνη είναι εκείνα που δείχνουν που έχει πλημμυρίσει η λίμνη.

Στην Εικόνα 17 η διαφορά των εικόνων χωρίς βροχή φαίνεται να έχει τις μεγαλύτερες τιμές σε διάσπαρτα σημεία και όχι στις όχθες της λίμνης όπως είναι στην Εικόνα 16 το βορειοδυτικό τμήμα της λίμνης και το νότιο.

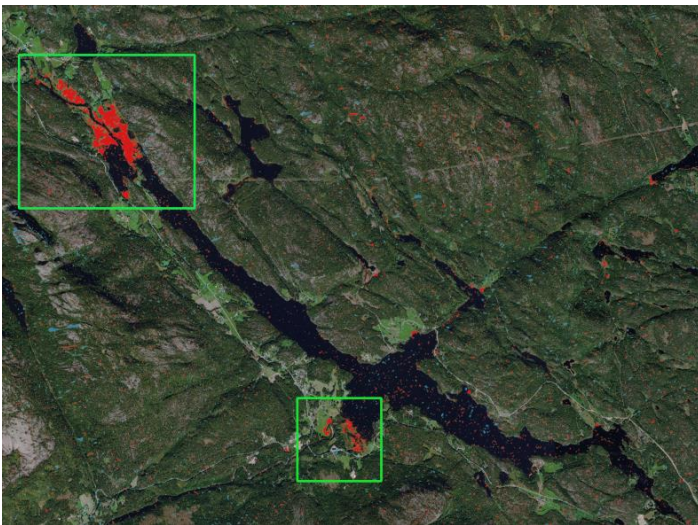
Και στις δύο εικόνες παρατηρούνται σημεία με μπλε χρώμα μέσα στη λίμνη και έξω από αυτή σε σημεία με δασικές εκτάσεις και έντονο ανάγλυφο. Τα σημεία με μεγάλες διαφορές εντός της λίμνης υπάρχουν επειδή η οπισθοσκέδαση μπορεί να αλλάζει στο νερό λόγω του αέρα, των κυματισμών αλλά και εξαιτίας φερτών υλικών του εδάφους.

4.1.3 Εικόνες μέσου όρου των διαφορών

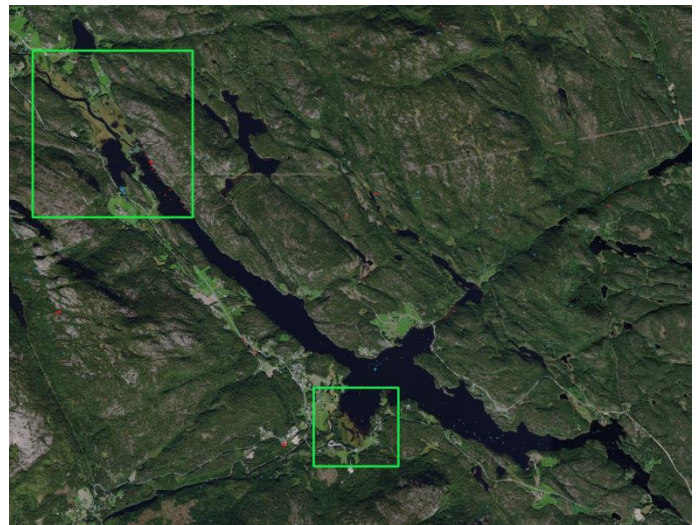
Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, έγιναν 15 αφαιρέσεις χρονικά (κάθε φορά η πιο πρόσφατη αφαιρούταν από τις προηγούμενες της), μεταξύ εικόνων ξηρασίας, και 6 αφαιρέσεις χρονικά της εικόνας πλημμύρας με τις ξηρές εικόνες.

Έπειτα, υπολογίστηκαν οι εικόνες μέσου όρου των διαφορών.

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα:



Εικόνα 18: Μέσος όρος διαφορών με την πλημμυρισμένη εικόνα



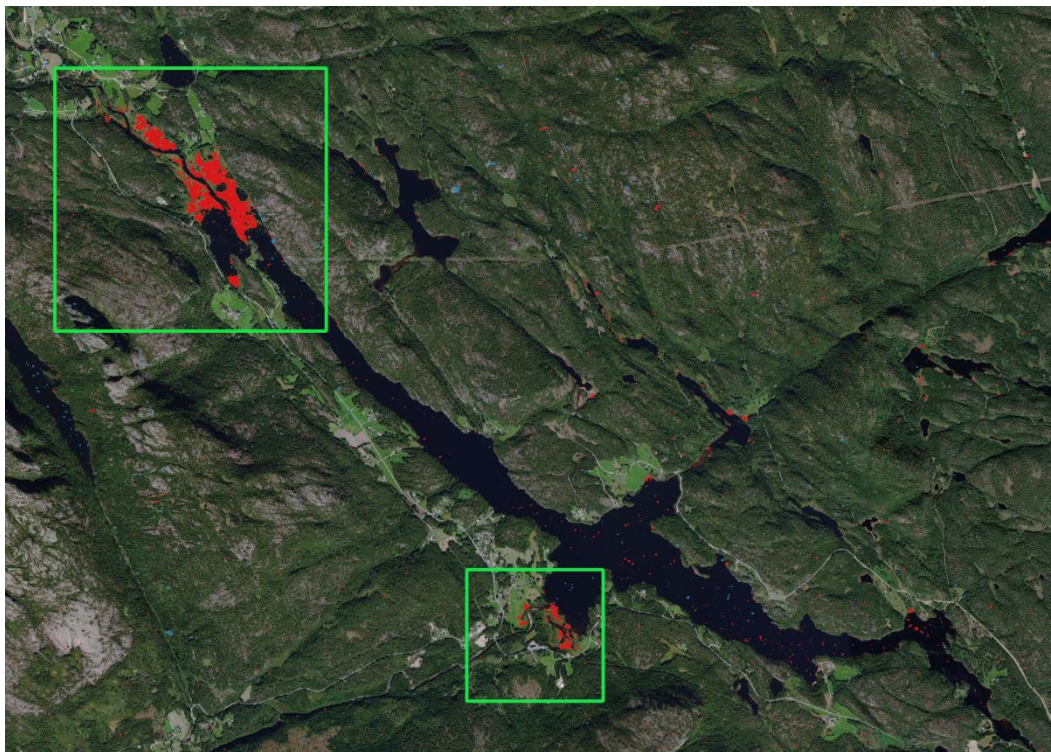
Εικόνα 19: Μέσος όρος διαφορών των ξηρών εικόνων

Στις Εικόνες 18 και 19 φαίνονται με μπλε και κόκκινο χρώμα οι μεγαλύτερες διαφορές των τιμών στις εικόνες των αφαιρέσεων σε υπόβαθρο διαθέσιμο από ESRI World Imagery. Με κόκκινο χρώμα είναι αρνητικές τιμές ενώ με μπλε οι θετικές τιμές. Στην Εικόνα 18 δηλαδή στο μέσο όρο των διαφορών με την πλημμυρισμένη εικόνα, φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες αλλαγές συνέβησαν βορειοδυτικά της λίμνης και νότια της λίμνης, στις όχθες οι οποίες δεν έχουν υψομετρικές διαφορές από τη λίμνη.

Αντιθέτως, στο μέσο όρο των εικόνων χωρίς την πλημμυρισμένη εικόνα, οι μεγαλύτερες διαφορές είναι διάσπαρτες στην εικόνα αλλά υπάρχουν και σημεία κοντά στη λίμνη τα οποία ανά το χρόνο παρουσίαζαν διαφορές στις τιμές τους στη χρονοσειρά.

4.1.4 Διαφορά των εικόνων μέσου όρου- Κατωφλίωση

Το επόμενο βήμα στη διαδικασία ήταν να γίνει αφαίρεση μεταξύ των δύο εικόνων των μέσων όρων.



Εικόνα 20: Διαφορά των μέσων όρων

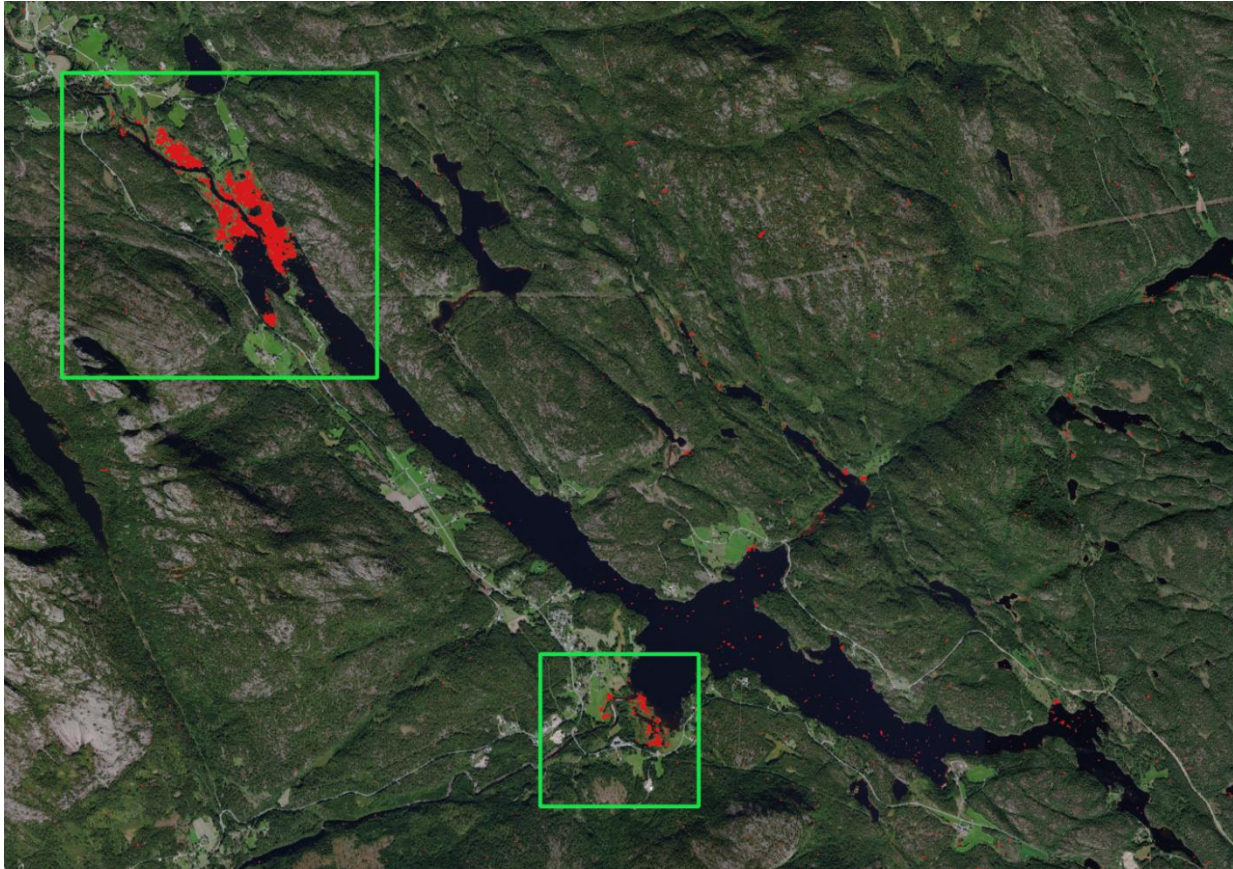
Η παραπάνω εικόνα αποτελεί το αποτέλεσμα της αφαίρεσης μεταξύ της εικόνας μέσου όρου των διαφορών της πλημμυρισμένης εικόνας με τις ξηρές και της εικόνας μέσου όρου των διαφορών χωρίς την πλημμυρισμένη εικόνα (μέσος όρος διαφορών πλημμυρισμένης - μέσος όρος διαφορών ξηρών εικόνων).

Φαίνονται με κόκκινο χρώμα τα σημεία με αρνητικές διαφορές, δηλαδή όπου η εικόνα μέσου όρου των διαφορών με χρήση της πλημμυρισμένης εικόνας είχε χαμηλότερες τιμές οπισθοσκέδασης από την εικόνα μέσου όρου των διαφορών χωρίς τη χρήση της εικόνας πλημμύρας. Τα σημεία αυτά θεωρούνται πως είναι τα πλημμυρισμένα σημεία του χάρτη, καθώς με βάση τη θεωρία, το νερό δεν επιστρέφει μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας στο δέκτη. Αντίθετα, η βλάστηση ανακλά μεγάλο μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Επομένως όταν κάποια εικονοστοιχεία στο χρόνο αλλάζουν συμπεριφορά (μικραίνει η οπισθοσκέδασή τους) εξαιτίας ενός φαινομένου πλημμύρας, το συμπέρασμα είναι ότι έχουν καλυφθεί από νερό.

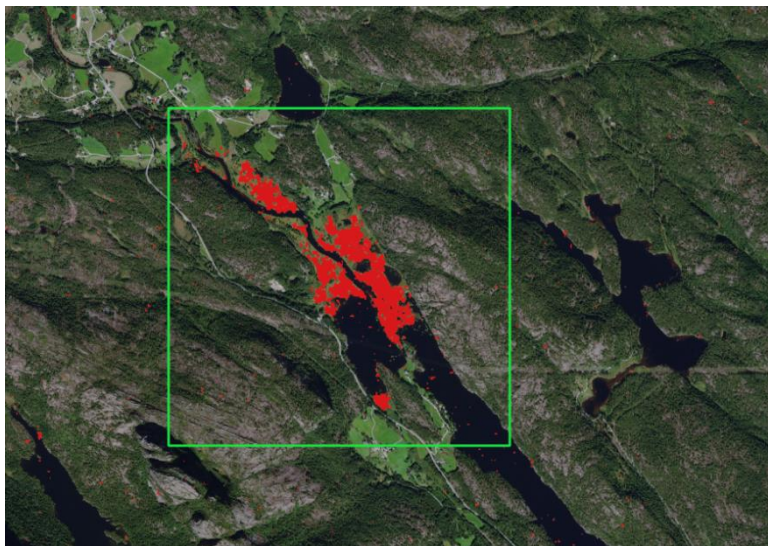
Με μπλε χρώμα φαίνονται τα σημεία με θετικές τιμές, δηλαδή όπου η εικόνα μέσου όρου των διαφορών με χρήση της πλημμυρισμένης εικόνας είχε υψηλότερες τιμές οπισθοσκέδασης από την εικόνα μέσου όρου των διαφορών χωρίς τη χρήση της εικόνας πλημμύρας. Τα σημεία αυτά δεν ανήκουν σε πλημμυρισμένες περιοχές αφού η οπισθοσκέδασή τους αυξήθηκε στη χρονοσειρά.

Επομένως, ο στόχος ήταν η δημιουργία ενός χάρτη πλημμύρας με βάση αυτή την εικόνα διαφορών των μέσων όρων, σύμφωνα με τη συμπεριφορά των εικονοστοιχείων τα οποία είχαν χρονικά τις

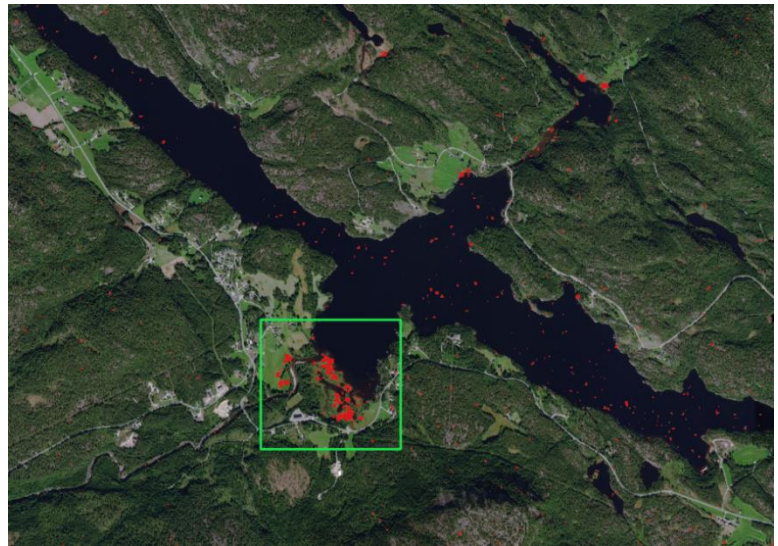
μεγαλύτερες μειώσεις στις τιμές οπισθοσκέδασης. Έτσι, επειδή τα μπλε σημεία αποκλείστηκαν από το να είναι πλημμυρισμένα, αφαιρέθηκαν με την κατωφλίωση $mean-3std$ ώστε να φανούν μόνο τα κόκκινα, των οποίων οι τιμές μειώθηκαν αρκετά εξαιτίας της πλημμύρας. Ήταν $-3std = -5.5 + mean$, οπότε τα εικονοστοιχεία που φαίνονται με κόκκινο είναι οι τιμές που είναι μικρότερες από -6.5 .



Εικόνα 21: Διαφορά μέσων όρων με κατώφλι $mean-3s$



Εικόνα 22: Διαφορά μέσων όρων με κατώφλι $mean-3s$ σε μεγαλύτερη κλίμακα



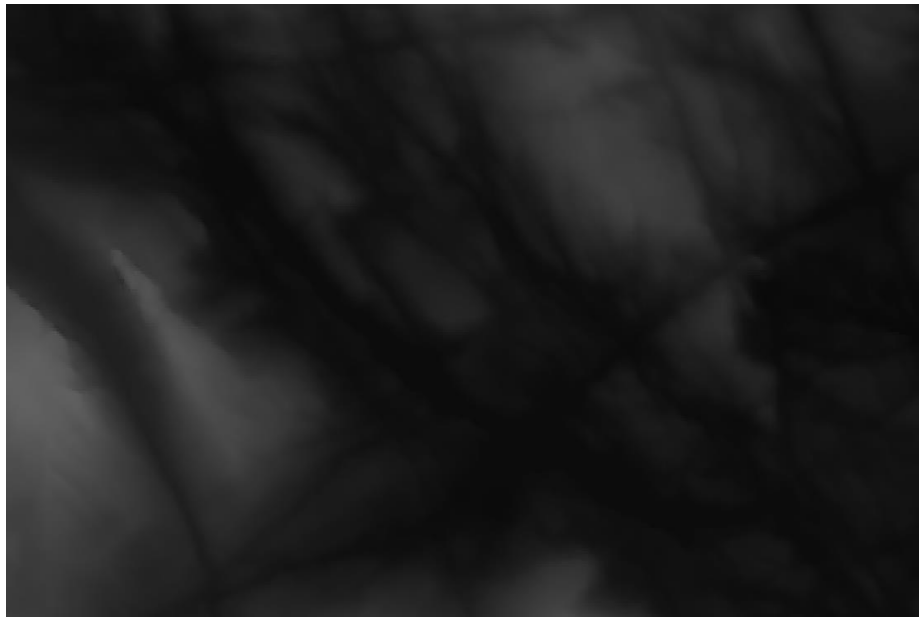
Εικόνα 23: Διαφορά μέσων όρων με κατώφλι $mean-3s$ σε μεγαλύτερη κλίμακα

Όμως, στις Εικόνες 21, 22 και 23 φαίνονται κόκκινα σημεία δηλαδή πλημμυρισμένα, εκτός από τις όχθες της λίμνης, σε σημεία με έντονο ανάγλυφο δηλαδή περιοχές με μεγάλη κλίση αλλά και σημεία εντός των υδάτινων επιφανειών τα οποία χρειάστηκε να εξαλειφθούν.

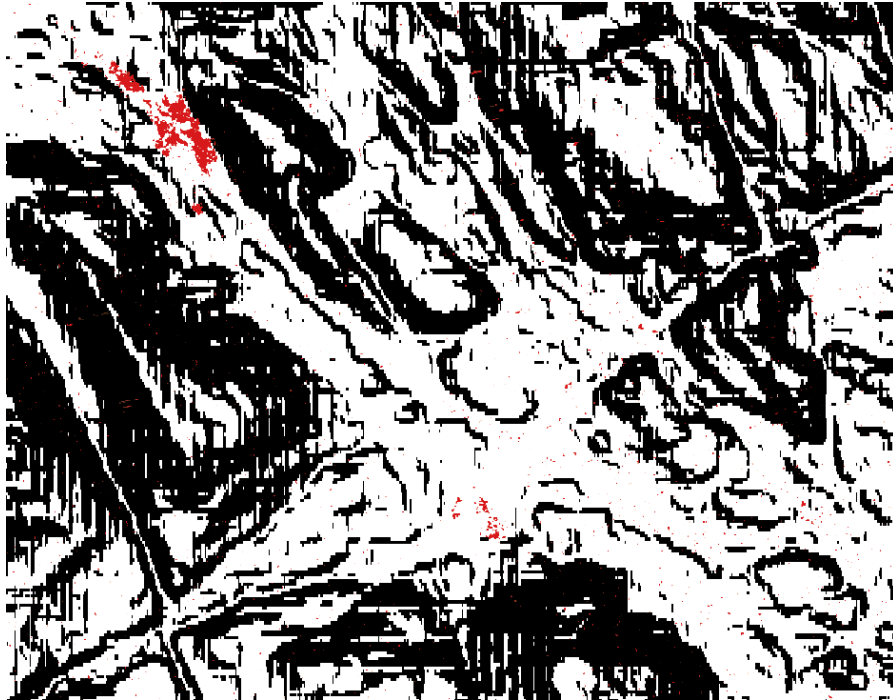
4.1.5 Μασκάρισμα - Απαλοιφή λανθασμένα «πλημμυρισμένων» σημείων

Πρώτα, δημιουργήθηκε ένα layer-μάσκα το οποίο θα εμφανίζει με την τιμή 1 τις πλημμυρισμένες περιοχές δηλαδή όσα εικονοστοιχεία είχαν τιμή μικρότερη από -6.5 και με την τιμή 0 όλα τα εικονοστοιχεία με τιμή μεγαλύτερη του -6.5. Αυτό έγινε ώστε να είναι δυνατόν να γίνουν πράξεις μεταξύ των layer για να αποκλειστούν από τις πλημμυρισμένες περιοχές οι περιοχές με μεγάλη κλίση και οι υδάτινες περιοχές.

Βρίσκοντας το Ψηφιακό Μοντέλου Εδάφους της περιοχής ενδιαφέροντος, δημιουργήθηκε ο χάρτης κλίσεων. Το εύρος των υψομέτρων του DEM ήταν από 63 μέτρα μέχρι 743 μέτρα, ενώ το εύρος των κλίσεων κυμαινόταν από 0 έως 89°. Εφαρμόστηκε ένα κατώφλι στις 12° στο χάρτη κλίσεων ώστε να εμφανίζονται οι απότομες κλίσεις, πάνω από 12° με μαύρο χρώμα και οι ομαλές κλίσεις κάτω από 12° με λευκό.



Εικόνα 24: DEM της περιοχής μελέτης



Εικόνα 25: Κλίσεις μικρότερες από 12° με λευκό χρώμα, κλίσεις μεγαλύτερες από 12° με μαύρο χρώμα

Ο χάρτης κλίσεων έχει τιμές 0 και 1, με 0 εμφανίζονται οι μαύρες περιοχές και με 1 οι λευκές. Ο σκοπός ήταν όταν πολλαπλασιαζόταν η μάσκα των κλίσεων με τη μάσκα της εικόνας των διαφορών, αυτές να πάρουν τιμή 0. Έτσι προέκυψε το παρακάτω αποτέλεσμα.



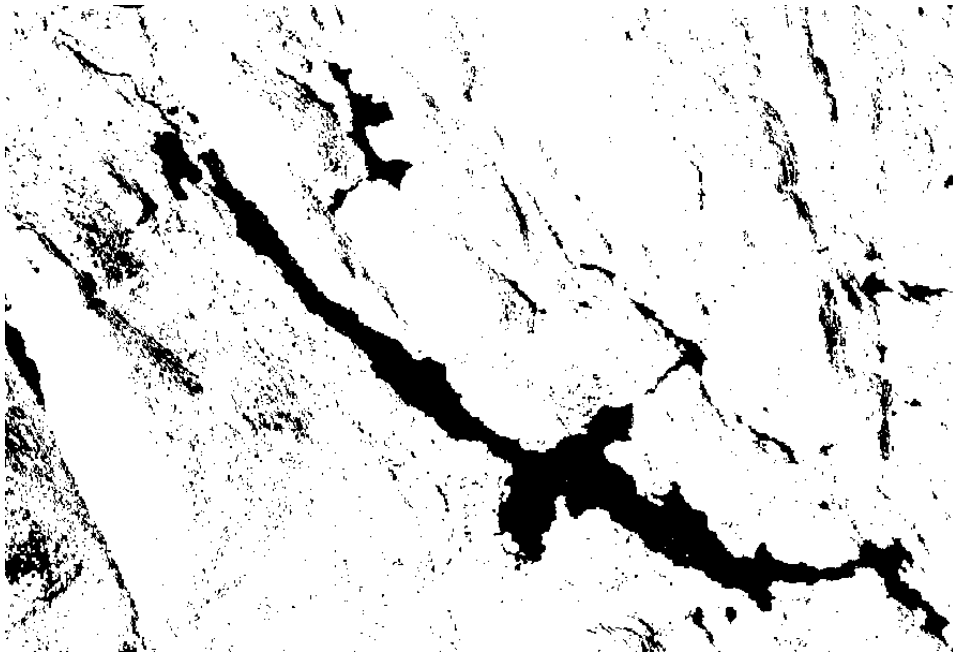
Εικόνα 26: Πολλαπλασιασμός μάσκας εικόνας διαφορών με τη μάσκα των απότομων κλίσεων

Το επόμενο βήμα ήταν να μην εμφανίζονται ως πλημμυρισμένα τα εικονοστοιχεία που ανήκουν σε υδάτινες περιοχές.

Το επίπεδο των υδάτινων περιοχών δημιουργήθηκε με τον εξής τρόπο: υπολογίστηκε ο μέσος όρος των εικόνων στις οποίες δεν είχε βροχή και έπειτα ορίστηκε ένα κατώφλι έτσι ώστε να φαίνονται οι περιοχές που έχουν τιμές οι οποίες αντιστοιχούν στις υδάτινες περιοχές.

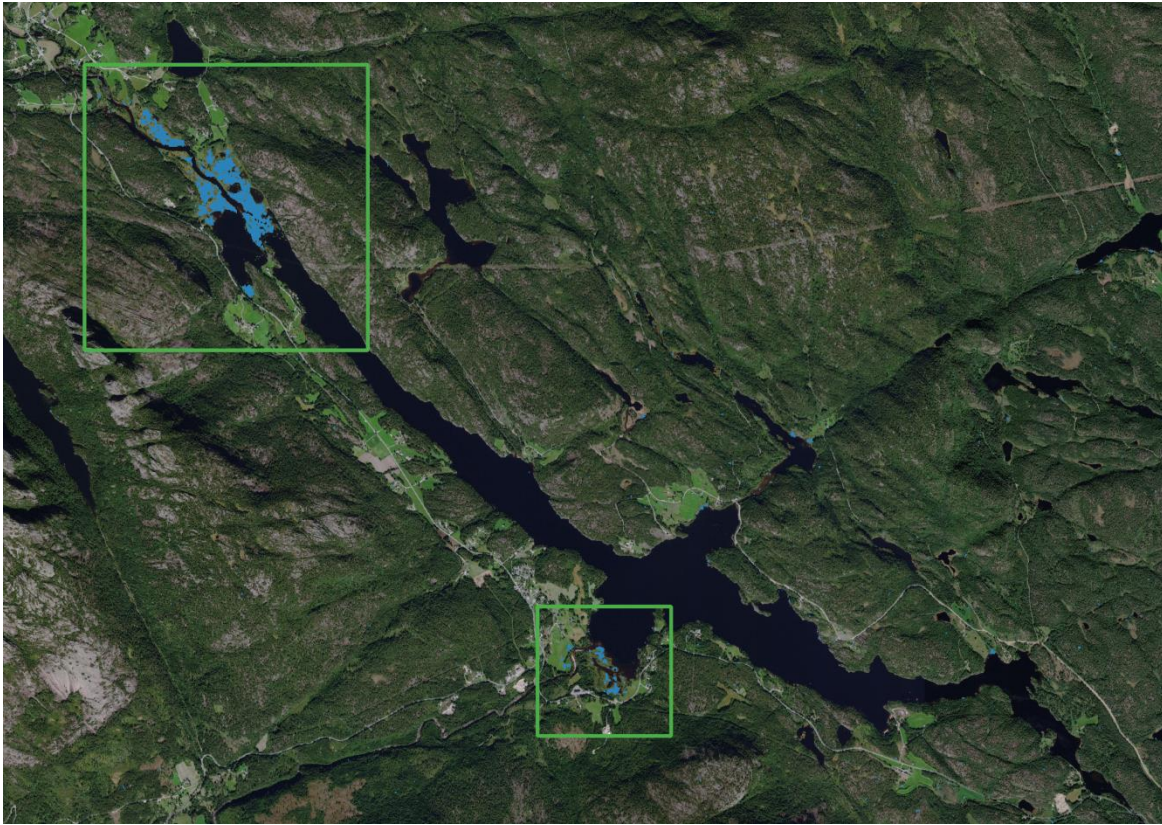
Μετά τη δημιουργία του επιπέδου με τις υδάτινες περιοχές, με την τιμή 1 φαίνονταν οι περιοχές με νερό και με 0 οι υπόλοιπες.

Για να μπορέσει να γίνει ο πολλαπλασιασμός του επιπέδου των υδάτινων περιοχών και του επιπέδου του γινόμενου των κλίσεων με τις πλημμυρισμένες περιοχές για να προκύψει το τελικό αποτέλεσμα, το επίπεδο των υδάτινων περιοχών άλλαξε έτσι ώστε οι περιοχές με νερό να έχουν τιμή 0 και οι υπόλοιπες περιοχές να έχουν τιμή ίση με 1.



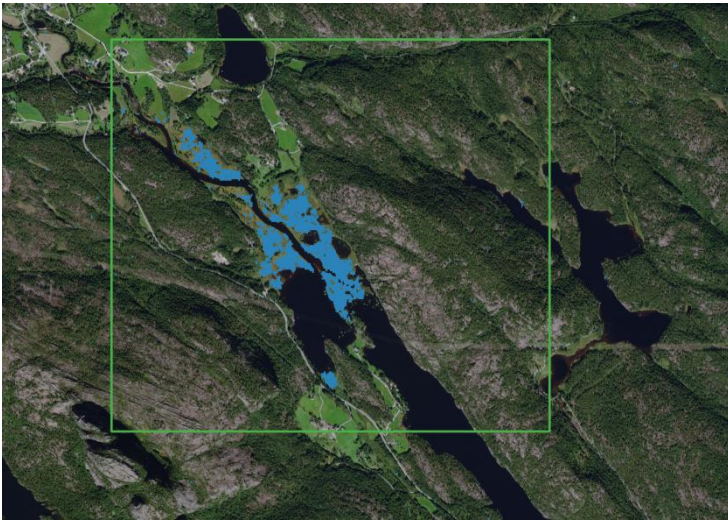
Εικόνα 27: Μάσκα υδάτινων περιοχών

Το γινόμενο αυτής της εικόνας με το γινόμενο των κλίσεων με τις πλημμυρισμένες περιοχές είχε ως αποτέλεσμα την παρακάτω εικόνα πλημμύρας, στην οποία με μπλε φαίνονται οι πλημμυρισμένες περιοχές.



Εικόνα 28: Πλημμυρισμένες περιοχές μετά το μασκάρισμα

Σε μεγαλύτερη κλίμακα:



Εικόνα 29: Αριστερά και Δεξιά: Πλημμυρισμένες περιοχές μετά το μασκάρισμα σε μεγαλύτερη κλίμακα

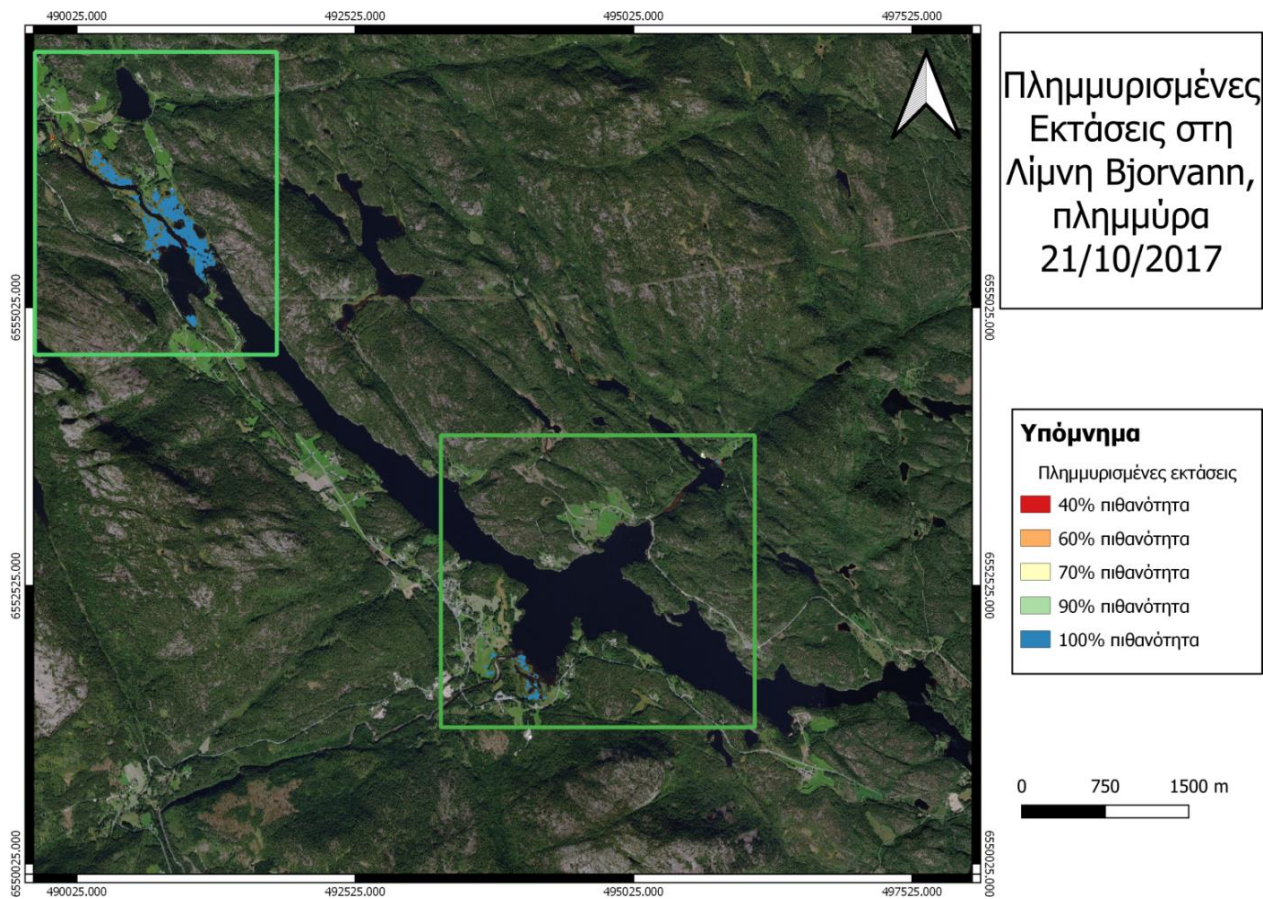
4.1.6. Εκτέλεση αλγορίθμου Otsu για βελτιστοποίηση του αποτελέσματος- Χάρτης πιθανοτήτων

Παρατηρείται ότι στα αποτελέσματα μετά τα μασκαρίσματα ότι παρέμειναν μερικά σημεία διάσπαρτα στην περιοχή μελέτης, τα οποία δεν έχουν αφαιρεθεί και παραμένουν ως πλημμυρισμένα. Επομένως κρίθηκε απαραίτητη η εφαρμογή της κατωφλίωσης με τη μέθοδο Otsu, ώστε να προκύψει και ο χάρτης πιθανότητας των πλημμυρισμένων εικονοστοιχείων.

Το μέγεθος του παραθύρου το οποίο ορίσθηκε ύστερα από δοκιμές ήταν μεγέθους 45x45 εικονοστοιχεία. Τα μικρότερα παράθυρα έχαναν κάποια πληροφορία, δηλαδή σε μεγάλες περιοχές οι οποίες ήταν πλημμυρισμένες εμφανίζονταν κενά. Τα μεγαλύτερα παράθυρα από την άλλη έχαναν κάποιες πληροφορίες από πιο μικρές πλημμυρισμένες περιοχές οι οποίες ήταν όμως σημαντικό να φανούν στο αποτέλεσμα.

Σχετικά με το ποσοστό των πλημμυρισμένων εικονοστοιχείων που θα έπρεπε να βρίσκονται εντός ενός παραθύρου ώστε να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της κατωφλίωσης, αποφασίστηκε για παράθυρο μεγέθους 45x45 να είναι αρκετά μικρό, δηλαδή της τάξης του 1,5%. Συνεπώς θα έπρεπε ο αριθμός των πλημμυρισμένων εικονοστοιχείων του παραθύρου να είναι μεγαλύτερος από το 1,5% του συνόλου των εικονοστοιχείων του παραθύρου ώστε να γίνει η διαδικασία της κατωφλίωσης.

Ο τελικός χάρτης πιθανότητας της πλημμύρας που συνέβη στις 21 Οκτωβρίου 2017 στην περιοχή Κράγκερο ήταν ο παρακάτω:



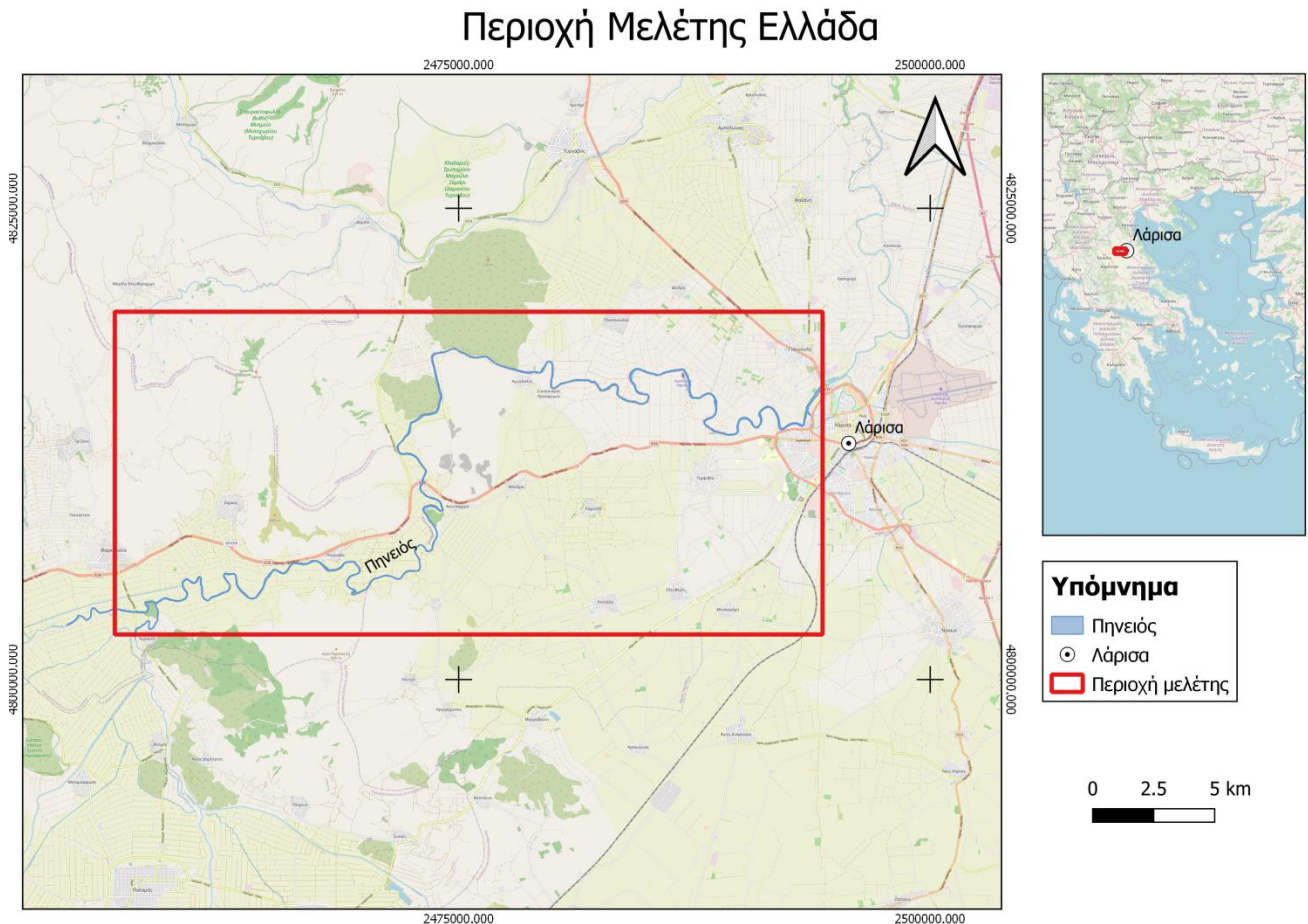
Εικόνα 30: Χάρτης πιθανότητας πλημμυρισμένων εκτάσεων 21/10/2017

Παραπάνω φαίνονται με μπλε χρώμα οι περιοχές οι οποίες είναι 100% πλημμυρισμένες εξαιτίας της βροχής στην περιοχή και παρατηρείται ότι βρίσκονται βορειοδυτικά και νότια της λίμνης. Είναι περιοχές με χαμηλό υψόμετρο, ίδιο με αυτό της λίμνης.

Λίγα σημεία είναι με κόκκινο και κίτρινο χρώμα, δηλαδή με μικρότερη πιθανότητα να είναι πλημμυρισμένα και βρίσκονται λίγο πιο μακριά από υδάτινες επιφάνειες.

4.2 Περιοχή μελέτης στην Ελλάδα – Αγροτική περιοχή

Το δεύτερο φαινόμενο πλημμύρας το οποίο μελετήθηκε ήταν αυτό της 28ης Φεβρουαρίου 2018 στη Θεσσαλία και συγκεκριμένα στις περιοχές που διασχίζει ο Πηνειός ποταμός. Φαινόμενα έντονων βροχοπτώσεων στην περιοχή μελέτης οδήγησαν σε υπερχειλίση του ποταμού και σε πλημμύρα των καλλιεργειών και των αγροτικών περιοχών που διαπερνώνται από τον Πηνειό.



Εικόνα 31: Χάρτης Περιοχής Μελέτης στην Ελλάδα

4.2.1 Εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν

Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για την χαρτογράφηση της πλημμύρας της 28^{ης} Φεβρουαρίου για τον Πηνειό ποταμό ήταν Sentinel 1, από την τροχιά 80 κατά την καθοδική πορεία του δορυφόρου.

Οι ημερομηνίες των εικόνων οι οποίες λήφθηκαν ήταν από 3 μήνες πριν την πλημμύρα, ενώ για τη μελέτη της εξέλιξης του φαινομένου λήφθηκαν και δύο εικόνες μετά την ημερομηνία της 28^{ης} Φεβρουαρίου 2017.

Πίνακας 7: Εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για την πλημμύρα στον Πηνειό

S1A_IW_GRDH_1SDV_20171124T043911_20171124T043936_019402_020E7A_04CC
S1B_IW_GRDH_1SDV_20171130T043835_20171130T043900_008506_00F161_4A57
S1A_IW_GRDH_1SDV_20171206T043910_20171206T043935_019577_0213F8_F671
S1B_IW_GRDH_1SDV_20171212T043834_20171212T043859_008681_00F6F0_3873
S1A_IW_GRDH_1SDV_20171218T043910_20171218T043935_019752_021966_A01F
S1B_IW_GRDH_1SDV_20171224T043834_20171224T043859_008856_00FC85_9D7E
S1A_IW_GRDH_1SDV_20171230T043909_20171230T043934_019927_021ED3_4EF2
S1B_IW_GRDH_1SDV_20180105T043833_20180105T043858_009031_010234_0F6C
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180111T043909_20180111T043934_020102_02245A_9FBA
S1B_IW_GRDH_1SDV_20180117T043833_20180117T043858_009206_0107E0_272E
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180123T043909_20180123T043934_020277_0229E8_6161
S1B_IW_GRDH_1SDV_20180129T043833_20180129T043858_009381_010D98_5ED0
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180204T043908_20180204T043933_020452_022F7E_7CA1
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180216T043908_20180216T043933_020627_023512_79BF
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180228T043908_20180228T043933_020802_023AAB_47CC
S1B_IW_GRDH_1SDV_20180306T043832_20180306T043857_009906_011EFB_4ACO
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180312T043908_20180312T043933_020977_02402B_C6E3

Οι παραπάνω εικόνες στον Πίνακα 7 αποτελούν τη χρονοσειρά εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν για την περίπτωση του Πηνειού ποταμού. Είναι ταξινομημένες με χρονολογική σειρά, από την ημερομηνία 24 Νοεμβρίου 2017 μέχρι και την εικόνα με ημερομηνία λήψης 12 Μαρτίου 2018. Ως εικόνα πλημμύρας ορίσθηκε η εικόνα με ημερομηνία λήψης 28 Φεβρουαρίου 2018. Οι εικόνες από 24 Νοεμβρίου 2017 μέχρι 30 Δεκεμβρίου 2017 χρησιμοποιήθηκαν για την παρακολούθηση της περιοχής σε μη βροχερές καιρικές συνθήκες, ενώ οι εικόνες με ημερομηνίες λήψης 6 Μαρτίου 2018 και 12 Μαρτίου 2018 χρησιμοποιήθηκαν για την παρακολούθηση της πλημμύρας.

Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας και τη χαρτογράφηση των εκτάσεων που υπέστησαν τις επιπτώσεις των έντονων βροχοπτώσεων στις ημερομηνίες από 26 Φεβρουαρίου 2018 έως 28 Φεβρουαρίου 2018 στην περιοχή, χρησιμοποιήθηκαν 8 εικόνες: η εικόνα της πλημμύρας και άλλες 7 εικόνες με ημερομηνίες λήψης πριν από αυτή. Πιο συγκεκριμένα, οι ημερομηνίες των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι παρακάτω:

- 5 Ιανουαρίου 2018
- 11 Ιανουαρίου 2018
- 17 Ιανουαρίου 2018
- 23 Ιανουαρίου 2018
- 29 Ιανουαρίου 2018
- 4 Φεβρουαρίου 2018
- 16 Φεβρουαρίου 2018 και
- 28 Φεβρουαρίου 2018

Οι εικόνες αυτές επιλέχθηκαν ως εικόνες κατά τις οποίες οι καιρικές συνθήκες δεν ήταν βροχερές, πέρα από την εικόνα της 28^{ης} Φεβρουαρίου, η οποία μελετάται ως πλημμυρισμένη εικόνα. Λήφθηκαν τα δεδομένα του καιρού από την ιστοσελίδα <http://meteosearch.meteo.gr/> για το και το αντίστοιχο διάγραμμα με τα χιλιοστά βροχής που έπεσαν στην περιοχή στο χρονικό διάστημα από 5 Ιανουαρίου 2018 έως και 12 Μαρτίου 2018. Τα χιλιοστά βροχής που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα αποτελούν το άθροισμα των χιλιοστών βροχής των τριών προηγούμενων ημερών από τις ημερομηνίες που φαίνονται στην πρώτη στήλη του πίνακα.

Πίνακας 8: Χιλιοστά βροχής Πηνειός 2018

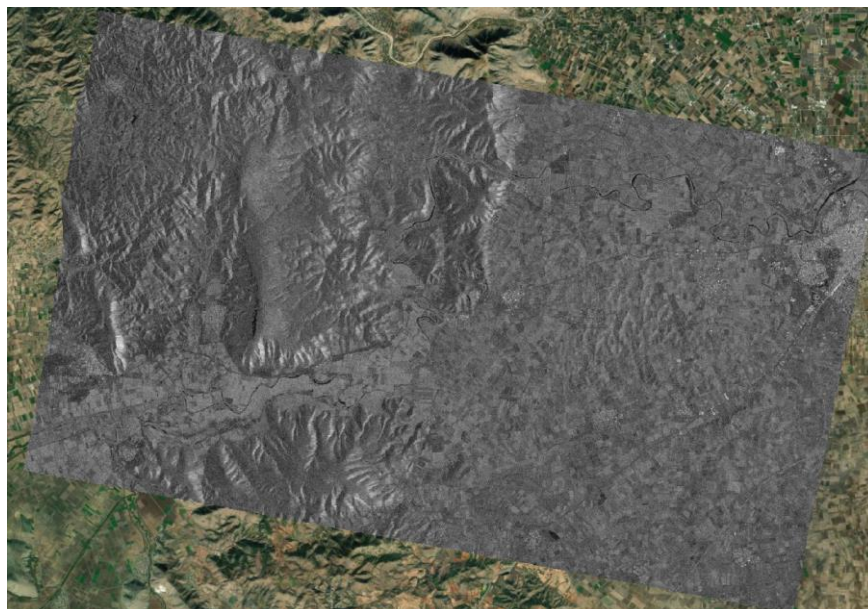
Ημερομηνίες	Χιλιοστά Βροχής
5-Ιαν-18	3
11-Ιαν-18	0
17-Ιαν-18	0
23-Ιαν-18	4.8
29-Ιαν-18	0
4-Φεβ-18	0
16-Φεβ-18	13.4
28-Φεβ-18	44.4
6-Μαρ-18	11.2
12-Μαρ-18	0



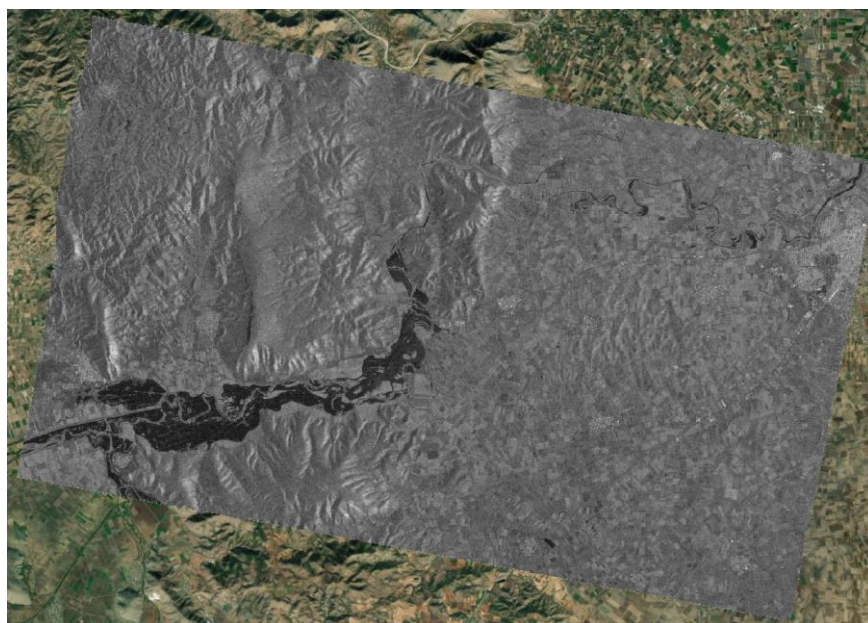
Διάγραμμα 2: Χιλιοστά βροχής στον Πηνειό ποταμό, ημερομηνίες 5 Ιανουαρίου 2018 έως 12 Μαρτίου 2018

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα, έγινε η επιλογή των εικόνων που θα χρησιμοποιούνταν για την χαρτογράφηση της πλημμύρας στις 28 Φεβρουαρίου 2018. Επιλέχθηκαν όλες οι εικόνες από 5 Ιανουαρίου 2018 μέχρι 28 Φεβρουαρίου 2018 εφόσον σε καμία από αυτές δεν υπήρχε βροχή. Παρατηρείται ότι στην ημερομηνία 28 Φεβρουαρίου 2018 τα χιλιοστά βροχής είναι τα περισσότερα, μάλιστα κατά πολύ παραπάνω συγκριτικά με τις υπόλοιπες ημερομηνίες.

Μετά την προεπεξεργασία των εικόνων στο SNAP, οι εικόνες που προέκυψαν είναι όπως αυτές που φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 32: 16 Φεβρουαρίου 2018



Εικόνα 33: 28 Φεβρουαρίου 2018

Στις παραπάνω εικόνες φαίνονται καθαρά οι διαφορές των περιοχών οι οποίες πλημμύρισαν. Οι περιοχές οι οποίες πλημμύρισαν φαίνονται με πιο σκούρο χρώμα γύρω από τον ποταμό, αφού το νερό έχει χαμηλές τιμές οπισθοσκέδασης και φαίνεται πάντα σκούρο σε σχέση με άλλες γήινες επιφάνειες ξηράς.

4.2.2 Αφαίρεση εικόνων με χρονολογική σειρά

Το επόμενο στάδιο ήταν να γίνουν οι αφαιρέσεις των εικόνων με χρονολογική σειρά έτσι ώστε να φανούν οι διαφορές των εικονοστοιχείων στο χρονικό διάστημα πριν και κατά τη διάρκεια της πλημμύρας. Έτσι, έγιναν οι αφαιρέσεις των εικόνων χωρίς την πλημμύρα, από την πιο πρόσφατη στην πιο παλιά χρονικά και έπειτα έγιναν οι αφαιρέσεις της εικόνας της πλημμύρας με όλες τις προηγούμενες της.

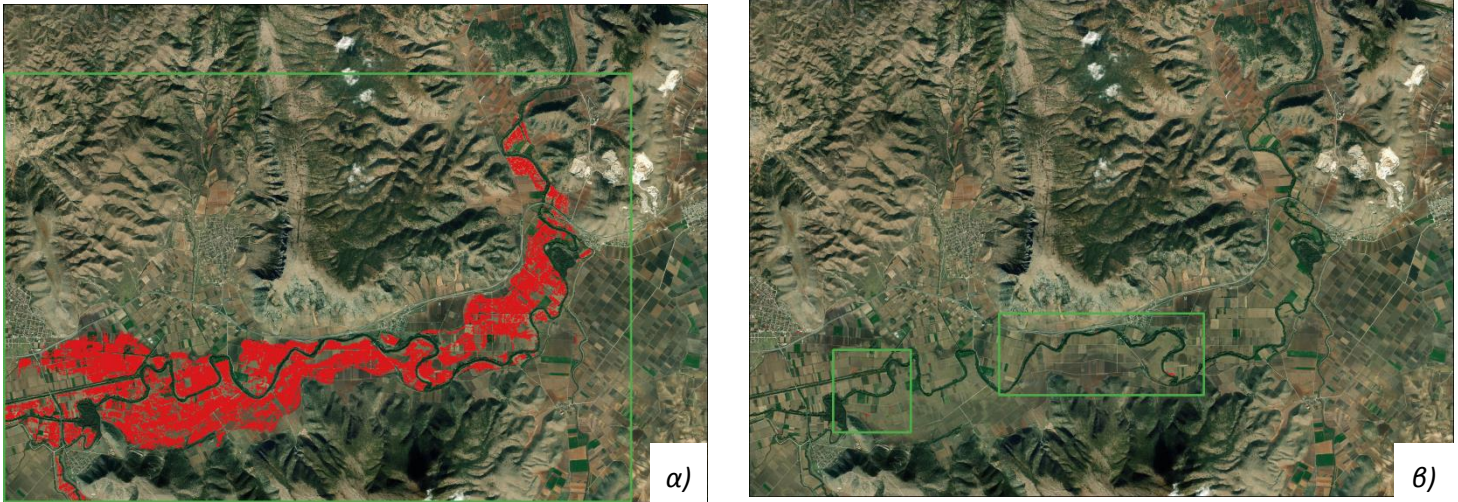
Πίνακας 9: Αφαιρέσεις εικόνων χωρίς την εικόνα της πλημμύρας

Αφαίρεση εικόνων 16-02-2018 με 04-02-2018
Αφαίρεση εικόνων 16-02-2018 με 29-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 16-02-2018 με 23-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 16-02-2018 με 17-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 16-02-2018 με 11-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 16-02-2018 με 05-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 04-02-2018 με 29-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 04-02-2018 με 23-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 04-02-2018 με 17-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 04-02-2018 με 11-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 04-02-2018 με 05-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 29-01-2018 με 23-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 29-01-2018 με 17-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 29-01-2018 με 11-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 29-01-2018 με 05-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 23-01-2018 με 17-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 23-01-2018 με 11-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 23-01-2018 με 05-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 17-01-2018 με 11-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 17-01-2018 με 05-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 11-01-2018 με 05-01-2018

Πίνακας 10: Αφαιρέσεις μεταξύ της εικόνας πλημμύρας και των προηγούμενων εικόνων της χρονοσειράς

Αφαίρεση εικόνων 28-02-2018 με 16-02-2018
Αφαίρεση εικόνων 28-02-2018 με 04-02-2018
Αφαίρεση εικόνων 28-02-2018 με 29-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 28-02-2018 με 23-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 28-02-2018 με 17-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 28-02-2018 με 11-01-2018
Αφαίρεση εικόνων 28-02-2018 με 05-01-2018

Παρακάτω φαίνονται δύο παραδείγματα αφαίρεσης των εικόνων, μία αφαίρεση μεταξύ της πλημμυρισμένης εικόνας και μιας εικόνας με ημερομηνία λήψης πριν την πλημμύρα και μία αφαίρεση δύο εικόνων πριν την πλημμύρα. Πιο συγκεκριμένα, φαίνονται δύο αφαιρέσεις εικόνων με κατώφλι $mean-3s$, ώστε να φαίνονται μόνο οι μεγαλύτερες διαφορές αρνητικού πρόσημου με κόκκινο χρώμα στην εικόνα του υποβάθρου που ήταν διαθέσιμη από ESRI World Imagery.



Εικόνα 34: Διαφορές εικόνων α) εικόνας 28-02-2018 με εικόνα 16-02-2018 β) εικόνας 16-02-2018 με εικόνα 11-01-2018

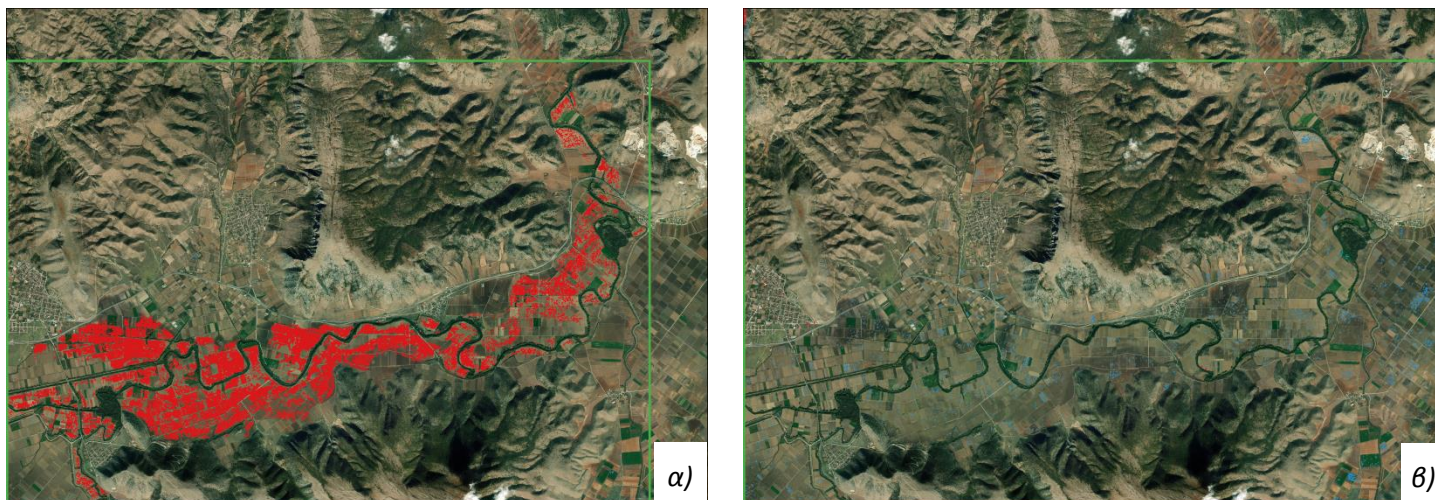
Στις παραπάνω εικόνες φαίνονται με κόκκινο χρώμα οι μεγαλύτερες αρνητικές διαφορές μεταξύ των εικονοστοιχείων. Στην Εικόνα 34 (α) τα σημεία με τις μεγαλύτερες διαφορές είναι πολύ περισσότερα σε σχέση με αυτά της Εικόνας 34 (β).

Οι τιμές των κόκκινων εικονοστοιχείων είναι αρνητικές και πιο συγκεκριμένα προέκυψαν από την κατωφλίωση των δύο εικόνων με το κατώφλι ($mean-3*std$). Όσον αφορά την Εικόνα 34(α), οι αρνητικές τιμές σημαίνουν ότι κατά την αφαίρεση των εικόνων μεταξύ τους, η εικόνα της πλημμύρας (28-02-2018) είχε μικρότερες τιμές στα συγκεκριμένα εικονοστοιχεία από την εικόνα με ημερομηνία λήψης 16-02-2018, δηλαδή από την αμέσως προηγούμενή της στη χρονοσειρά.

Στην Εικόνα 34(β) τα σημεία με κόκκινο χρώμα είναι πολύ λίγα, το οποίο σημαίνει ότι οι δύο εικόνες οι οποίες συμμετείχαν στην αφαίρεση (16-02-2018 και 11-01-2018) είχαν παρόμοια συμπεριφορά (δηλαδή μικρές διαφορές) στα σημεία τα οποία στην Εικόνα 34(α) φαίνονται με κόκκινο χρώμα.

4.2.3 Εικόνες μέσου όρου των διαφορών

Έπειτα υπολογίστηκαν οι δύο εικόνες μέσου όρου των διαφορών των εικόνων. Υπολογίστηκαν δύο μέσοι όροι, ένας μέσος όρος των διαφορών των εικόνων που συμμετείχε η εικόνα πλημμύρας, και ένας μέσος όρος των διαφορών στις οποίες συμμετείχαν μόνο οι εικόνες χωρίς βροχόπτωση. Με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκαν δύο νέες εικόνες οι οποίες απεικόνιζαν τις αλλαγές που έγιναν στην περιοχή εξαιτίας της βροχόπτωσης και τις αλλαγές που έγιναν στην περιοχή σε κανονικές συνθήκες, χωρίς βροχή.



Εικόνα 35: α) Μέσος όρος διαφορών της εικόνας πλημμύρας β) Μέσος όρος διαφορών των εικόνων χωρίς βροχή

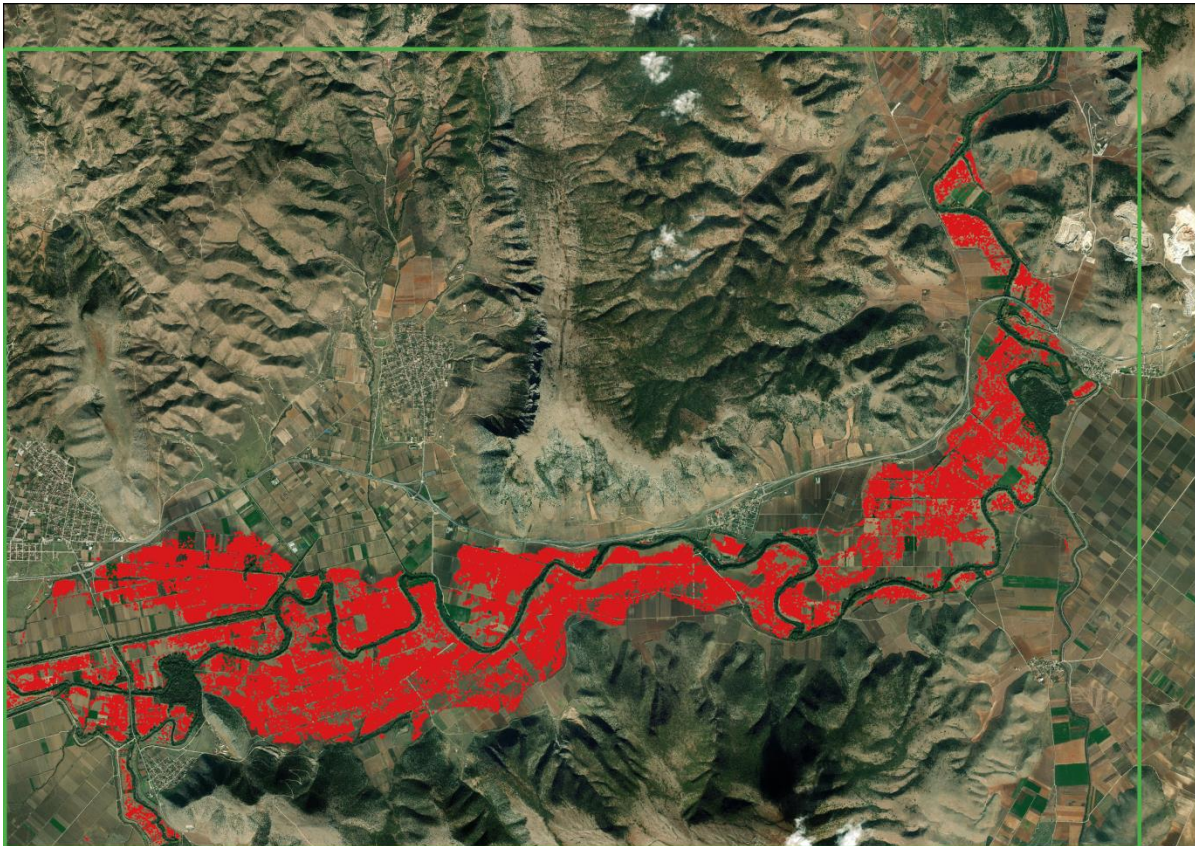
Παραπάνω φαίνονται τα σημεία με τις μικρότερες (κόκκινο χρώμα) και τις μεγαλύτερες τιμές (μπλε χρώμα) από τις εικόνες μέσου όρου των διαφορών με την εικόνα πλημμύρας και χωρίς αυτή. Στην εικόνα 35(α) φαίνονται ως επί το πλείστον κόκκινα εικονοστοιχεία, σε αντίθεση με τη διπλανή εικόνα στην οποία κυριαρχεί το μπλε χρώμα στις διαφορές των εικονοστοιχείων.

Οι εικόνες αυτές δείχνουν αν κατά μέσο όρο οι διαφορές των εικόνων χρονικά ήταν θετικές ή αρνητικές. Στην Εικόνα 35(α) οι τιμές των εικονοστοιχείων οι οποίες είναι αρνητικές δείχνουν, όπως ειπώθηκε και παραπάνω, ότι η εικόνα της πλημμύρας είχε κατά μέσο όρο αρκετά χαμηλότερη οπισθοσκέδαση στα σημεία με κόκκινο χρώμα απ' ό,τι οι εικόνες χωρίς βροχή.

Στην Εικόνα 35(β) φαίνονται ορισμένα μπλε σημεία, δηλαδή εικονοστοιχεία με θετικές τιμές, πράγμα το οποίο δείχνει ότι κατά μέσο όρο στα συγκεκριμένα σημεία υπήρξε μια αύξηση των τιμών οπισθοσκέδασής τους και οι διαφορές τους με τις άλλες εικόνες είχαν θετικό πρόσημο. Αυτά τα σημεία όμως, δε φαίνονται να υπάρχουν στην εικόνα 35(α), δηλαδή στο μέσο όρο των διαφορών των εικόνων με την εικόνα της πλημμύρας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τιμές των εικονοστοιχείων στην εικόνα της πλημμύρας μειώθηκαν εξαιτίας του νερού και στις αφαιρέσεις της με τις εικόνες ξηρασίας δεν υπήρχε κάποιο αποτέλεσμα μεγάλης διαφοράς τιμών ώστε να φανούν με μπλε ή κόκκινο χρώμα.

4.2.4 Διαφορά των εικόνων μέσου όρου- Κατωφλίωση

Το επόμενο βήμα ήταν να γίνει η αφαίρεση των δύο εικόνων μέσου όρου για να τονισθούν τα σημεία με τις μεγαλύτερες διαφορές στις τιμές τους με και χωρίς την κατάσταση της πλημμύρας.



Εικόνα 36: Διαφορά των μέσων όρων με κατώφλι $mean-3std$

Στην εικόνα διαφορών των μέσων όρων με κόκκινο χρώμα φαίνονται οι τιμές των εικονοστοιχείων τα οποία επηρεάστηκαν περισσότερο από την πλημμύρα της 28^{ης} Φεβρουαρίου 2018.

Η πράξη της αφαίρεσης ήταν «μέσος όρος διαφορών της πλημμυρισμένης εικόνας – μέσος όρος διαφορών χωρίς την πλημμυρισμένη εικόνα». Έτσι, οι αρνητικές τιμές των εικονοστοιχείων οφείλονται στο ότι η εικόνα μέσου όρου διαφορών με την πλημμυρισμένη εικόνα είχε μικρότερες τιμές οπισθοσκέδασης στα σημεία με κόκκινο χρώμα σχετικά με την εικόνα μέσου όρου των διαφορών χωρίς την πλημμυρισμένη εικόνα.

Το βέλτιστο κατώφλι για την εικόνα της διαφοράς των μέσων όρων εκτιμήθηκε με την ίδια στατιστική σχέση που εκτιμήθηκε στην προηγούμενη εφαρμογή. Δηλαδή $mean-3std$ (η μέση τιμή του ιστογράμματος της εικόνας μείον 3 φορές την τυπική απόκλιση). Έτσι απομονώθηκαν τα εικονοστοιχεία με τις μικρότερες τιμές. Στην περίπτωση της εικόνας αυτής, ίσχυε ότι: $mean-3std = -14.92$, $mean = 0.41$, οπότε το κατώφλι ήταν ίσο με $-3std = -14.92 - 0.41 = -15.33$.

Έτσι στην Εικόνα 36 φαίνονται τα σημεία με τιμή μικρότερη από -15.33. Τα εικονοστοιχεία αυτά θεωρήθηκαν αυτά που ήταν πιθανότερο να είναι πλημμυρισμένα, καθώς ήταν αυτά με τη μεγαλύτερη μείωση της τιμής τους στη χρονοσειρά.

Μετά από την κατωφλίωση αυτή, δε χρειάστηκε κάποιο μασκάρισμα επειδή τα εικονοστοιχεία της εικόνας κάτω από το κατώφλι που ορίστηκε, έχουν χαμηλές τιμές μόνο σε πεδινά σημεία, σε καλλιέργειες, σε σημεία δηλαδή με χαμηλό υψόμετρο και με σχεδόν μηδενική κλίση. Ακόμα, δεν εμφανίζονται ως πλημμυρισμένα σημεία εικονοστοιχεία εντός του Πηνειού ποταμού, οπότε δε χρειάστηκε ούτε μάσκα υδάτινων στοιχείων.

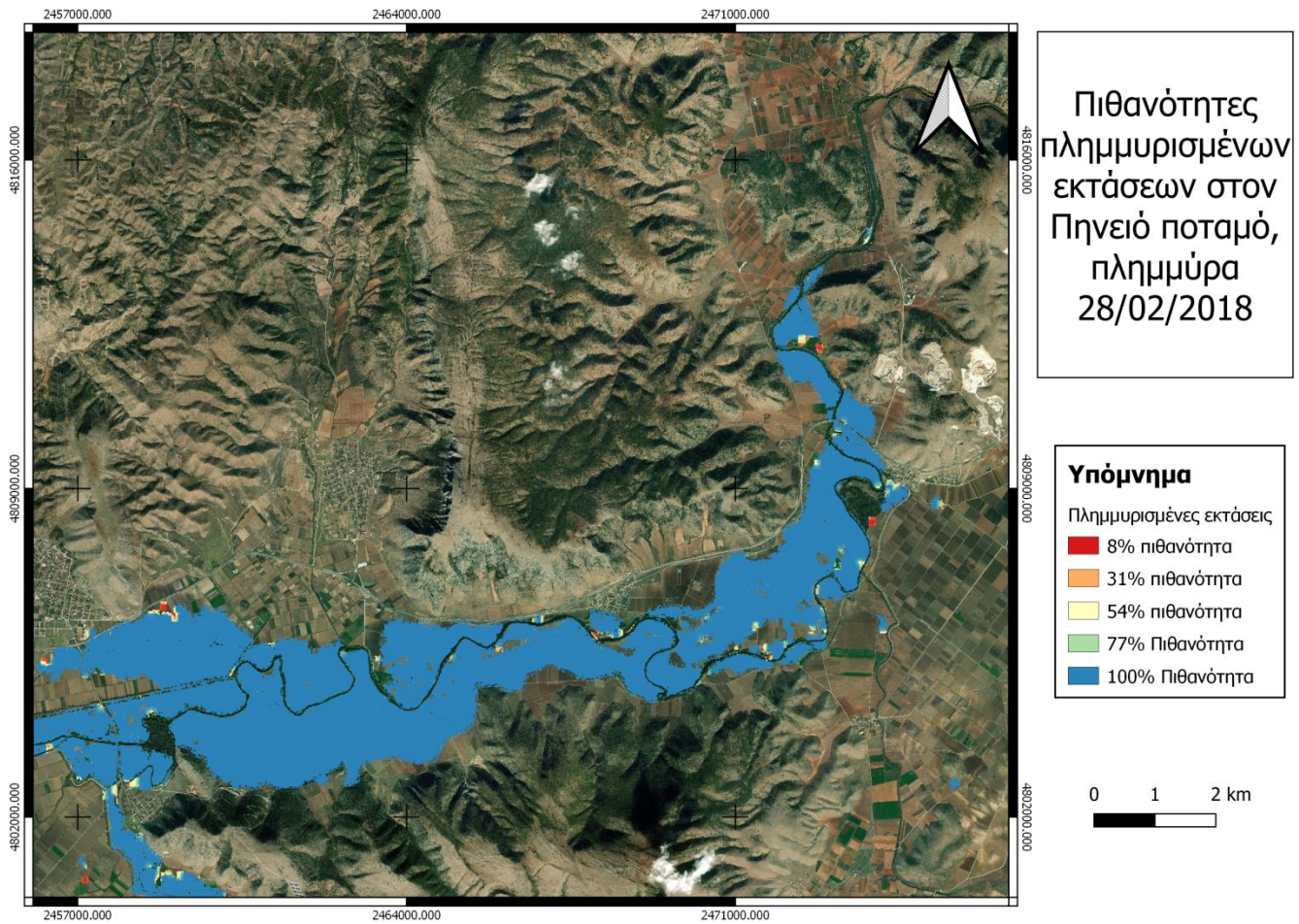
4.2.5 Εκτέλεση αλγορίθμου Otsu για βελτιστοποίηση του αποτελέσματος- Χάρτης πιθανοτήτων

Το επόμενο και τελευταίο βήμα για να προκύψει ο χάρτης πιθανοτήτων της πλημμύρας του Πηνειού ήταν να εφαρμοσθεί ο αλγόριθμος Otsu στην εικόνα της διαφοράς των μέσων όρων. Για να γίνει αυτό, δημιουργήθηκε μια εικόνα ίδιων διαστάσεων με την εικόνα της διαφοράς των μέσων όρων με στοιχεία μόνο 0 και 1. Τιμή 1 είχαν όσα εικονοστοιχεία είχαν τιμή κάτω από το κατώφλι $mean-3std$ στην εικόνα διαφοράς των μέσων όρων, ενώ τιμή 0 είχαν τα εικονοστοιχεία τα οποία στην εικόνα της διαφοράς των μέσων όρων είχαν τιμή μεγαλύτερη από το κατώφλι που ορίστηκε.

Επειδή όπως προαναφέρθηκε, τα σημεία με τιμή μικρότερη του κατωφλιού ήταν γύρω από το ποτάμι και όχι διάσπαρτα στην εικόνα, δε χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν τα κεντροειδή. Έτσι, εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος με τα παράθυρα και το κατώφλι χωρίς αυτά. Ο αλγόριθμος σε κάθε σημείο με τιμή 1 της δυαδικής εικόνας δημιουργούσε γύρω του ένα παράθυρο με συγκεκριμένο μέγεθος και αν αυτό το παράθυρο περιείχε περισσότερα εικονοστοιχεία με τιμή 1 από ένα ποσοστό που οριζόταν από το χρήστη, τότε έκανε τη μέθοδο Otsu. Επιπλέον, μετρούνταν οι φορές που κάθε εικονοστοιχείο άνηκε σε κάποιο παράθυρο. Παράλληλα όσα εικονοστοιχεία ταξινομούνταν με τιμή 1, δηλαδή ως πλημμυρισμένα από τον αλγόριθμο Otsu, αθροίζονταν όσες φορές ταξινομούνταν ως πλημμυρισμένα. Διαιρώντας το άθροισμα του πόσες φορές κάθε εικονοστοιχείο ταξινομήθηκε ως πλημμυρισμένο με τον αριθμό που μετρούσε πόσες φορές άνηκε σε κάποιο παράθυρο, προέκυψαν οι πιθανότητες του κάθε εικονοστοιχείου να είναι πλημμυρισμένο.

Μετά από δοκιμές, το παράθυρο και το κατώφλι τα οποία είχαν το βέλτιστο αποτέλεσμα ήταν: μέγεθος παραθύρου 15x15 και κατώφλι 4%. Το παράθυρο (15x15) είναι μικρότερο από αυτό της προηγούμενης εφαρμογής της μεθόδου (45x45) αλλά αυτό είναι λογικό γιατί σε πεδινές αγροτικές περιοχές δεν έχουμε μεγάλη διασπορά των σημείων που δείχνουν ότι πιθανώς είναι πλημμύρα, οπότε δεν εφαρμόζεται εκτίμηση κεντροειδών, αλλά εφαρμόζεται σε όλα τα πιθανά εικονοστοιχεία πλημμύρας. Επομένως το μικρότερο παράθυρο ανιχνεύει καλύτερα λεπτομέρειες πλημμύρας στα όρια μεγάλων συμπαγών εκτάσεων .

Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 37: Πλημμύρα 28/02/2018, Πηνειός ποταμός

Στον παραπάνω χάρτη, με μπλε χρώμα φαίνονται οι περιοχές οι οποίες σύμφωνα με τον αλγόριθμο είναι σίγουρα πλημμυρισμένες. Στα άκρα των μπλε περιοχών σε μερικά σημεία υπάρχουν περιοχές με πράσινο, κίτρινο, πορτοκαλί και κόκκινο χρώμα, που σημαίνει ότι πρόκειται για περιοχές με μικρότερα ποσοστά πιθανότητας να είναι πλημμυρισμένα. Όπως φαίνεται και στο υπόμνημα, οι περιοχές με κόκκινο χρώμα αποτελούν τις περιοχές με μικρότερη πιθανότητα να είναι πλημμυρισμένες. Είναι περιοχές συνήθως πιο απομακρυσμένες από την περιοχή του ποταμού.

4.3 Περιοχή μελέτης στην Ιταλία – Αστική περιοχή

Το τελευταίο φαινόμενο πλημμύρας το οποίο μελετήθηκε ήταν αυτό που έγινε στη Βόρεια Ιταλία και συγκεκριμένα στην περιοχή της Βενετίας στις 12 Νοεμβρίου 2019, το οποίο προκλήθηκε από έντονες βροχοπτώσεις στην περιοχή. Οι βροχοπτώσεις ήταν τόσο δυνατές σε σημείο που το νερό το οποίο μετρήθηκε έφτασε μέχρι και τα 187 εκατοστά βροχής εκείνη την ημερομηνία σε περιοχές της Βόρειας Ιταλίας. Πλημμύρισε περισσότερο από το 85% της Βενετίας.

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα βροχής σε χιλιοστά τις ημερομηνίες πριν και μετά την πλημμύρα. Το διάγραμμα δημιουργήθηκε μέσω δεδομένων από την ιστοσελίδα: <https://www.worldweatheronline.com/>.

Πίνακας 11: Ημερομηνία και χιλιοστά νερού, Βενετία 2019

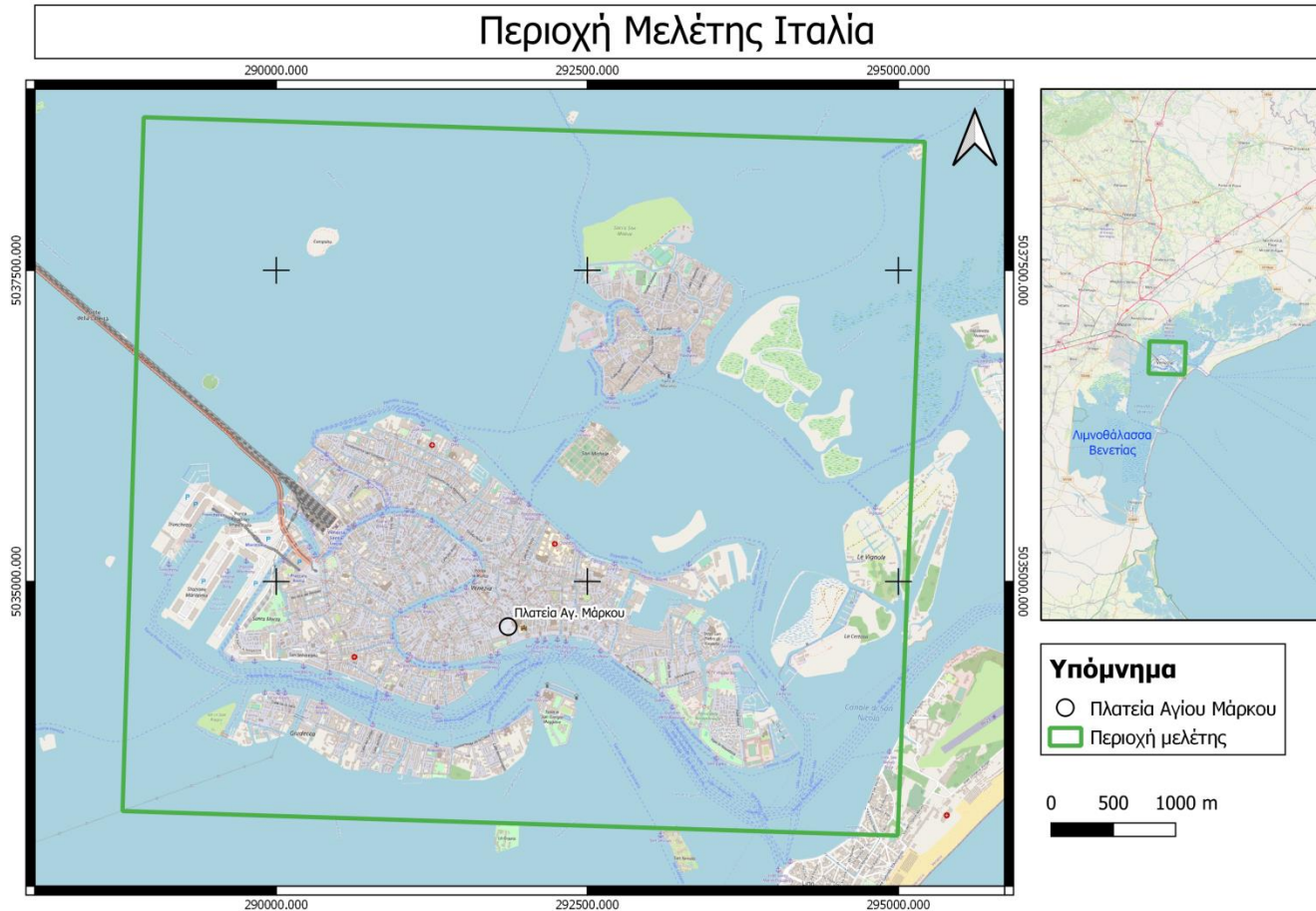
Ημερομηνία	Χιλιοστά βροχής
22/10/2019	0.5
28/10/2019	0
3/11/2019	24.2
9/11/2019	8.5
11/11/2019	1.2
12/11/2019	9
13/11/2019	16.9
15/11/2019	49.5
16/11/2019	8.3
21/11/2019	0



Διάγραμμα 3: Διάγραμμα βροχής, Βενετία, Νοέμβριος 2019

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 3, παρατηρείται άνοδος των χιλιοστών βροχόπτωσης κατά τις αρχές και τα μέσα Νοεμβρίου. Η μεγαλύτερη άνοδος βρίσκεται στις ημερομηνίες στα μέσα Νοέμβρη που φτάνουν οι τιμές τα 49.5 χιλιοστά βροχής στις 15 Νοεμβρίου 2018.

Η περιοχή μελέτης φαίνεται στον παρακάτω χάρτη:



Εικόνα 38: Περιοχή μελέτης, Βενετία (Πηγή: Open Street Map)

4.3.1 Εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν

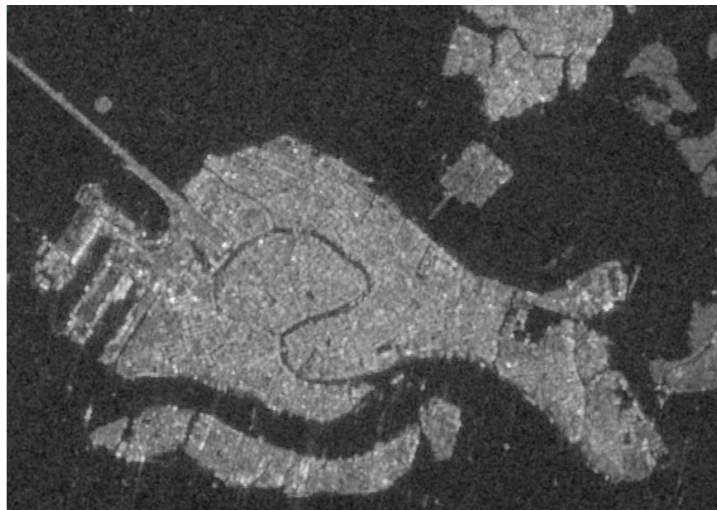
Η περίπτωση της Βενετίας είχε την ιδιαιτερότητα ότι το περιβάλλον της είναι αστικό. Αυτό έχει ως συνέπεια ότι γίνονται διαρκώς αλλαγές στην επιφάνειά της. Επειδή οι εικόνες απεικόνιζαν πολλές αλλαγές διαφορετικής έντασης και χωρικής ανάλυσης στο έδαφος, είτε πριν ή μετά την πλημμύρα, η επεξεργασία χρονοσειράς δεν ευνοεί στην ανίχνευση σταθερού μηχανισμού οπισθοσκέδασης. Επομένως, η μέθοδος τροποποιήθηκε και στην περίπτωση της Βενετίας χρησιμοποιήθηκαν μόνο τρεις εικόνες: μία εικόνα με ημερομηνία λήψης κοντά στην ημερομηνία της πλημμύρας και δύο εικόνες αρκετά πριν την ημερομηνία της πλημμύρας κατά την οποία οι καιρικές συνθήκες δεν ήταν βροχερές.

Πιο συγκεκριμένα, οι εικόνες άνηκαν στην τροχιά 95 και λήφθηκαν κατά την καθοδική πορεία του δορυφόρου.

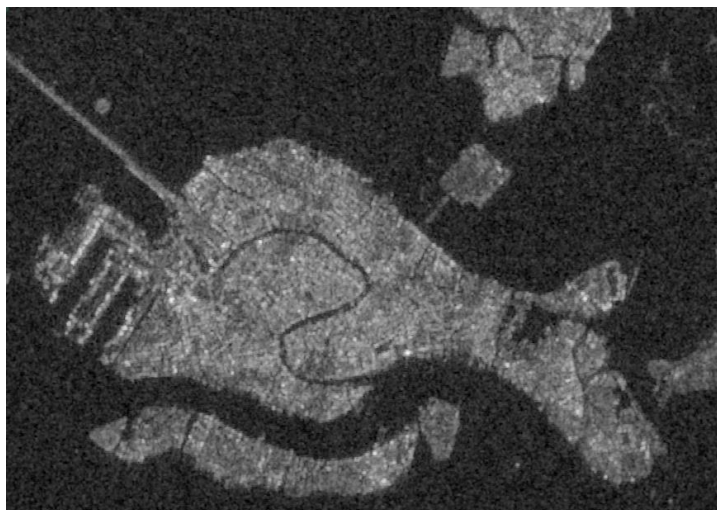
Πίνακας 12: Εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση της Βενετίας

S1A_IW_GRDH_1SDV_20191022T051904_20191022T051929_029567_035D9D_E0BA
S1B_IW_GRDH_1SDV_20191028T051822_20191028T051847_018671_023301_976A
S1A_IW_GRDH_1SDV_20191115T051904_20191115T051929_029917_0369DD_B3EC

Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 11, στις 28 Οκτωβρίου 2019 δεν είχε καθόλου βροχή, οπότε χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη εικόνα ως εικόνα «ξηρασίας», όμοια με την εικόνα με ημερομηνία 22 Οκτωβρίου 2019. Ενώ η εικόνα με ημερομηνία λήψης 15 Νοεμβρίου 2019 ήταν η εικόνα βροχής αφού είχε 49.5 χιλιοστά βροχής. Πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των εικόνων και το αποτέλεσμα ήταν το παρακάτω:



Εικόνα 39: Βενετία, 22/10/2019



Εικόνα 40: Βενετία, 15/11/2019

4.3.2 Αφαίρεση των εικόνων

Πραγματοποιήθηκαν αφαιρέσεις μεταξύ των εικόνων με τον εξής τρόπο: αφαιρέθηκαν χρονικά οι δύο εικόνες ξηρασίας μεταξύ τους και η εικόνα πλημμύρας με την προηγούμενή της χρονικά.

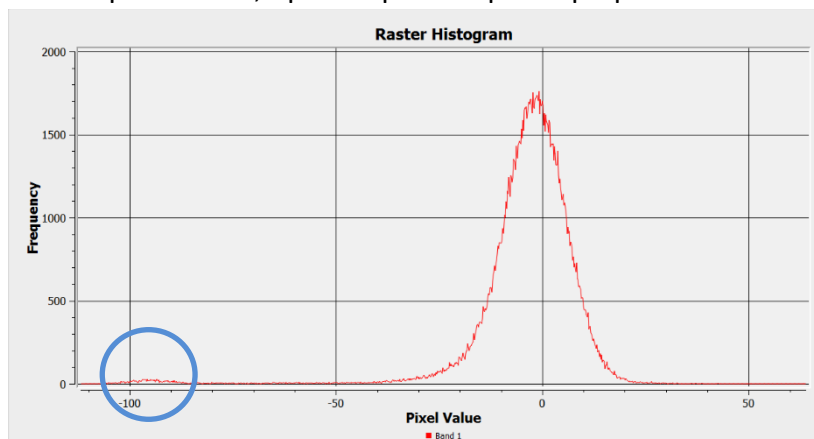
Πίνακας 13: Αφαιρέσεις εικόνων στην περίπτωση της Βενετίας

Αφαίρεση εικόνων 15-11-2019 με 28-10-2019
Αφαίρεση εικόνων 28-10-2019 με 22-10-2019

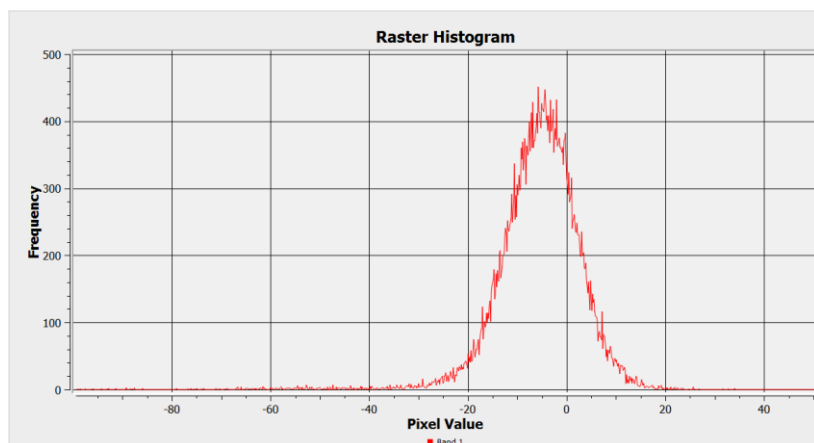
Έπειτα, για να φανεί η συμπεριφορά των εικονοστοιχείων στο χρόνο μεταξύ των ημερομηνιών από 22 Οκτωβρίου 2019 ως και 15 Νοεμβρίου 2019, αφαιρέθηκαν τα προϊόντα των δύο αφαιρέσεων του Πίνακα 13 μεταξύ τους, ώστε να φανεί αν στο διάστημα μεταξύ των εικόνων υπήρξε αύξηση ή μείωση της τιμής οπισθοσκέδασης.

4.3.3 Μασκάρισμα των υδάτινων επιφανειών

Το επόμενο στάδιο, ήταν η δημιουργία μιας μάσκας η οποία απεικονίζει την ξηρά, έτσι ώστε να μασκαριστούν οι υδάτινες επιφάνειες από την εικόνα της διαφοράς των δύο διαφορών του Πίνακα 13. Αυτό το βήμα κρίθηκε απαραίτητο καθώς το ιστόγραμμα της εικόνας με τα νερά είναι διαφορετικό απ' ό,τι χωρίς αυτά και θα επηρέαζε το αποτέλεσμα κατά την κατωφλίωση της εικόνας της διαφοράς. Στις παρακάτω εικόνες παρατίθενται τα ιστογράμματα των δύο διαφορετικών περιπτώσεων, πριν και μετά το μασκάρισμα.



Εικόνα 41: Ιστόγραμμα εικόνας πριν το μασκάρισμα των υδάτινων επιφανειών της εικόνας διαφοράς



Εικόνα 42: Ιστόγραμμα εικόνας μετά το μασκάρισμα των υδάτινων επιφανειών στην εικόνα διαφοράς

Όπως παρατηρείται από τις παραπάνω εικόνες, το ιστόγραμμα της εικόνας πριν το μασκάρισμα είναι διαφορετικό. Αρχικά, έχει μικρότερες τιμές από το ιστόγραμμα της εικόνας που προέκυψε μετά το μασκάρισμα και παρατηρείται στο κυκλωμένο σημείο του ιστογράμματος στην Εικόνα 41 ότι υπήρχε μεγάλο πλήθος εικονοστοιχείων με τιμές της τάξης του -100. Αυτά τα εικονοστοιχεία απαλείφθηκαν από την εικόνα μετά το μασκάρισμα.

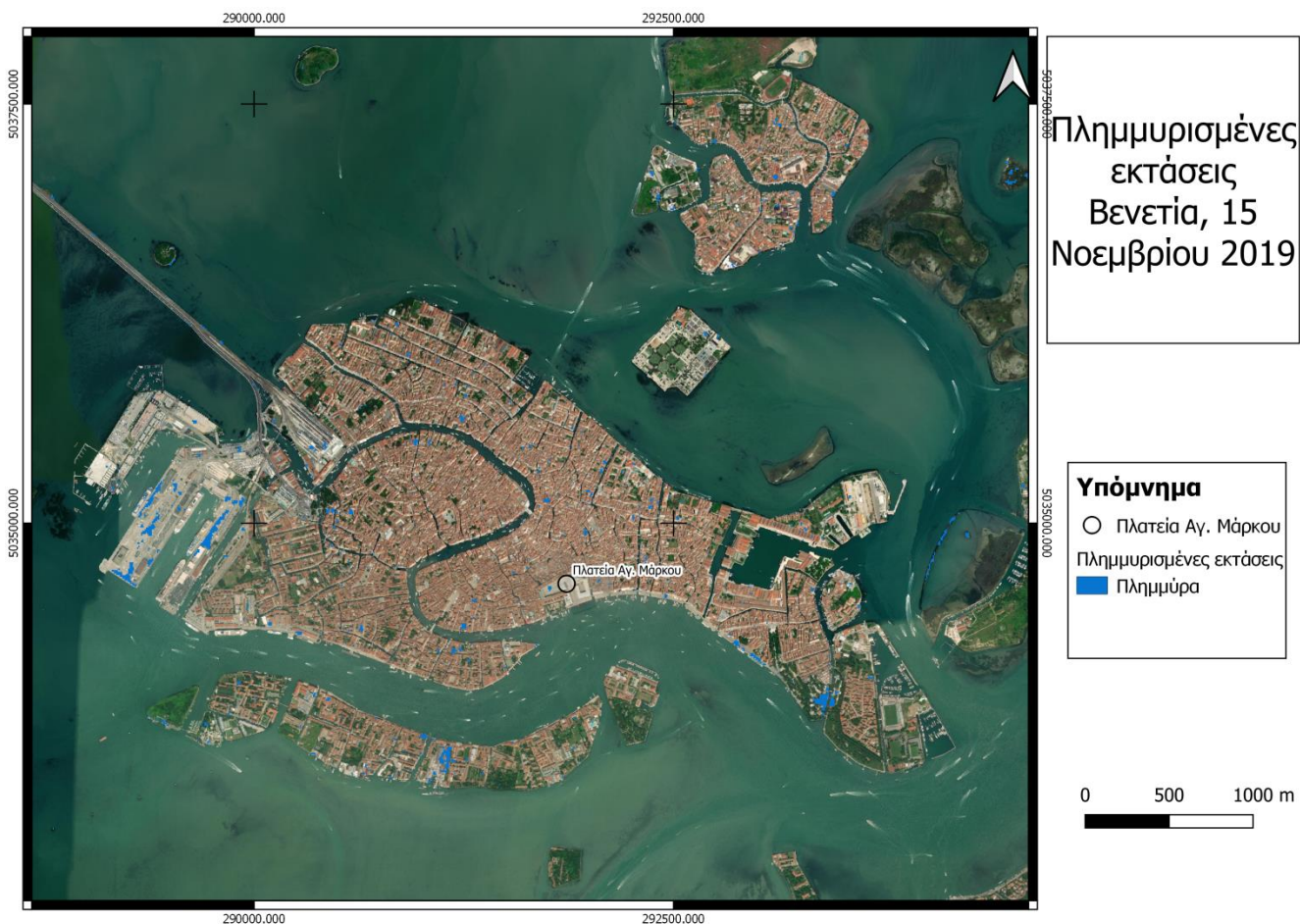
Η μάσκα δημιουργήθηκε από την ψηφιοποίηση των σημείων ξηράς της πόλης της Βενετίας. Στην Εικόνα 43 φαίνεται το αποτέλεσμα του μασκαρίσματος των υδάτινων επιφανειών. Το υπόβαθρο στο οποίο επιτίθεται το αποτέλεσμα του μασκαρίσματος είναι από την ESRI World Imagery.



Εικόνα 43: Μασκαρισμένη εικόνα διαφοράς

4.3.4 Κατωφλίωση της μασκαρισμένης εικόνας

Για να φανούν οι περιοχές με τη μεγαλύτερη αλλαγή της οπισθοσκέδασης τους πριν και μετά την πλημμύρα, έπρεπε να γίνει κατωφλίωση για να φανούν συγκεκριμένα ποια σημεία είχαν τις μεγαλύτερες αλλαγές. Επιλέχθηκε το κατώφλι να είναι διαφορετικό από το κατώφλι το οποίο αναφέρθηκε στη μεθοδολογία, δηλαδή να προκύπτει από την τιμή $mean - 2.5 * std$. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή της κατωφλίωσης ήταν ίση με $-2.5 * std = -29.14 + 5.49 = -23.7$. Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 44: Πλημμυρισμένες εκτάσεις στη Βενετία, 15 Νοεμβρίου 2019

Στον παραπάνω χάρτη φαίνονται με μπλε χρώμα οι περιοχές της Βενετίας οι οποίες είχαν τις μεγαλύτερες διαφορές αρνητικού πρόσημου στις εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν. Παρατηρείται ότι αυτά τα σημεία είναι είτε σε σκεπές κτιρίων είτε σε χώρους πράσινου και λίγα σημεία βρίσκονται σε αποβάθρες ή πλατείες.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η μέθοδος Otsu δεν εφαρμόστηκε για την χαρτογράφηση της πλημμύρας καθώς οι πλημμυρισμένες περιοχές ήταν μικρής έκτασης και διάσπαρτες στην πόλη της Βενετίας.

5. Αξιολόγηση της μεθόδου

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο αφορά στην αξιολόγηση της μεθόδου της παρούσας διπλωματικής εργασίας, βάσει των αποτελεσμάτων στις δασώδεις, αγροτικές και αστικές περιοχές.

5.1 Δασώδης περιοχή

Η ίδια μεθοδολογία που εξηγήθηκε παραπάνω εφαρμόστηκε στις εικόνες οι οποίες είχαν ταξινομηθεί ως «εικόνες βροχής», δηλαδή τις εικόνες με ημερομηνία λήψης 10 Σεπτεμβρίου 2017 και 4 Οκτωβρίου 2017. Επίσης, για την παρακολούθηση του φαινομένου της πλημμύρας της 21^{ης} Οκτωβρίου, η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε για όλες τις εικόνες της χρονοσειράς από 4 Σεπτεμβρίου 2017, δηλαδή σχεδόν 2 μήνες πριν την πλημμύρα και μέχρι και 3 Νοεμβρίου 2017, δηλαδή 10 μέρες μετά από αυτή.

Σε όλες τις περιπτώσεις, για κάθε ημερομηνία για την οποία έτρεξε η μεθοδολογία, χρησιμοποιήθηκε χρονοσειρά εικόνων. Σύνολο οι εικόνες σε κάθε περίπτωση ήταν 7: μία εικόνα η οποία θεωρούταν ως «πλημμυρισμένη» και έξι άλλες με ημερομηνίες λήψης προηγούμενες από αυτήν χρονικά και οι οποίες διαπιστώθηκε ότι ήταν εικόνες χωρίς τις επιπτώσεις των βροχοπτώσεων στην περιοχή μελέτης.

Στους παρακάτω πίνακες περιέχονται οι ημερομηνίες των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε «πλημμυρισμένη» εικόνα.

Πίνακας 14

30 Ιουλίου 2017
5 Αυγούστου 2017
11 Αυγούστου 2017
17 Αυγούστου 2017
23 Αυγούστου 2017
29 Αυγούστου 2017
4 Σεπτεμβρίου 2017

Πίνακας 15

5 Αυγούστου 2017
11 Αυγούστου 2017
17 Αυγούστου 2017
23 Αυγούστου 2017
29 Αυγούστου 2017
4 Σεπτεμβρίου 2017
10 Σεπτεμβρίου 2017

Πίνακας 16

5 Αυγούστου 2017
11 Αυγούστου 2017
17 Αυγούστου 2017
23 Αυγούστου 2017
29 Αυγούστου 2017
4 Σεπτεμβρίου 2017
16 Σεπτεμβρίου 2017

Πίνακας 17

11 Αυγούστου 2017
17 Αυγούστου 2017
23 Αυγούστου 2017
29 Αυγούστου 2017
4 Σεπτεμβρίου 2017
16 Σεπτεμβρίου 2017
22 Σεπτεμβρίου 2017

Πίνακας 18

17 Αυγούστου 2017
23 Αυγούστου 2017
29 Αυγούστου 2017
4 Σεπτεμβρίου 2017
16 Σεπτεμβρίου 2017
22 Σεπτεμβρίου 2017
28 Σεπτεμβρίου 2017

Πίνακας 19

23 Αυγούστου 2017
29 Αυγούστου 2017
4 Σεπτεμβρίου 2017
16 Σεπτεμβρίου 2017
22 Σεπτεμβρίου 2017
28 Σεπτεμβρίου 2017
4 Οκτωβρίου 2017

Πίνακας 20

23 Αυγούστου 2017
29 Αυγούστου 2017
4 Σεπτεμβρίου 2017
16 Σεπτεμβρίου 2017
22 Σεπτεμβρίου 2017
28 Σεπτεμβρίου 2017
10 Οκτωβρίου 2017

Πίνακας 21

29 Αυγούστου 2017
4 Σεπτεμβρίου 2017
16 Σεπτεμβρίου 2017
22 Σεπτεμβρίου 2017
28 Σεπτεμβρίου 2017
10 Οκτωβρίου 2017
16 Οκτωβρίου 2017

Πίνακας 22

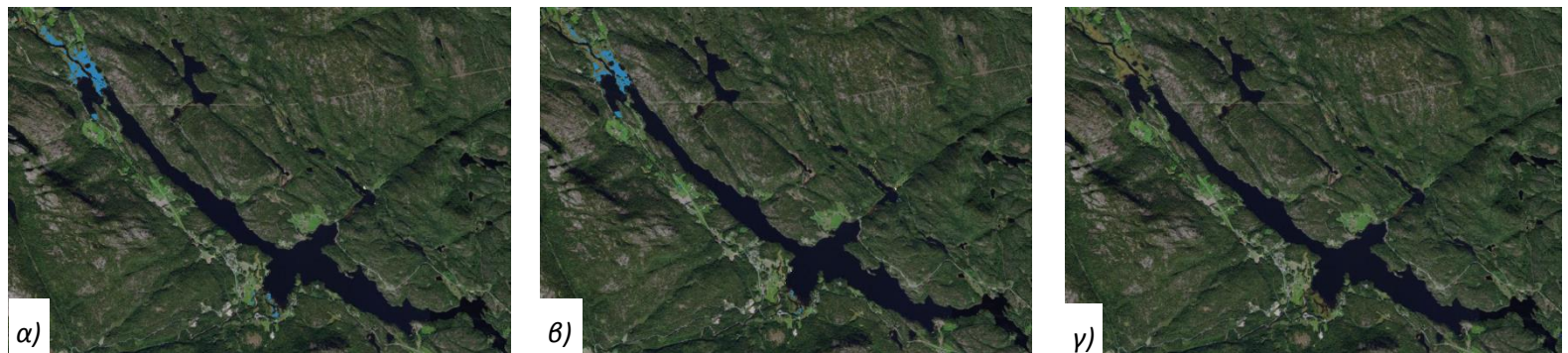
4 Σεπτεμβρίου 2017
16 Σεπτεμβρίου 2017
22 Σεπτεμβρίου 2017
28 Σεπτεμβρίου 2017
10 Οκτωβρίου 2017
16 Οκτωβρίου 2017
28 Οκτωβρίου 2017

Πίνακας 23

4 Σεπτεμβρίου 2017
16 Σεπτεμβρίου 2017
22 Σεπτεμβρίου 2017
28 Σεπτεμβρίου 2017
10 Οκτωβρίου 2017
16 Οκτωβρίου 2017
3 Νοεμβρίου 2017

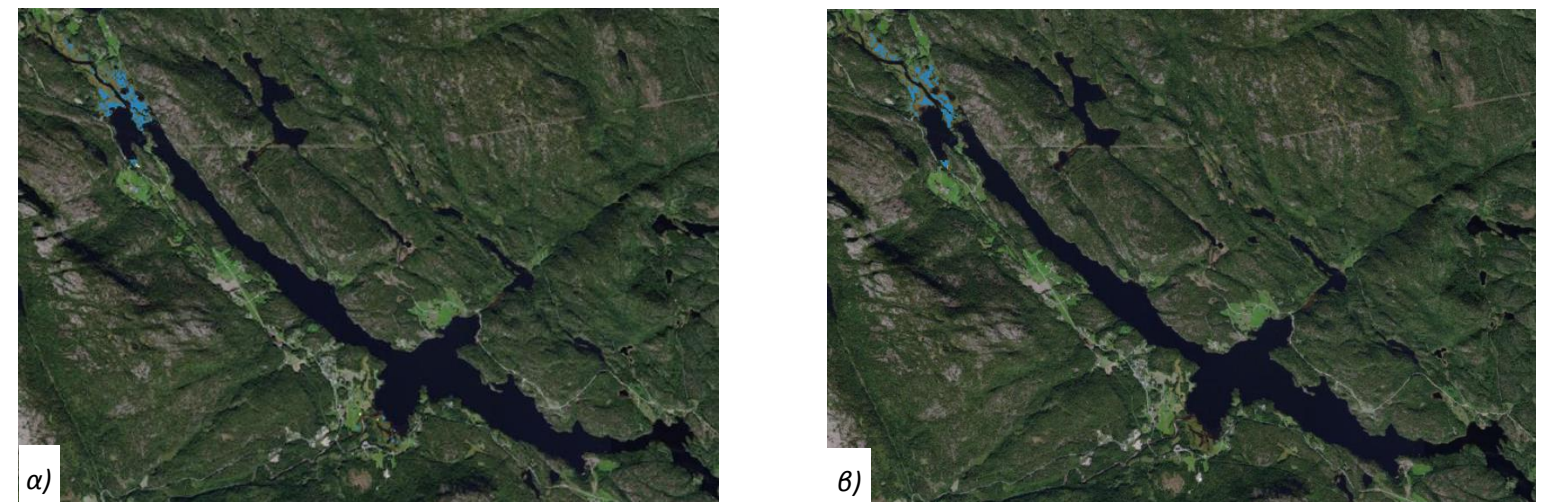
5.1.1 Αξιολόγηση της μεθόδου στη δασώδη περιοχή

Παρακάτω φαίνονται τα τελικά αποτελέσματα της μεθόδου για την εικόνα πλημμύρας 22 Οκτωβρίου, για την εικόνα 28 Οκτωβρίου και την εικόνα με ημερομηνία λήψης 3 Νοεμβρίου 2017.



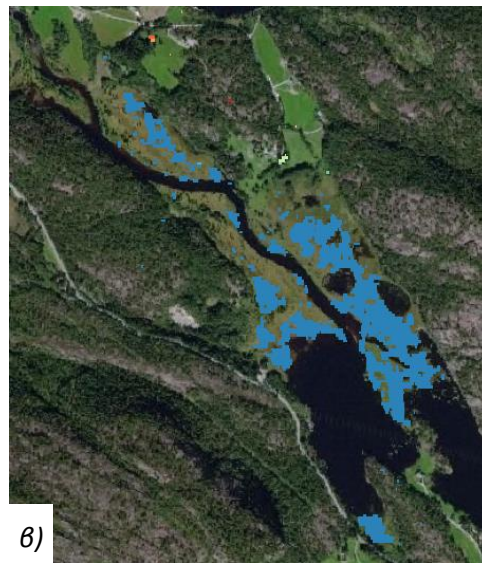
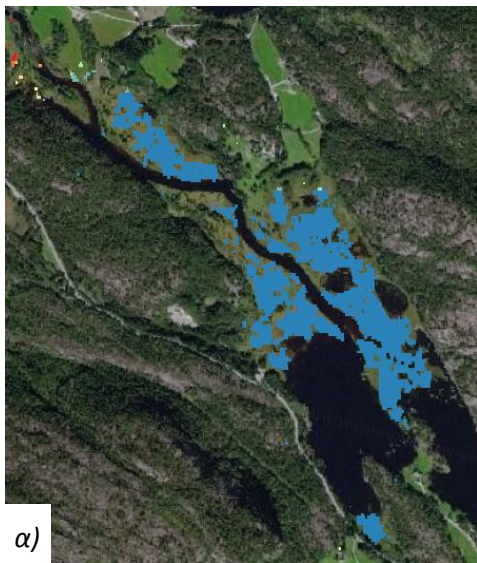
Εικόνα 45: α) 22 Οκτωβρίου 2017, 45.6mm βροχής, β) 28 Οκτωβρίου 2017, 2mm βροχής, γ) 3 Νοεμβρίου 2017, 0mm βροχής

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των ημερομηνιών των βροχοπτώσεων: 10 Σεπτεμβρίου και 4 Οκτωβρίου 2017.



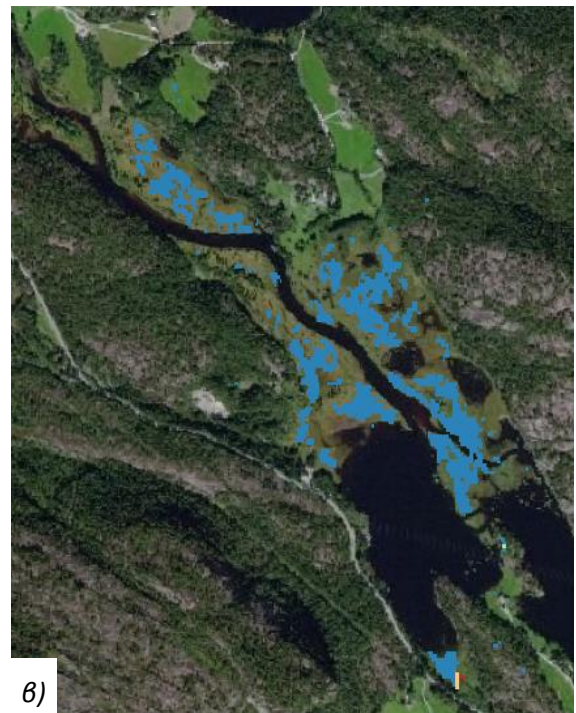
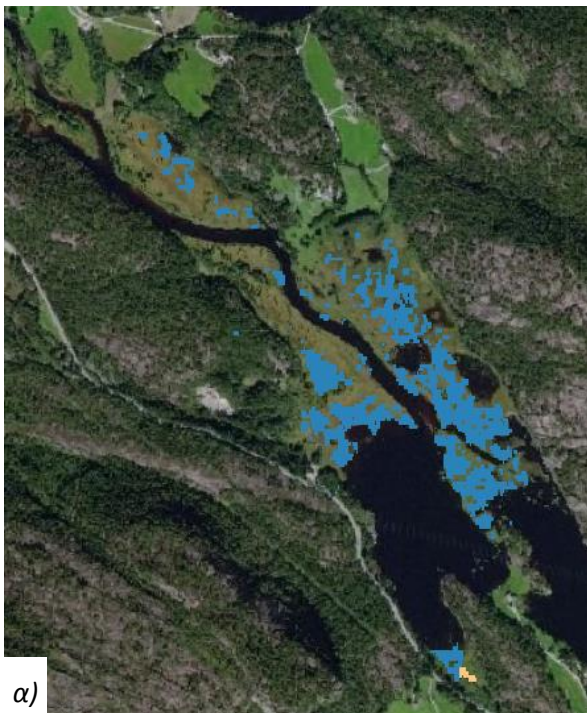
Εικόνα 46: α) 10 Σεπτεμβρίου 2017, 39.7mm βροχής, β) 4 Οκτωβρίου 2017, 50.9mm βροχής

Σε μεγέθυνση τα παραπάνω αποτελέσματα είναι:



Εικόνα 47: α) 22 Οκτωβρίου 2017, 45.6mm βροχής, β) 28 Οκτωβρίου 2017, 2mm βροχής, γ) 3 Νοεμβρίου 2017, 0mm βροχής

Στις εικόνες βροχόπτωσης :



Εικόνα 48: α) 10 Σεπτεμβρίου 2017, 39.7mm βροχής, β) 4 Οκτωβρίου 2017, 50.9mm βροχής

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, στις Εικόνες 47 (α), (β), (γ) φαίνονται οι πλημμυρισμένες περιοχές και η εξέλιξη της πλημμύρας.

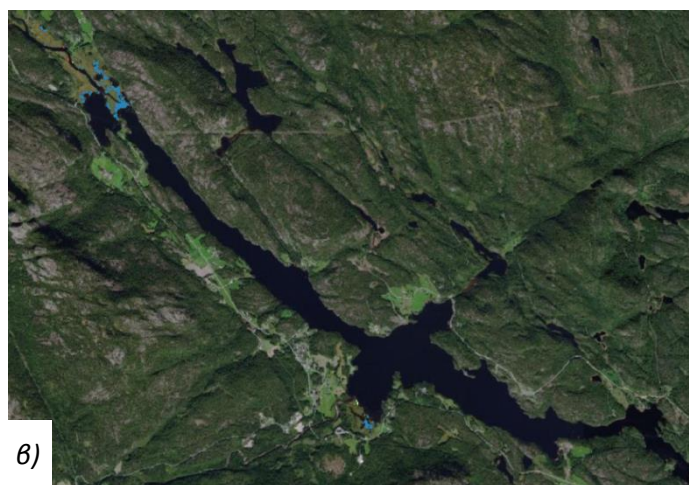
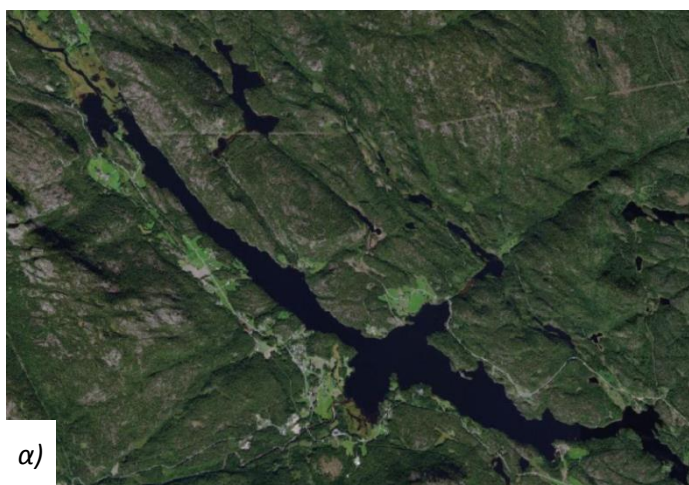
Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα, στην Εικόνα 47 (α), (β) και (γ) φαίνεται ότι τα νερά της πλημμύρας στην εικόνα 47(α) είναι περισσότερα και φθίνουν στις Εικόνες 47(β) και 47(γ), με αποτέλεσμα στην 47(γ) να μην διακρίνονται καθόλου πλημμυρισμένες περιοχές.

Η Εικόνα 47(β) απεικονίζει μια ημερομηνία με πολύ μικρότερη βροχόπτωση η οποία ενδεχομένως να συνέβαλε στη διατήρηση ορισμένων πλημμυρισμένων εκτάσεων από την ημερομηνία της πλημμύρας στις 22 Οκτωβρίου 2017. Εξάλλου, η πλημμύρα παρέμεινε εκεί για κάποιο διάστημα μέχρι να απορροφηθούν τα νερά από το έδαφος ή μέχρι να κυλίσουν στη λίμνη και στις υδάτινες επιφάνειες της περιοχής.

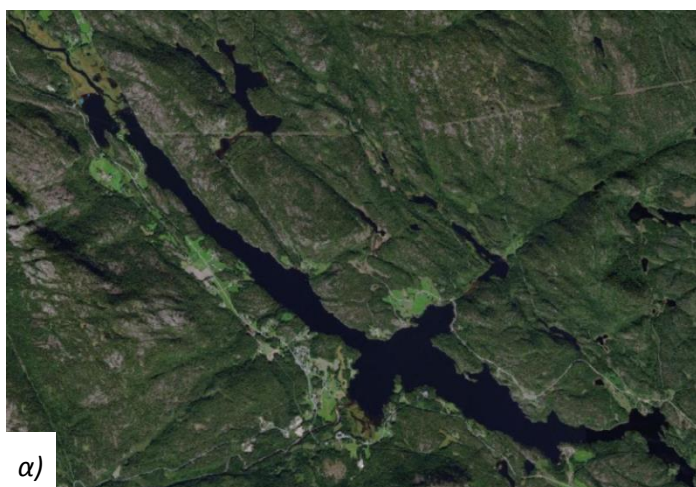
Εκτελώντας τη μεθοδολογία στις εικόνες με βροχόπτωση, παρατηρείται ότι σύμφωνα με τα αποτελέσματα της Εικόνας 48, η περιοχή είχε πλημμυρίσει ξανά αλλά με λιγότερες πλημμυρισμένες εκτάσεις. Παρότι τα χιλιοστά βροχής ήταν περισσότερα την ημερομηνία 4 Οκτωβρίου 2017,(50.9 χιλιοστά νερού) η περιοχή γύρω από τη λίμνη πλημμύρισε περισσότερο στις 10 Σεπτεμβρίου 2017 με 39.7 χιλιοστά νερού.

Στην Εικόνα 48(α) τα νερά της πλημμύρας είναι περισσότερο συσσωρευμένα κοντά στη λίμνη, ενώ η ποσότητα του νερού στη 48(β) είναι περισσότερο μοιρασμένη καθώς τα νερά της πλημμύρας απεικονίζονται σε μεγαλύτερη επιφάνεια σχετικά με την 48(α) πιο μακριά από τη λίμνη.

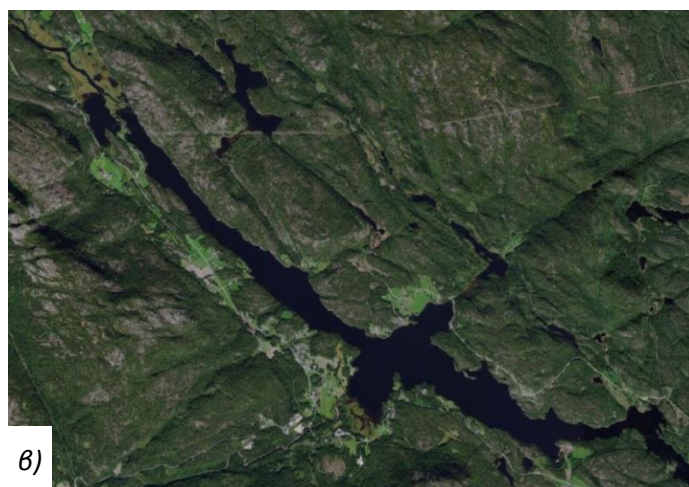
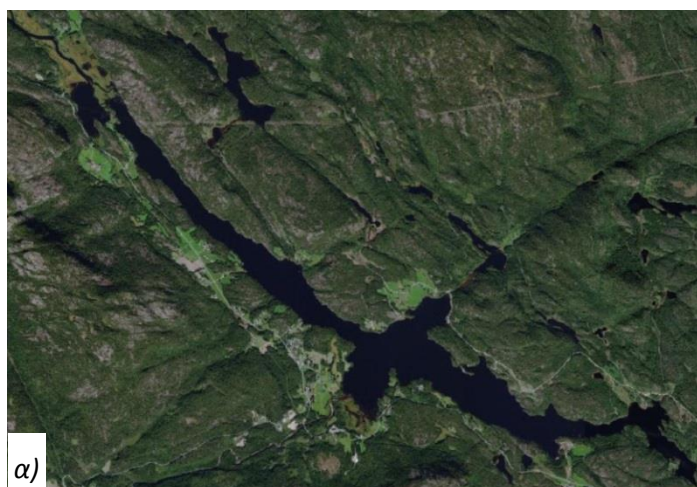
Τα αποτελέσματα της μεθόδου στις εικόνες χωρίς πλημμύρα και χωρίς βροχόπτωση φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 49: α) 4 Σεπτεμβρίου 2017, 2.5mm βροχής, β) 16 Σεπτεμβρίου 2017, 4.1mm βροχής

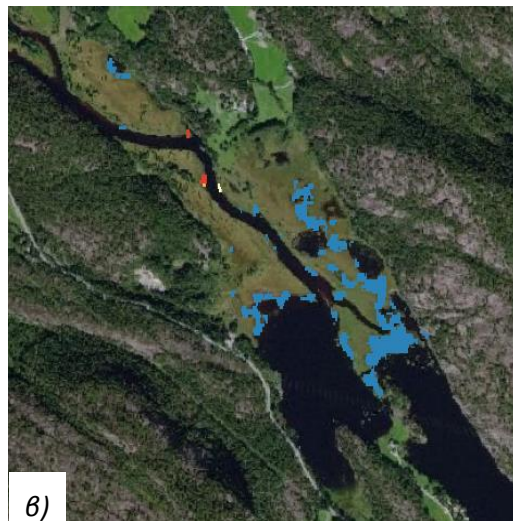
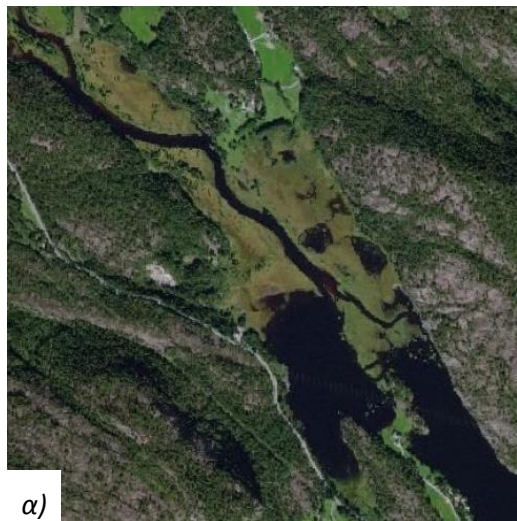


Εικόνα 50: : α) 22 Σεπτεμβρίου 2017, 7.7mm βροχής, β) 28 Σεπτεμβρίου 2017, 6.2mm βροχής

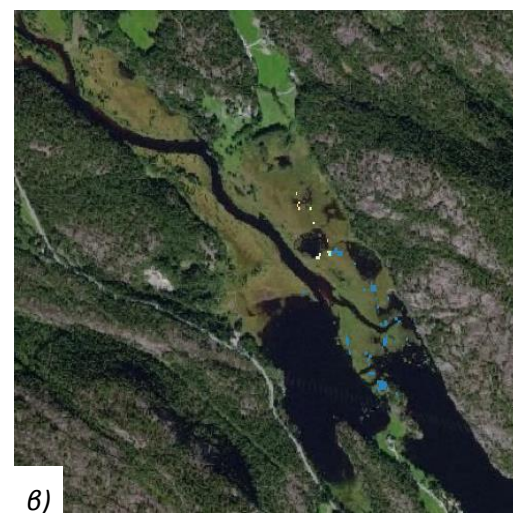
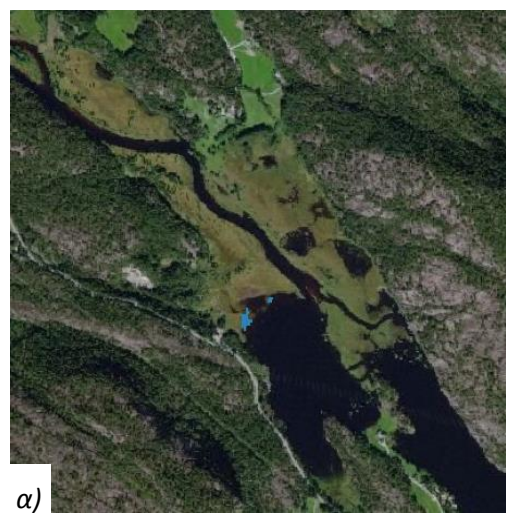


Εικόνα 51: α) 10 Οκτωβρίου 2017, 1mm βροχής, β) 16 Οκτωβρίου 2017, 0.8mm βροχής

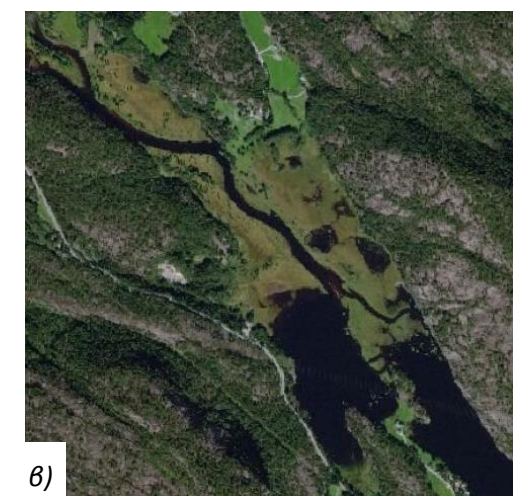
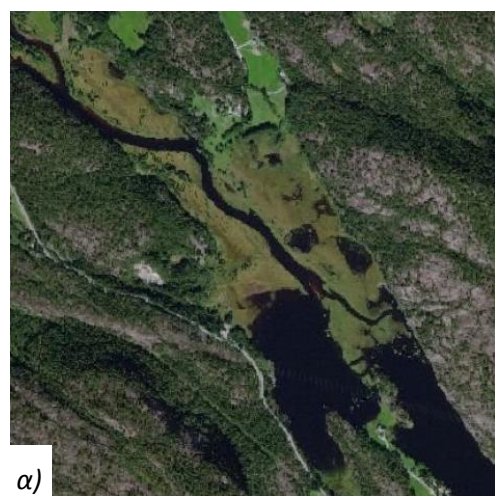
Τα παραπάνω αποτελέσματα μεγεθυμένα:



Εικόνα 52: α) 4 Σεπτεμβρίου 2017, 2.5mm βροχής, β) 16 Σεπτεμβρίου 2017, 4.1mm βροχής



Εικόνα 53: α) 22 Σεπτεμβρίου 2017, 7.7mm βροχής, β) 28 Σεπτεμβρίου 2017, 6.2mm βροχής



Εικόνα 54: α) 10 Οκτωβρίου 2017, 1mm βροχής, β) 16 Οκτωβρίου 2017, 0.8mm βροχής

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας στις εικόνες χωρίς βροχόπτωση, παρατηρείται ότι στις εικόνες των ημερομηνιών οι οποίες είχαν ελάχιστα ή καθόλου χιλιοστά βροχής δεν έχουν ως πλημμυρισμένη κάποια έκταση. Αυτό παρατηρείται στις εικόνες 52(α), 54(α) και (β).

Αντιθέτως, η Εικόνα 52(β) με ημερομηνία 16 Σεπτεμβρίου 2017 απεικονίζει κάποιες περιοχές ως πλημμυρισμένες. Αυτό συνέβη επειδή στις 10 Σεπτέμβρη 2017 είχε βροχή με σχετική πλημμύρα, αλλά και επειδή έχουν καταγραφεί 4.1 χιλιοστά βροχής στις 16 Σεπτεμβρίου. Επομένως, φαίνεται ότι υπήρξαν πλημμυρισμένες περιοχές, πρώτον επειδή πρόκειται για μια εικόνα η οποία είχε ληφθεί σε ημερομηνία που υπήρχαν έστω και λίγα χιλιοστά νερού βροχής και δεύτερον ότι η συγκεκριμένη ημερομηνία έπεται μιας άλλης ημερομηνίας στην οποία η περιοχή μελέτης πλημμύρισε και τα νερά πιθανώς να μην είχαν αποστραγγιστεί πλήρως.

Παρόμοια, στις Εικόνες 53 (α) και (β) φαίνονται κάποιες περιοχές ως πλημμυρισμένες επειδή τα δεδομένα έδειξαν ότι υπήρξε μικρή βροχόπτωση στις ημερομηνίες αυτές.

Σημειώνεται ότι στην Εικόνα 54 (α),(10 Οκτωβρίου 2017) δεν απεικονίζονται οι πλημμυρισμένες περιοχές στην περιοχή παρόλο που και αυτή η εικόνα έχει ληφθεί σε ημερομηνία η οποία έπεται της 4 Οκτωβρίου, όπου παρατηρήθηκε μικρό πλημμυρικό γεγονός. Σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα διαφέρουν από αυτά της Εικόνας 52(β). Η διαφορά στο αποτέλεσμα έγκειται στα χιλιοστά βροχής των δύο ημερομηνιών στις οποίες αναφέρονται τα αποτελέσματα. Επομένως, επειδή στις 10 Οκτωβρίου τα χιλιοστά βροχής ήταν ελάχιστα, δεν υπάρχουν πλημμυρισμένες εκτάσεις γύρω από τη λίμνη.

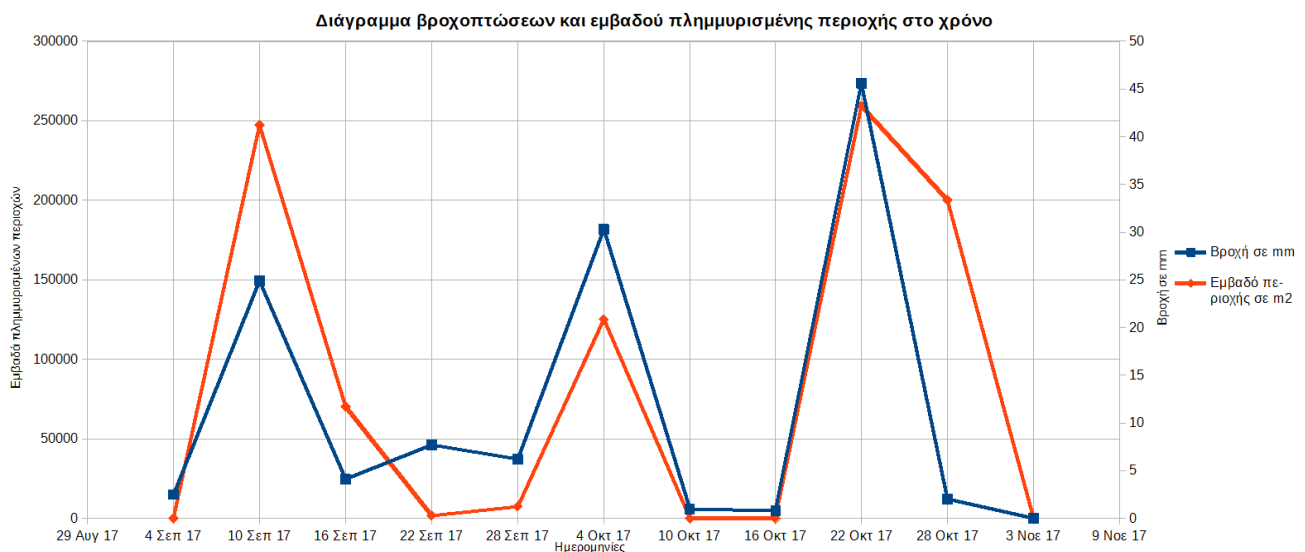
Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας με της ημερομηνίες της χρονοσειράς, τα χιλιοστά βροχής και τα εμβαδά των πλημμυρισμένων περιοχών σε τετραγωνικά μέτρα.

Πίνακας 24: Πλημμυρισμένες περιοχές ανάλογα με τα χιλιοστά βροχής

Ημερομηνίες	Βροχή σε mm	Εμβαδό περιοχής σε m ²
4-Σεπ-17	2.5	0
10-Σεπ-17	24.9	247318
16-Σεπ-17	4.1	70310
22-Σεπ-17	7.7	1904
28-Σεπ-17	6.2	7661
4-Οκτ-17	30.3	125169
10-Οκτ-17	1	0
16-Οκτ-17	0.8	0
22-Οκτ-17	45.6	259227
28-Οκτ-17	2	200264
3-Νοε-17	0	0



Διάγραμμα 4: Εμβαδά πλημμυρισμένων εκτάσεων στο χρόνο



Διάγραμμα 5: Βροχοπτώσεις και εμβαδά πλημμυρισμένων εκτάσεων

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 4, οι μεγαλύτερες πλημμυρισμένες εκτάσεις οι οποίες καταγράφηκαν ήταν στις 10 Σεπτεμβρίου και στις 22 Οκτωβρίου 2017.

Στο Διάγραμμα 5 φαίνεται η σύγκριση της ποσότητας βροχής (μπλε καμπύλη) με το εμβαδό των πλημμυρισμένων περιοχών (κόκκινη καμπύλη). Στις ημερομηνίες με βροχή και πλημμύρα, οι καμπύλες στο διάγραμμα είναι παρόμοιας μορφής, δηλαδή όπου υπάρχει αύξηση της ποσότητας βροχής, υπήρξε και αύξηση των πλημμυρισμένων εκτάσεων. Επιπλέον, η καμπύλη των εμβαδών (κόκκινη) στις ημερομηνίες 16 Σεπτεμβρίου και 28 Οκτωβρίου είναι υψηλότερα από την καμπύλη των χιλιοστών βροχής (μπλε) στις ίδιες ημερομηνίες, αφού παρόλο που η βροχή ήταν σε χαμηλά επίπεδα, οι πλημμυρισμένες εκτάσεις παρέμεναν και σταδιακά επανέρχονταν στην κανονική τους κατάσταση, δηλαδή χωρίς τις συνθήκες πλημμύρας.

5.2 Αγροτική περιοχή

Η μέθοδος εφαρμόστηκε και στις υπόλοιπες εικόνες της χρονοσειράς των εικόνων με ημερομηνίες λήψης από 5 Ιανουαρίου 2018 μέχρι και 12 Μαρτίου χρησιμοποιώντας και τις υπόλοιπες εικόνες του Πίνακα 7. Αυτό έγινε για τη μελέτη της συμπεριφοράς της περιοχής μελέτης σε ημερομηνίες χωρίς βροχή, αλλά και για την παρακολούθηση της περιοχής μελέτης μετά την πλημμύρα.

Σε όλες τις περιπτώσεις, για κάθε ημερομηνία για την οποία έτρεξε η μεθοδολογία, χρησιμοποιήθηκε διαφορετική χρονοσειρά εικόνων. Σύνολο οι εικόνες σε κάθε περίπτωση ήταν 8: μία εικόνα η οποία θεωρούταν ως «πλημμυρισμένη» και επτά άλλες με ημερομηνίες λήψης προηγούμενες από αυτήν χρονικά και οι οποίες διαπιστώθηκε ότι ήταν εικόνες χωρίς τις επιπτώσεις των βροχοπτώσεων στην περιοχή μελέτης.

Στους παρακάτω πίνακες περιέχονται οι ημερομηνίες των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε εικόνα της χρονοσειράς από 5 Ιανουαρίου 2018 έως 12 Μαρτίου 2018.

Πίνακας 25

24 Νοεμβρίου 2017
30 Νοεμβρίου 2017
6 Δεκεμβρίου 2017
12 Δεκεμβρίου 2017
18 Δεκεμβρίου 2017
24 Δεκεμβρίου 2017
30 Δεκεμβρίου 2017
5 Ιανουαρίου 2018

Πίνακας 26

30 Νοεμβρίου 2017
6 Δεκεμβρίου 2017
12 Δεκεμβρίου 2017
18 Δεκεμβρίου 2017
24 Δεκεμβρίου 2017
30 Δεκεμβρίου 2017
5 Ιανουαρίου 2018
11 Ιανουαρίου 2018

Πίνακας 27

6 Δεκεμβρίου 2017
12 Δεκεμβρίου 2017
18 Δεκεμβρίου 2017
24 Δεκεμβρίου 2017
30 Δεκεμβρίου 2017
5 Ιανουαρίου 2018
11 Ιανουαρίου 2018
17 Ιανουαρίου 2018

Πίνακας 28

12 Δεκεμβρίου 2017
18 Δεκεμβρίου 2017
24 Δεκεμβρίου 2017
30 Δεκεμβρίου 2017
5 Ιανουαρίου 2018
11 Ιανουαρίου 2018
17 Ιανουαρίου 2018
23 Ιανουαρίου 2018

Πίνακας 29

18 Δεκεμβρίου 2017
24 Δεκεμβρίου 2017
30 Δεκεμβρίου 2017
5 Ιανουαρίου 2018
11 Ιανουαρίου 2018
17 Ιανουαρίου 2018
23 Ιανουαρίου 2018
29 Ιανουαρίου 2018

Πίνακας 30

24 Δεκεμβρίου 2017
30 Δεκεμβρίου 2017
5 Ιανουαρίου 2018
11 Ιανουαρίου 2018
17 Ιανουαρίου 2018
23 Ιανουαρίου 2018
29 Ιανουαρίου 2018
4 Φεβρουαρίου 2018

Πίνακας 31

30 Δεκεμβρίου 2017
5 Ιανουαρίου 2018
11 Ιανουαρίου 2018
17 Ιανουαρίου 2018
23 Ιανουαρίου 2018
29 Ιανουαρίου 2018
4 Φεβρουαρίου 2018
16 Φεβρουαρίου 2018

Πίνακας 32

5 Ιανουαρίου 2018
11 Ιανουαρίου 2018
17 Ιανουαρίου 2018
23 Ιανουαρίου 2018
29 Ιανουαρίου 2018
4 Φεβρουαρίου 2018
16 Φεβρουαρίου 2018
6 Μαρτίου 2018

Πίνακας 33

5 Ιανουαρίου 2018
11 Ιανουαρίου 2018
17 Ιανουαρίου 2018
23 Ιανουαρίου 2018
29 Ιανουαρίου 2018
4 Φεβρουαρίου 2018
16 Φεβρουαρίου 2018
12 Μαρτίου 2018

5.2.1 Αξιολόγηση της μεθόδου στην αγροτική περιοχή

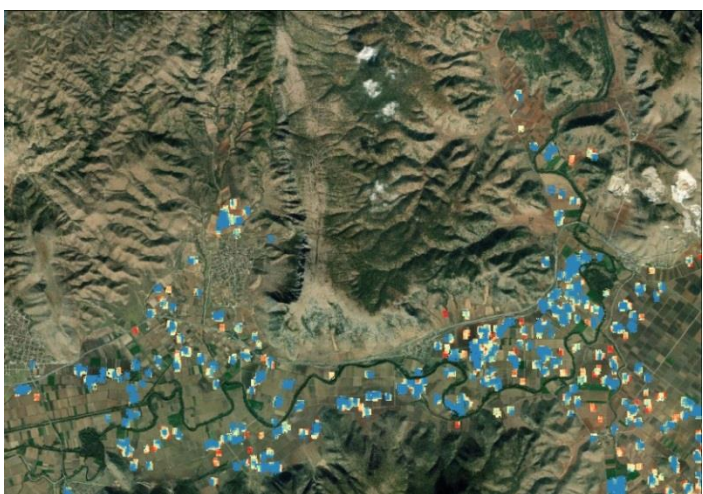
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της μεθόδου αρχικά με εικόνα πλημμύρας τις εικόνες οι οποίες έπονταν της εικόνας της πλημμύρας, και στη συνέχεια με αντικατάσταση της εικόνας της πλημμύρας από όλες τις υπόλοιπες εικόνες από 5 Ιανουαρίου 2018 ως 16 Φεβρουαρίου 2018, διαδοχικά.



Εικόνα 55: 28 Φεβρουαρίου 2018, 44.4mm βροχής



Εικόνα 56: 6 Μαρτίου 2018, 11.2 mm βροχής

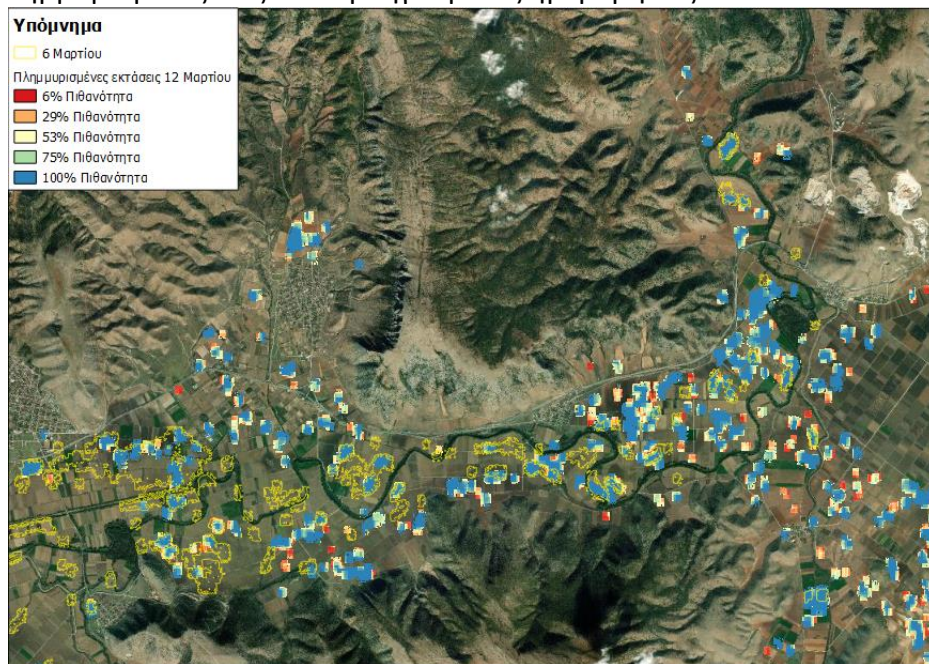


Εικόνα 57: 12 Μαρτίου 2018, 0mm βροχής

Οι παραπάνω εικόνες δείχνουν το αποτέλεσμα της μεθοδολογίας στην εικόνα πλημμύρας και στις εικόνες με ημερομηνία λήψης μετά από αυτήν. Στην Εικόνα 55 φαίνεται η επίπτωση της πλημμύρας στην περιοχή μελέτης μετά από 44.4 χιλιοστά βροχής. Παρατηρείται αρκετά μεγάλο τμήμα της γήινης επιφάνειας να έχει πλημμυρίσει το οποίο αφορά κυρίως καλλιέργειες που βρίσκονται δίπλα στον ποταμό.

Στην Εικόνα 56 φαίνονται, 6 μέρες αργότερα από την πλημμύρα, οι περιοχές οι οποίες είτε παραμένουν πλημμυρισμένες επειδή το έδαφος μπορεί να είχε χαμηλή διαπερατότητα, είτε πλημμύρησαν εξαιτίας των 11.2 χιλιοστών βροχής που έγινε στην περιοχή μελέτης. Οι πλημμυρισμένες περιοχές είναι ακόμα αρκετές και βρίσκονται σε σημεία τα οποία ήταν πλημμυρισμένα και στις 28 Φεβρουαρίου 2018.

Στην Εικόνα 57 απεικονίζεται η κατάσταση της περιοχής στις 12 Μαρτίου 2018, στην οποία παρατηρούνται πολλά σημεία ως πλημμυρισμένα, τα οποία όμως κυρίως βρίσκονται σε περιοχές που δεν ήταν πλημμυρισμένες στις δύο προηγούμενες ημερομηνίες.



Εικόνα 58: Σύγκριση αποτελεσμάτων 6 Μαρτίου 2018 με 12 Μαρτίου 2018. Με κίτρινο φαίνονται τα πολύγωνα που απεικόνιζαν πλημμύρα στις 6 Μαρτίου 2018

Στην παραπάνω εικόνα με κίτρινο περίγραμμα φαίνονται οι περιοχές οι οποίες είχαν ταξινομηθεί ως πλημμυρισμένες εκτάσεις στην εικόνα με ημερομηνία λήψης 6 Μαρτίου 2018. Με μπλε, κίτρινο, κόκκινο φαίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου για την εικόνα με ημερομηνία λήψης 12 Μαρτίου 2018. Παρατηρείται ότι τα κοινά τους σημεία είναι λίγα σε σχέση με όλα τα σημεία τα οποία έχουν προκύψει ως αποτέλεσμα της μεθόδου στην εικόνα με ημερομηνία λήψης 12 Μαρτίου. Αυτά τα σημεία τα οποία είναι κοινά οφείλονται στην πλημμύρα της περιοχής και σε εδάφη που δεν έχουν αποστραγγιστεί ακόμα. Όσον αφορά στα μη κοινά πλημμυρισμένα σημεία πιθανώς να πρόκειται για σημεία που παρουσιάζουν αλλαγή στη συμπεριφορά τους στο χρόνο λόγω άρδευσης της περιοχής, καθώς πρόκειται για μια περιοχή με καλλιέργειες και οι αλλαγές φαίνονται να είναι σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις και με σχήμα αγροτεμαχίων και όχι σε μεγαλύτερα υψόμετρα ή σε σημεία με απότομες κλίσεις.

Αποτελέσματα στις εικόνες χωρίς πλημμύρα:



Εικόνα 59: 5 Ιανουαρίου 2018, 3mm βροχής



Εικόνα 60: 11 Ιανουαρίου 2018, 0mm βροχής



Εικόνα 61: 17 Ιανουαρίου 2018, 0mm βροχής



Εικόνα 62: 23 Ιανουαρίου 2018, 4.8mm βροχής



Εικόνα 63: 29 Ιανουαρίου 2018, 0mm βροχής



Εικόνα 64: 4 Φεβρουαρίου 2018, 0mm βροχής

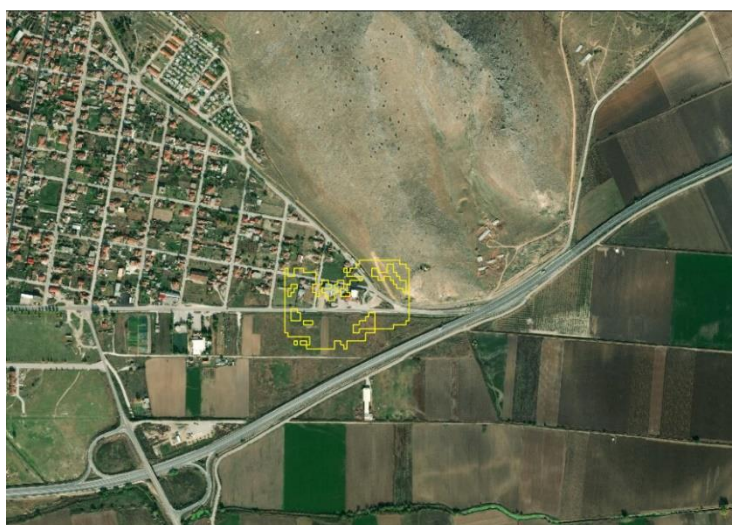


Εικόνα 65: 16 Φεβρουαρίου 2018, 13.4mm βροχής

Στην προηγούμενη σελίδα φαίνονται τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας στην αγροτική περιοχή την οποία διασχίζει ο Πηνειός ποταμός. Σε κάποιες εικόνες έχουν βγει αποτελέσματα πλημμύρας και σε κάποιες όχι.

Το αποτέλεσμα της εικόνας με ημερομηνία λήψης 5 Ιανουαρίου μοιάζει με το αποτέλεσμα της εικόνας στις 12 Μαρτίου 2018, το οποίο μπορεί να δικαιολογείται ως άρδευση καθώς ξανά τα σημεία τα οποία έχουν ταξινομηθεί ως πλημμυρισμένα είναι διάσπαρτα και πάνω από καλλιέργειες.

Επιπλέον, ορισμένες εικόνες όπως η Εικόνα 61, η Εικόνα 63, η Εικόνες 64 και 65 απεικονίζουν σημεία τα οποία είχαν αλλαγές της οπισθοσκέδασης τους χωρίς όμως να υπάρχει βροχόπτωση σε όλες τις παραπάνω ημερομηνίες. Χιλιοστά βροχής υπήρχαν στην Εικόνα 65 η οποία αφορά στις 16 Φεβρουαρίου 2018. Εκτός από την Εικόνα 65, σε ορισμένες εικόνες όπως η 63 και η 64 φαίνονται με μπλε χρώμα αλλαγές σε σημεία τα οποία είναι αστικές περιοχές.



Εικόνα 66: 29 Ιανουαρίου 2018 σε μεγαλύτερη κλίμακα. Δεξιά με κίτρινο περίγραμμα η πλημμυρισμένη έκταση

Επομένως, πέρα από τις αλλαγές που ανιχνεύονται ως πλημμύρα εξαιτίας της άρδευσης, ανιχνεύτηκαν και ορισμένες αλλαγές σε κατοικημένες περιοχές, οι οποίες μπορεί να οφείλονται και σε θόρυβο των εικόνων ΣΑΡ .

Επίσης, οι αλλαγές στις εικόνες με ημερομηνίες 17 Ιανουαρίου και 16 Φεβρουαρίου έχουν ορισμένα σημεία ως πλημμυρισμένα, τα οποία μπορεί να είναι είτε άρδευση είτε βροχή. Στις 17 Ιανουαρίου μάλλον οφείλονται σε άρδευση και στις 16 Φεβρουαρίου μπορεί να οφείλονται σε βροχή επειδή είχε 13.4mm νερού σύμφωνα και με τον Πίνακα 8.

Πίνακας 34: Χιλιοστά βροχής και εμβαδά πλημμυρισμένων εκτάσεων

Ημερομηνίες	Χιλιοστά Βροχής	Εμβαδό σε τ.μ.
5-Ιαν-18	3	1812140
11-Ιαν-18	0	0
17-Ιαν-18	0	388239
23-Ιαν-18	4.8	0
29-Ιαν-18	0	44949
4-Φεβ-18	0	10002
16-Φεβ-18	13.4	117004
28-Φεβ-18	44.4	26668500
6-Μαρ-18	11.2	5969630
12-Μαρ-18	0	9625590



Διάγραμμα 6: Βροχόπτωση και πλημμυρισμένες εκτάσεις

Οι καμπύλες στο Διάγραμμα 6 συμβαδίζουν εκτός από τρία σημεία. Το πρώτο από αυτά ήταν στις 23 Ιανουαρίου όπου δεν υπήρχαν καθόλου πλημμυρισμένες περιοχές και τα χιλιοστά βροχής (4.3mm) ήταν λίγα και δεν πλημμύρισε κάποιο τμήμα της περιοχής μελέτης.

Από την άλλη, το δεύτερο από τα σημεία που δε συμβαδίζουν οι καμπύλες ήταν αυτό στις 16 Φεβρουαρίου. Στο διάγραμμα φαίνεται να είναι πολύ μικρό το εμβαδό των πλημμυρισμένων εκτάσεων σε σχέση με τα χιλιοστά βροχής στη συγκεκριμένη ημερομηνία. Αυτό συμβαίνει επειδή στην ημερομηνία της πλημμύρας, δηλαδή στις 28 Φεβρουαρίου, οι πλημμυρισμένες εκτάσεις είναι πολλά τετραγωνικά μέτρα, συγκεκριμένα 26 εκατομμύρια και οι μικρές εκτάσεις γης που πλημμύρησαν φαίνονται ελάχιστα ως καθόλου στο διάγραμμα.

Το τρίτο σημείο στο οποίο δε συμβαδίζουν οι καμπύλες του εμβαδού και των χιλιοστών βροχής είναι το τελευταίο σημείο, που αφορά στην ημερομηνία 12 Μαρτίου 2018. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το αποτέλεσμα της μεθοδολογίας έδειξε συνδυασμό από σημεία στα οποία δεν έχει απομακρυνθεί όλο το νερό από την πλημμύρα των προηγούμενων ημερομηνιών και από σημεία τα οποία μάλλον έχουν αλλάξει συμπεριφορά λόγω άρδευσης των καλλιεργειών.

5.3 Αστική περιοχή

Η μέθοδος που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία τροποποιήθηκε για να εφαρμοσθεί στο αστικό περιβάλλον. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η Βενετία αποτελεί ένα πολύ πυκνό αστικό περιβάλλον στο οποίο γίνονται διαρκώς αλλαγές. Οι αλλαγές που φαίνονταν στις εικόνες πριν την πλημμύρα της 15^{ης} Νοεμβρίου 2019 ήταν πάρα πολλές και αυτό είχε ως συνέπεια να μην μπορεί να βρεθεί αποτέλεσμα χωρίς να γίνει τροποποίηση της μεθόδου.

5.3.1 Αξιολόγηση της μεθόδου στην αστική περιοχή

Το αποτέλεσμα της μεθόδου στη Βενετία ήταν το παρακάτω:



Εικόνα 67: Αποτέλεσμα της μεθόδου στη Βενετία

Σε μεγαλύτερη κλίμακα είναι:



Εικόνα 68: (α), (β) Αποτέλεσμα μεθόδου στη Βενετία, μεγέθυνση

Στην Εικόνα 68 φαίνονται με μπλε περίγραμμα οι περιοχές στο έδαφος οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ως πλημμύρα από τη μέθοδο που ακολουθήθηκε. Παρατηρείται ότι τα περισσότερα περιγράμματα αφορούν περιοχές οι οποίες είναι είτε στέγες κτιρίων είτε χώροι με βλάστηση. Πολύ λίγα είναι τα περιγράμματα τα οποία δείχνουν πλημμυρισμένες περιοχές οι οποίες δεν αποτελούν στέγη ή βλάστηση αλλά αποτελούν χώρους με χαμηλό υψόμετρο όπως είναι μία πλατεία, ή βρίσκονται κοντά σε υδάτινη περιοχή όπως για παράδειγμα είναι οι αποβάθρες. Επομένως, ίσως η μέθοδος δε λειτούργησε ώστε να προκύψουν τα πιο σωστά αποτελέσματα.

Η πλημμύρα της Βενετίας στις 12 Νοεμβρίου 2019 χαρτογραφήθηκε από την υπηρεσία της Copernicus Emergency Mapping Services και το αποτέλεσμα φάνηκε να ήταν επιτυχές. Τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ήταν μία οπτική εικόνα η οποία λήφθηκε από το δορυφόρο GeoEye στις 14 Νοεμβρίου 2019, ως εικόνα απεικόνισης του γεγονότος της πλημμύρας με 0% νεφοκάλυψη στην περιοχή μελέτης. Οι εικόνες του δορυφόρου GeoEye έχουν χωρική ανάλυση της τάξης του 0.5 μέτρου, οπότε και ήταν δυνατή η χαρτογράφηση του πλημμυρικού γεγονότος σε έναν τόσο πυκνό αστικό ιστό όσο αυτός της Βενετίας. Για εικόνα σύγκρισης με την εικόνα πλημμύρας, χρησιμοποιήθηκε το υπόβαθρο ESRI World Imagery με ημερομηνία λήψης 10 Ιουνίου 2018 στην οποία δεν υπήρχε πλημμύρα. Οι εικόνες ESRI World Imagery έχουν εξίσου καλή χωρική ανάλυση (0.6 μέτρα) με αυτή του δορυφόρου GeoEye.

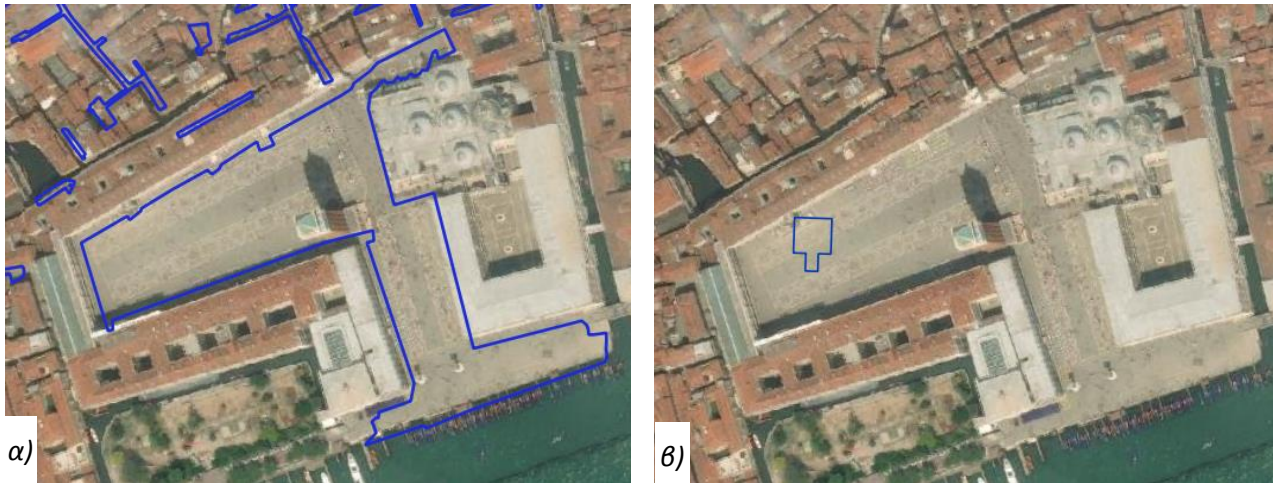
Έτσι δημιουργήθηκε από το Copernicus EMS ένας χάρτης πλημμυρισμένων περιοχών στη Βενετία ο οποίος φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 69: Πλημμυρισμένες εκτάσεις Βενετία, 14 Νοεμβρίου 2019, Αποτέλεσμα EMS

Παρακάτω συγκρίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής με τα αποτελέσματα της EMS Copernicus.

Στην πλατεία του Αγίου Μάρκου:



Εικόνα 70: Πλατεία Αγίου Μάρκου α) Αποτέλεσμα EMS β) Αποτέλεσμα της μεθόδου που αναπτύχθηκε

Παρατηρείται ότι στα δύο αποτελέσματα στην πλατεία του Αγίου Μάρκου, η οποία είχε πλημμυρίσει σε όλη της την έκταση, το αποτέλεσμα της μεθόδου που αναπτύχθηκε υστερεί σε μεγάλο βαθμό καθώς διαφέρει πολύ από αυτό που προέκυψε από την υπηρεσία Copernicus EMS. Το γεγονός αυτό μας δείχνει πόσο μεγάλο ρόλο παίζει η χωρική ανάλυση των αρχικών δεδομένων. Με τη χρήση δεδομένων υψηλότερης χωρικής ανάλυσης το αποτέλεσμα είναι σαφώς καλύτερο στις αστικές περιοχές. Παρόλο που έχει τονισθεί η χρησιμότητα των εικόνων Sentinel-1 στη χαρτογράφηση φυσικών καταστροφών, η χωρική τους ανάλυση δεν επιτρέπει τη χαρτογράφησή τους σε περιοχές όπως οι αστικές, στις οποίες, όπως διαπιστώθηκε, απαιτείται υψηλότερη χωρική ανάλυση. Η αδυναμία επομένως της μεθόδου μάλλον οφείλεται στην χωρική διακριτική ικανότητα των Sentinel-1 δεδομένων και θα είχε πολύ ενδιαφέρον, μελλοντικά η μέθοδος να εφαρμοστεί σε δεδομένα COSMO-Skymed ή Terrasar-X.

6. Σχολιασμός και Συμπεράσματα

Στόχος της διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη μιας μεθόδου με σκοπό τη χαρτογράφηση πλημμύρων σε διαφορετικές καλύψεις/χρήσεις γης και την παρακολούθησή τους. Η αξιολόγηση της μεθόδου έγινε με σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν ύστερα από εφαρμογή της σε εικόνες πλημμύρας και εικόνες μη πλημμύρας. Για τη μέθοδο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκαν εικόνες ΣΑΡ Sentinel 1, καθώς χάρη στην μικροκυματική ακτινοβολία που χρησιμοποιούν τα ραντάρ, παράγουν εικόνες ανεξαρτήτως καιρού και ώρας λήψης της εικόνας. Η πρώτη εφαρμογή της μεθόδου ήταν σε μία δασώδη περιοχή, η δεύτερη εφαρμογή της πραγματοποιήθηκε σε αγροτική περιοχή και η τρίτη σε αστικό περιβάλλον.

Η μέθοδος βασίζεται σε επεξεργασία χρονοσειράς. Κάνει την υπόθεση ότι οι αλλαγές σε εικόνες πριν την πλημμύρα είναι λίγες, οφείλονται σε άλλα γεγονότα και μπορούν να εξαλειφθούν αφαιρώντας αυτές τις αλλαγές από τις αλλαγές που παρατηρούνται στην ημερομηνία της πλημμύρας. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να απομονωθούν τα εικονοστοιχεία που δείχνουν μόνο το πλημμυρικό γεγονός. Η μέθοδος απαιτεί μια χρονοσειρά 6-7 εικόνων πριν την πλημμύρα σε ημερομηνίες που δεν έχει προηγηθεί βροχόπτωση. Για τον προσδιορισμό των αλλαγών που συνέβησαν στην κάθε περιοχή μελέτης χωρίς να έχει συμβεί πλημμυρικό επεισόδιο, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των διαφορών των εικόνων της χρονοσειράς οι οποίες απεικονίζουν την περιοχή πριν το πλημμυρικό επεισόδιο. Για τον προσδιορισμό των αλλαγών που συνέβησαν εξαιτίας της πλημμύρας, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των διαφορών της εικόνας της πλημμύρας με όλες τις προηγούμενες της (μη πλημμυρισμένες) στη χρονοσειρά. Έτσι, προέκυψαν δύο εικόνες μέσου όρου στις οποίες φαινόταν η συμπεριφορά των εικονοστοιχείων στο χρόνο, ένας μέσος όρος αλλαγών που συνέβησαν πριν την πλημμύρα και ένας μέσος όρος αλλαγών εξαιτίας της πλημμύρας. Η διαφορά των δύο εικόνων μέσου όρου και η κατωφλίωσή τους με τέτοιο κατώφλι ώστε να φανούν οι περιοχές με τις μεγαλύτερες αλλαγές οδήγησε σε έναν αρχικό προσδιορισμό πλημμυρισμένων εκτάσεων. Όμως σε κάποιες περιπτώσεις, ανιχνεύθηκαν σημεία ως πλημμυρισμένα τα οποία βρίσκονταν είτε εντός υδάτινων περιοχών ή σε περιοχές μεγάλης κλίσης όπου δημιουργούνται σκιές. Για την απαλοιφή τους δημιουργούνται κατάλληλες μάσκες υδάτινων στοιχείων και κλίσεων αναγλύφου, αντίστοιχα. Εφαρμόζοντας αυτές τις μάσκες και έπειτα τον αλγόριθμο της μεθόδου Otsu για την κατωφλίωση και τον υπολογισμό της πιθανότητας κάθε εικονοστοιχείου να είναι πλημμυρισμένο, δημιουργήθηκε χάρτης πιθανότητας πλημμυρισμένων εκτάσεων.

Η δημιουργία масκών είναι ιδιαίτερα απαραίτητη όταν η περιοχή εμφανίζει έντονο ανάγλυφο. Σε αγροτικές περιοχές, αυτό το βήμα μπορεί να παραληφθεί αφού δεν δημιουργούνται σκιές στη γεωμετρία της εικόνας ΣΑΡ λόγω ανάγλυφου.

Ο αλγόριθμος κατωφλίωσης Otsu εφαρμόζεται σε παράθυρα της εικόνας. Η διασπορά και το μέγεθος των οντοτήτων πλημμύρας που έχουν ανιχνευτεί στην εικόνα της διαφοράς των μέσων όρων καθορίζει α) τον τρόπο εφαρμογής των παραθύρων, β) το μέγεθος των παραθύρων, και γ) το ελάχιστο ποσοστό πλημμυρισμένων εικονοστοιχείων που θα πρέπει να βρίσκονται εντός των ορίων του παραθύρου ώστε το παράθυρο αυτό να χαρακτηριστεί ως πλημμυρισμένη περιοχή.

Σε περίπτωση διάσπαρτων οντοτήτων πλημμύρας, για τη μείωση του υπολογιστικού κόστους συνιστάται η εύρεση αρχικά των κεντροειδών των οντοτήτων και στη συνέχεια η εφαρμογή των παραθύρων με κέντρο αυτά τα κεντροειδή. Σ' αυτή την περίπτωση, επειδή οι διάσπαρτες οντότητες

παρουσιάζουν πολλά μεγέθη, η μέθοδος απαιτεί μεγάλο σχετικά παράθυρο, της τάξης των 45x45 εικονοστοιχείων. Σε τέτοια παράθυρα, επιλέγονται μικρές τιμές (1.5%) για το ποσοστό εικονοστοιχείων που έχουν ανιχνευτεί ήδη ως πλημμυρισμένα στην εικόνα της διαφοράς μέσω των όρων, ώστε να εκτελεστεί η κατωφλίωση Otsu. Όσο πιο μεγάλο είναι το παράθυρο το οποίο επιλέγεται, τόσο πιο μικρό πρέπει να είναι το ποσοστό των εικονοστοιχείων που πρέπει να έχουν ήδη ανιχνευτεί ως πλημμυρισμένα ώστε να εκτελεστεί η κατωφλίωση Otsu. Σε περίπτωση που το ποσοστό εικονοστοιχείων που έχουν ανιχνευτεί ήδη ως πλημμυρισμένα στην εικόνα της διαφοράς μέσω των όρων δεν υπερβαίνει το προκαθορισμένο κατώφλι η περιοχή θεωρείται ότι δεν περιέχει πλημμυρισμένες επιφάνειες.

Σε περίπτωση μεγάλων και συμπαγών οντοτήτων πλημμύρας, η σάρωση της εικόνας μπορεί να γίνει ανά εικονοστοιχείο χωρίς υπολογιστικό κόστος, τα παράθυρα πρέπει να είναι μικρά, της τάξης των 15x15 εικονοστοιχείων και το ποσοστό των εικονοστοιχείων που πρέπει να έχουν ήδη ανιχνευτεί ως πλημμυρισμένα στην εικόνα των διαφορών πρέπει να είναι μεγαλύτερο απ' ό,τι στην προηγούμενη περίπτωση (4%).

Η μέθοδος έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα όταν εφαρμόστηκε σε δασώδη κάλυψη γης – φυσικό περιβάλλον και σε αγροτική περιοχή. Στις δύο αυτές καλύψεις γης η ανάλυση των δεδομένων Sentinel-1 (20x22μ) θεωρείται ικανοποιητική, αφού οι χρήσεις/κάλυψη γης αλλά και οι πλημμυρισμένες περιοχές στις περιοχές αυτές είναι συνήθως μεγάλης έκτασης .

Κατά την εφαρμογή για αξιολόγηση της μεθόδου με χρήση α) εικόνων χωρίς πλημμύρα και β) χρήση εικόνων σε μετέπειτα ημερομηνίες μετά την ημερομηνία της πρώτης διαθέσιμης εικόνας που απεικονίζει το πλημμυρικό γεγονός, παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος είναι αρκετά ευαίσθητη σε καλύψεις επιφανειών από νερό. Πολύ επιτυχημένα μπορεί να ανιχνεύσει πρόσφατα και έντονα αρδευόμενα αγροτεμάχια. Η ευαισθησία της μεθόδου σε επιφάνειες καλυπτόμενες από νερό, ενδυναμώνει την απόφαση μας να μην συμμετέχουν στη μέθοδο εικόνες με ημερομηνίες λήψης στις οποίες επικρατούσαν βροχερές καιρικές συνθήκες για το τελευταίο διάστημα των τριών ημερών.

Οι διαρκείς και μικρής χωρικής έκτασης αλλαγές στο αστικό περιβάλλον εξαιτίας του ανθρωπογενούς παράγοντα, συνέβαλαν στη μη επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου στη συγκεκριμένη κάλυψη γης, ακόμη και όταν η μέθοδος τροποποιήθηκε με χρήση λιγότερων εικόνων πριν το πλημμυρικό γεγονός. Η τροποποίηση αυτή έγινε επειδή σε κάθε ζεύγος εικόνας πριν την πλημμύρα, εντοπιζόνταν πρόσκαιρες και διαφορετικές αλλαγές με αποτέλεσμα τη μεταβολή της τιμής οπισθοσκέδασης με τέτοιο τρόπο ώστε να μην είναι εφικτή η ανίχνευση «σταθερών» αλλαγών πριν την πλημμύρα.

Ένας ιδιαίτερος παράγοντας ο οποίος οδηγεί στην ύπαρξη πρόσκαιρων και διαφορετικών αλλαγών σε ζεύγη εικόνων που απεικονίζουν την ίδια αστική περιοχή αλλά σε διαφορετικές ημερομηνίες, χωρίς όμως να έχει γίνει κάποια ουσιαστική αλλαγή λόγω φυσικών παραγόντων, είναι ο μηχανισμός οπισθοσκέδασης της διέδρης γωνίας. Η μικροκυματική ακτινοβολία που προσπίπτει ανάμεσα στα κτίρια ανακλάται δύο ή και 3 συνεχόμενες φορές με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε το σήμα που στέλνεται πίσω στο δορυφόρο να είναι σχεδόν ίσο με αυτό που προσέπεσε. Εάν τοπικά υπάρχει νερό ή είναι σταθμευμένο ένα φορτηγό ή γίνονται κάποια έργα π.χ. κόψιμο κλαδιών δένδρων ώστε η ακτινοβολία από το κτίριο να προσπέσει σε λεία επιφάνεια και ύστερα να οπισθοσκεδαστεί προς τον δέκτη, τότε στην εικόνα αυτή η τιμή οπισθοσκέδασης θα είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι σε άλλες εικόνες. Επομένως, σε κάθε εικόνα, ακόμα και ίδιας τροχιάς, οι διέδρες γωνίες μπορεί να δημιουργούνται σε

διαφορετικές περιοχές και πρόσκαιρα, οδηγώντας έτσι σε διαφορετικές υψηλές τιμές οπισθοσκέδασης στις εικόνες με διαφορετική ημερομηνία λήψης. Επομένως ενώ θα περιμέναμε αύξηση της τιμής της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας λόγω δίδρων γωνιών μόνο για τις λήψεις που απεικονίζεται πλημμύρα, αυτή παρουσιάζεται και σε άλλες ημερομηνίες και όχι απαραίτητα στα ίδια εικονοστοιχεία. Αυτό προκαλεί σύγχυση και στην ερμηνεία της εικόνας του μέσου όρου με εικόνες πριν την πλημμύρα και στην εικόνα των διαφορών. Ο κύριος όμως παράγοντας που οδήγησε σε μη επιτυχή αποτελέσματα της μεθόδου ήταν το γεγονός ότι η χωρική διακριτική ικανότητα των εικόνων Sentinel 1 που είναι 20 μέτρα επί 22 μέτρα, δεν επαρκεί όταν ο αστικός ιστός είναι πυκνός. Δεν μπορούν να φανούν οι αλλαγές π.χ .σε δρόμους εξαιτίας μιας πλημμύρας, στην συγκεκριμένη χωρική ανάλυση.

Η μέθοδος που προτείνεται καθιστά δυνατή και με επιτυχία την παρακολούθηση των πλημμυρικών φαινομένων στο φυσικό περιβάλλον και στις αγροτικές χρήσεις γης. Οι εικόνες Sentinel 1 είναι διαθέσιμες κάθε 6 μέρες και όχι συχνότερα, επομένως η παρακολούθηση κάποιου τέτοιου φαινομένου είναι δυνατή όταν αυτό διαρκεί περισσότερο από έξι μέρες.

Τέλος, αυτό που πρέπει να τονισθεί είναι η συμβολή της Τηλεπισκόπησης στη χαρτογράφηση πλημμύρων αλλά και γενικότερα κι άλλων φυσικών καταστροφών οι οποίες επιφέρουν αλλαγές στη γήινη επιφάνεια. Η ανάπτυξη μεθόδων για τη χαρτογράφηση πλημμύρων είναι ένα αντικείμενο με το οποίο έχουν ασχοληθεί αρκετά οι επιστήμονες που ασχολούνται με τον τομέα της Τηλεπισκόπησης. Η μέθοδος που αναπτύχθηκε στη διπλωματική αυτή είναι μια ημι-αυτόματη και λειτουργεί καλύτερα σε μη αστικές περιοχές. Για πληρέστερη αξιολόγηση της μεθόδου, θα πρέπει να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων της με αυτά κάποιας άλλης μεθόδου, καθώς επίσης και η σύγκριση του αποτελέσματος με αεροφωτογραφίες στις περιοχές μελέτης κατά τις ημερομηνίες των γεγονότων πλημμύρας. Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμη η εφαρμογή της μεθόδου με εικόνες ραντάρ με υψηλότερη διακριτική ικανότητα, όπως οι εικόνες του Cosmo - SkyMed ή του TerraSar- X των οποίων η χωρική διακριτική ικανότητα φτάνει τα 3-5 μέτρα και το 1 μέτρο αντίστοιχα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων και η προσαρμογή της μεθόδου στα νέα δεδομένα με βάση ελέγχους που θα πραγματοποιούνταν θα είχε πολύ ενδιαφέρον όσον αφορά το ρόλο που παίζει η χωρική διακριτική ικανότητα στη χαρτογράφηση πλημμύρων. Ειδικά για τις αστικές περιοχές, η χρήση εικόνων με υψηλή χωρική ανάλυση θα οδηγούσε σε αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα.

Βιβλιογραφία

Καραθανάση Βασιλεία (2014), Σημειώσεις μαθήματος Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση, Ε.Μ.Π.

Amitrano, Donato; Di Martino, Gerardo; Iodice, Antonio; Riccio, Daniele; Ruello, Giuseppe (2018). Unsupervised Rapid Flood Mapping Using Sentinel-1 GRD SAR Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, (), 1–10. doi:10.1109/TGRS.2018.2797536

Chini, Marco; Hostache, Renaud; Giustarini, Laura; Matgen, Patrick (2017). A Hierarchical Split-Based Approach for Parametric Thresholding of SAR Images: Flood Inundation as a Test Case. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(12), 6975–6988. doi:10.1109/tgrs.2017.2737664

Chini, Marco; Pelich, Ramona; Pulvirenti, Luca; Pierdicca, Nazzareno; Hostache, Renaud; Matgen, Patrick (2019). Sentinel-1 InSAR Coherence to Detect Floodwater in Urban Areas: Houston and Hurricane Harvey as A Test Case. *Remote Sensing*, 11(2), 107–. doi:10.3390/rs11020107

D'Addabbo, A.; Refice, A.; Pasquariello, G.; Lovergine, F.; Manfreda, S. (2016). 2016 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS) - Following flood dynamics by SAR/optical data fusion. , (), 1–5. doi:10.1109/EESMS.2016.7504848

ESA-SNAP help contents

Ferretti, A.; Prati, C.; Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. , 39(1), 0–20. doi:10.1109/36.898661

Giustarini, Laura; Hostache, Renaud; Kavetski, Dmitri; Chini, Marco; Corato, Giovanni; Schläffer, Stefan; Matgen, Patrick (2016). Probabilistic Flood Mapping Using Synthetic Aperture Radar Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, (), 1–12. doi:10.1109/tgrs.2016.2592951

Hannevik, Tonje Nanette Arnesen (2012). [IEEE IGARSS 2012 - 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - Munich, Germany (2012.07.22-2012.07.27)] 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - Multi-channel and multi-polarisation ship detection. , (), 5149–5152. doi:10.1109/igarss.2012.6352451

Hostache, R.; Matgen, P.; Wagner, W. (2012). Change detection approaches for flood extent mapping: How to select the most adequate reference image from online archives?. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19(), 205–213. doi:10.1016/j.jag.2012.05.003

John R. Jensen (2015), Τηλεπισκόπηση Περιβάλλοντος: Μια προοπτική για τα φυσικά διαθέσιμα, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Li, Y., Martinis, S., Plank, S., & Ludwig, R. (2018). An automatic change detection approach for rapid flood mapping in Sentinel-1 SAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 123–135. doi:10.1016/j.jag.2018.05.023

Nobuyuki Otsu (1979), A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, 9(1), 62–66. doi:10.1109/tsmc.1979.4310076

Orton, Philip; Lin, Ning; Gornitz, Vivien; Colle, Brian; Booth, James; Feng, Kairui; Buchanan, Maya; Oppenheimer, Michael; Patrick, Lesley (2019). New York City Panel on Climate Change 2019 Report Chapter 4: Coastal Flooding. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1439(1), 95–114. doi:10.1111/nyas.14011

Pulvirenti, L.; Pierdicca, N.; Chini, M.; Guerriero, L. (2011). An algorithm for operational flood mapping from Synthetic Aperture Radar (SAR) data using fuzzy logic. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(2), 529–540. doi:10.5194/nhess-11-529-2011

Schlaffer, Stefan; Chini, Marco; Giustarini, Laura; Matgen, Patrick (2017). Probabilistic mapping of flood-induced backscatter changes in SAR time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 56(), 77–87. doi:10.1016/j.jag.2016.12.003

SENTINEL-1 SAR User Guide ,<https://sentinel.esa.int>

Sentinel 1 Data Products, Sentinel Online,
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/data-products>

Παράρτημα – Κώδικας στο περιβάλλον Matlab

1. Αλγόριθμος αφαίρεσης μεταξύ δύο εικόνων:

```
myDir = 'Directory\myfiles'; %gets directory, change it to yours
myFiles = dir(fullfile(myDir,'*.tif')); %gets all tif files in struct
K=length(myFiles); %the number of files in the folder
myDir2= 'Directory\results';

%reading the images in folder
FileName1 = myFiles(1).name;
fullFileName1 = fullfile(myDir, FileName1);
fprintf(1, 'Reading %s\n', fullFileName1);
[A1, R1] = geotiffread(fullfile(myDir, FileName1));
info = geotiffinfo(fullfile(myDir, FileName1));

FileName2 = myFiles(2).name;
fullFileName2 = fullfile(myDir, FileName2);
fprintf(1, 'Reading %s\n', fullFileName2);
[A2, R2] = geotiffread(fullfile(myDir, FileName2));
info = geotiffinfo(fullfile(myDir, FileName2));

[I,J]=size(A1);
diff=zeros(I,J);
for i=1:I;
    for j=1:J;
        diff(i,j)= A2(i,j)-A1(i,j);
    end
end

imshow(diff);

fprintf(1, 'Saving images \n');
baseFileName1=sprintf('%s%', 'diff.tif');
fullFileNameA1 = fullfile(myDir2,baseFileName1);
geotiffwrite(fullfile(myDir2,baseFileName1),diff,R1, 'GeoKeyDirectoryTag', info.GeoTIFFTags.GeoKeyDirectoryTag);
```

2. Αλγόριθμος υπολογισμού μέσου όρου των εικόνων σε έναν φάκελο

```
myDir = 'Directory\myfiles'; %gets directory, change it to yours
myFiles = dir(fullfile(myDir,'*.tif')); %gets all tif files in struct
K=length(myFiles); %the number of files in the folder
myDir2= 'Directory\results';

%reading the images in folder
FileName1 = myFiles(1).name;
fullFileName1 = fullfile(myDir, FileName1);
fprintf(1, 'Reading %s\n', fullFileName1);
[A1, R] = geotiffread(fullfile(myDir, FileName1));
info = geotiffinfo(fullfile(myDir, FileName1));

for i=1:K;
    fullFileName = fullfile(myDir, myFiles(i).name);
    thisImage=double(imread(fullfile(myDir, myFiles(i).name)));

    if i == 1
        sumImage = thisImage;
    else
        sumImage = sumImage + thisImage;
    end
end
sumImage = sumImage/K;

imshow(sumImage);

fprintf(1, 'Saving image \n');
baseFileName1=sprintf('%s%', 'mean.tif');
fullFileNameA3 = fullfile(myDir2,baseFileName1);
geotiffwrite(fullfile(myDir2,baseFileName1),sumImage,R, 'GeoKeyDirectoryTag',
info.GeoTIFFTags.GeoKeyDirectoryTag);
```

3. Αλγόριθμος με κεντροειδή και μέθοδο Otsu, δημιουργία χάρτη πιθανοτήτων

```
myDir = 'Directory\myfiles'; %gets directory, change it to yours
myFiles = dir(fullfile(myDir,'*.tif')); %gets all tif files in struct
K=length(myFiles); %the number of files in the folder
myDir2 = 'Directory\results';
%reading the images in folder
```

```
FileName = myFiles(1).name;
fullFileName = fullfile(myDir, FileName);
fprintf(1, 'Reading %s\n', fullFileName);
[centr, R] = geotiffread(fullfile(myDir, FileName));
info = geotiffinfo(fullfile(myDir, FileName));
```

```
FileName = myFiles(2).name;
fullFileName = fullfile(myDir, FileName);
fprintf(1, 'Reading %s\n', fullFileName);
[diff_means_thresh, R] = geotiffread(fullfile(myDir, FileName));
info = geotiffinfo(fullfile(myDir, FileName));
```

```
FileName = myFiles(3).name;
fullFileName = fullfile(myDir, FileName);
fprintf(1, 'Reading %s\n', fullFileName);
[diff_means, R] = geotiffread(fullfile(myDir, FileName));
info = geotiffinfo(fullfile(myDir, FileName));
```

```
[I,J]=size(diff_means);
sum_image=zeros(I,J);
count_image=zeros(I,J);
BW=zeros(I,J);
otsu_flood=zeros(I,J);
```

```
win_size=7;
percentage=4;
```

```
for i=1:I;
    for j=1:J;
        if centr(i,j)==1;
            i1=max(1,i-win_size);
            i2=min(I,i+win_size);
            j1=max(1,j-win_size);
            j2=min(J,j+win_size);

            count=0;
            for ii=i1:i2;
                for jj=j1:j2;
```



```

        if diff_means_thresh(ii,jj)==1;
            count=count+1;
            count_image(ii,jj)=count_image(ii,jj)+1;
        end
    end
end

npi= i2-i1+1;
npj= j2-j1+1;
if count>((percentage/100)*npi*npj);
    T=graythresh(diff_means(i1:i2,j1:j2));
    BW(i1:i2,j1:j2)= imquantize(diff_means(i1:i2,j1:j2),T);
end
sum_image(i1:i2,j1:j2)=sum_image(i1:i2,j1:j2)+BW(i1:i2,j1:j2);
for ii=i1:i2;
    for jj=j1:j2;
        if count_image(ii,jj)==0;
            otsu_flood(ii,jj)=0;
        else
            otsu_flood(ii,jj)=sum_image(ii,jj)./count_image(ii,jj);
        end
    end
end
end
end
end
end
imshow(otsu_flood);

fprintf(1, 'Saving image \n');
baseFileName1=sprintf('%s%', 'probability_map.tif');
fullFileName1 = fullfile(myDir2,baseFileName1);
geotiffwrite(fullFileName1,otsu_flood,R, 'GeoKeyDirectoryTag',
info.GeoTIFFTags.GeoKeyDirectoryTag);

```

4. Αλγόριθμος με μέθοδο Otsu και δημιουργία χάρτη πιθανοτήτων

```
myDir = 'Directory\myfiles'; %gets directory, change it to yours
myFiles = dir(fullfile(myDir,'*.tif')); %gets all tif files in struct
K=length(myFiles); %the number of files in the folder
myDir2 = 'Directory\results';
%reading the images in folder
```

```
FileName = myFiles(1).name;
fullFileName = fullfile(myDir, FileName);
fprintf(1, 'Reading %s\n', fullFileName);
[diff_means_thresh, R] = geotiffread(fullfile(FileName));
info = geotiffinfo(fullfile(FileName));
```

```
FileName = myFiles(2).name;
fullFileName = fullfile(myDir, FileName);
fprintf(1, 'Reading %s\n', fullFileName);
[diff_means, R] = geotiffread(fullfile(FileName));
info = geotiffinfo(fullfile(FileName));
```

```
[I,J]=size(diff_means_thresh);
sum_image=zeros(I,J);
count_image=zeros(I,J);
otsu_flood=zeros(I,J);
```

```
for i=1:I;
    for j=1:J;
        if isnan(diff_means(i,j))
            diff_means(i,j)=35;
        end
    end
end
win_size=7;
percentage=4;
```

```
for i=1:I;
    for j=1:J;

        if diff_means_thresh(i,j)==1;
            i1=max(1,i-win_size);
            i2=min(I,i+win_size);
            j1=max(1,j-win_size);
            j2=min(J,j+win_size);

            count=0;
```

```

for ii=i1:i2;
    for jj=j1:j2;
        count_image(ii,jj)=count_image(ii,jj)+1;
        if diff_means_thresh(ii,jj)==1;
            count=count+1;
        end
    end
end

npi= i2-i1+1;
npj= j2-j1+1;
BW=zeros(npi,npj);
if count>((percentage/100)*npi*npj);
    BW= ~imbinarize(diff_means(i1:i2,j1:j2));
end
sum_image(i1:i2,j1:j2)=sum_image(i1:i2,j1:j2)+BW;
end
end
end

otsu_flood=sum_image./count_image;

imshow(otsu_flood);

fprintf(1, 'Saving image \n');
baseFileName1=sprintf('%s%', 'probability_map.tif');
fullFileName1 = fullfile(myDir2,baseFileName1);
geotiffwrite(fullfile(myDir2,baseFileName1),otsu_flood,R, 'GeoKeyDirectoryTag',
info.GeoTIFFTags.GeoKeyDirectoryTag);

```

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα - Πηγή: https://gsp.humboldt.edu/	12
Εικόνα 2: Μήκη κύματος και συχνότητες καναλιών - Πηγή: https://earth.esa.int/	13
Εικόνα 3: Πηνειός πλημμύρα 28/02/2018.....	15
Εικόνα 4: Ιστόγραμμα Εικόνας 3.....	16
Εικόνα 5: Παράδειγμα κατωφλίωσης. Αριστερά: Αρχική εικόνα με τόνους του γκριζου. Δεξιά: Αποτέλεσμα κατωφλίωσης με τη μέθοδο Otsu. - Πηγή: Otsu, 1979.....	19
Εικόνα 6: Δεξιά η σιγμοειδής συνάρτηση S και αριστερά η συνάρτηση Z. - Πηγή: Pulvirenti et al.:An algorithm for operational flood mapping from SAR.	22
Εικόνα 7: Γράφημα επεξεργασίας εικόνων SAR στο λογισμικό SNAP.....	27
Εικόνα 8: Χάρτης περιοχής μελέτης στη Νορβηγία.....	35
Εικόνα 9: Λίμνη Bjornann, Αριστερά ESRI World Imagery, Δεξιά Open Street Map.....	36
Εικόνα 10: 22 Σεπτεμβρίου 2017.....	39
Εικόνα 11: 28 Σεπτεμβρίου 2017.....	39
Εικόνα 12: 10 Σεπτεμβρίου 2017.....	39
Εικόνα 13: 4 Οκτωβρίου 2017.....	39
Εικόνα 14: 16 Οκτωβρίου 2017.....	40
Εικόνα 15: 22 Οκτωβρίου 2017 - εικόνα πλημμύρας.....	40
Εικόνα 16: Αφαίρεση της εικόνας πλημμύρας με την εικόνα 04-09-2017.....	42
Εικόνα 17: Αφαίρεση των εικόνων 16-10-2017 και 10-10-2017.....	42
Εικόνα 18: Μέσος όρος διαφορών με την πλημμυρισμένη εικόνα.....	43
Εικόνα 19: Μέσος όρος διαφορών των ξηρών εικόνων.....	43
Εικόνα 20: Διαφορά των μέσων όρων.....	44
Εικόνα 21: Διαφορά μέσων όρων με κατώφλι mean-3s.....	45
Εικόνα 22: Διαφορά μέσων όρων με κατώφλι mean-3s σε μεγαλύτερη κλίμακα.....	45
Εικόνα 23: Διαφορά μέσων όρων με κατώφλι mean-3s σε μεγαλύτερη κλίμακα.....	45
Εικόνα 24: DEM της περιοχής μελέτης.....	46
Εικόνα 25: Κλίσεις μικρότερες από 12° με λευκό χρώμα, κλίσεις μεγαλύτερες από 12° με μαύρο χρώμα.....	47
Εικόνα 26: Πολλαπλασιασμός μάσκας εικόνας διαφορών με τη μάσκα των απότομων κλίσεων.....	47
Εικόνα 27: Μάσκα υδάτινων περιοχών.....	48
Εικόνα 28: Πλημμυρισμένες περιοχές μετά το μασκάρισμα.....	49
Εικόνα 29: Αριστερά και Δεξιά: Πλημμυρισμένες περιοχές μετά το μασκάρισμα σε μεγαλύτερη κλίμακα.....	49
Εικόνα 30: Χάρτης πιθανότητας πλημμυρισμένων εκτάσεων 21/10/2017.....	51
Εικόνα 31: Χάρτης Περιοχής Μελέτης στην Ελλάδα.....	52
Εικόνα 32: 16 Φεβρουαρίου 2018.....	55
Εικόνα 33: 28 Φεβρουαρίου 2018.....	55
Εικόνα 34: Διαφορές εικόνων α) εικόνας 28-02-2018 με εικόνα 16-02-2018 β) εικόνας 16-02-2018 με εικόνα 11-01-2018.....	57
Εικόνα 35: α) Μέσος όρος διαφορών της εικόνας πλημμύρας β) Μέσος όρος διαφορών των εικόνων χωρίς βροχή.....	58
Εικόνα 36: Διαφορά των μέσων όρων με κατώφλι mean-3std.....	59
Εικόνα 37: Πλημμύρα 28/02/2018, Πηνειός ποταμός.....	61
Εικόνα 38: Περιοχή μελέτης, Βενετία (Πηγή: Open Street Map).....	63
Εικόνα 39: Βενετία, 22/10/2019.....	64
Εικόνα 40: Βενετία, 15/11/2019.....	64
Εικόνα 41: Ιστόγραμμα εικόνας πριν το μασκάρισμα των υδάτινων επιφανειών της εικόνας διαφοράς.....	65
Εικόνα 42: Ιστόγραμμα εικόνας μετά το μασκάρισμα των υδάτινων επιφανειών στην εικόνα διαφοράς.....	65
Εικόνα 43: Μασκαρισμένη εικόνα διαφοράς.....	66
Εικόνα 44: Πλημμυρισμένες εκτάσεις στη Βενετία, 15 Νοεμβρίου 2019.....	67
Εικόνα 45: α) 22 Οκτωβρίου 2017, 15.4mm βροχής, β) 28 Οκτωβρίου 2017, 2.44mm βροχής, γ) 3 Νοεμβρίου 2017, 0.17mm βροχής.....	69
Εικόνα 46: α) 10 Σεπτεμβρίου 2017, 39.7mm βροχής, β) 4 Οκτωβρίου 2017, 50.9mm βροχής.....	69
Εικόνα 47: α) 22 Οκτωβρίου 2017, 45.6mm βροχής, β) 28 Οκτωβρίου 2017, 2mm βροχής, γ) 3 Νοεμβρίου 2017, 0mm βροχής.....	70
Εικόνα 48: α) 10 Σεπτεμβρίου 2017, 24.9mm βροχής, β) 4 Οκτωβρίου 2017, 30.3mm βροχής.....	70

Εικόνα 49: α) 4 Σεπτεμβρίου 2017, 2.5mm βροχής, β) 16 Σεπτεμβρίου 2017, 4.1mm βροχής.....	72
Εικόνα 50: : α) 22 Σεπτεμβρίου 2017, 7.7mm βροχής, β) 28 Σεπτεμβρίου 2017, 6.2mm βροχής.....	72
Εικόνα 51: α) 10 Οκτωβρίου 2017, 1mm βροχής, β) 16 Οκτωβρίου 2017, 0.8mm βροχής.....	72
Εικόνα 52: α) 4 Σεπτεμβρίου 2017, 2.5mm βροχής, β) 16 Σεπτεμβρίου 2017, 4.1mm βροχής.....	73
Εικόνα 53: α) 22 Σεπτεμβρίου 2017, 7.7mm βροχής, β) 28 Σεπτεμβρίου 2017, 6.2mm βροχής.....	73
Εικόνα 54: α)10 Οκτωβρίου 2017, 1mm βροχής, β) 16 Οκτωβρίου 2017, 0.8mm βροχής.....	73
Εικόνα 55: 28 Φεβρουαρίου 2018, 44.4mm βροχής.....	77
Εικόνα 56: 6 Μαρτίου 2018, 11.2 mm βροχής.....	77
Εικόνα 57: 12 Μαρτίου 2018, 0mm βροχής.....	77
Εικόνα 58: Σύγκριση αποτελεσμάτων 6 Μαρτίου 2018 με 12 Μαρτίου 2018. Με κίτρινο φαίνονται τα πολύγωνα που απεικονίζουν πλημμύρα στις 6 Μαρτίου 2018.....	78
Εικόνα 59: 5 Ιανουαρίου 2018, 3mm βροχής.....	79
Εικόνα 60: 11 Ιανουαρίου 2018, 0mm βροχής.....	79
Εικόνα 61: 17 Ιανουαρίου 2018, 0mm βροχής.....	79
Εικόνα 62: 23 Ιανουαρίου 2018, 4.8mm βροχής.....	79
Εικόνα 63: 29 Ιανουαρίου 2018, 0mm βροχής.....	79
Εικόνα 64: 4 Φεβρουαρίου 2018, 0mm βροχής.....	79
Εικόνα 65: 16 Φεβρουαρίου 2018, 13.4mm βροχής.....	79
Εικόνα 66: 29 Ιανουαρίου 2018 σε μεγαλύτερη κλίμακα. Δεξιά με κίτρινο περίγραμμα η πλημμυρισμένη έκταση.....	80
Εικόνα 67: Αποτέλεσμα της μεθόδου στη Βενετία.....	82
Εικόνα 68: (α), (β) Αποτέλεσμα μεθόδου στη Βενετία, μεγέθυνση.....	83
Εικόνα 69: Πλημμυρισμένες εκτάσεις Βενετία, 14 Νοεμβρίου 2019, Αποτέλεσμα EMS.....	84
Εικόνα 70: Πλατεία Αγίου Μάρκου α) Αποτέλεσμα EMS β) Αποτέλεσμα της μεθόδου που αναπτύχθηκε.....	85

