



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

**«Μελέτη επιπτώσεων δασικών πυρκαγιών στην
επικινδυνότητα πλημμύρας με μεθόδους
Τηλεπισκόπησης και πολυκριτηριακή ανάλυση»**

Διπλωματική εργασία

Σπετσιέρης Βασίλειος

Επιβλέπουσα καθηγήτρια : Β. Καραθανάση

Αθήνα, Οκτώβριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

«Μελέτη επιπτώσεων δασικών πυρκαγιών στην επικινδυνότητα πλημμύρας με μεθόδους Τηλεπισκόπησης και πολυκριτηριακή ανάλυση»

Επιμέλεια: Β. Σπετσιέρης

Επιβλέπουσα: Β. Καραθανάση

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

.....

Β. Καραθανάση

Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....

Π. Κολοκούσης

Δρ ΕΔΙΠ ΕΜΠ

.....

Β. Τσιχριντζής

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

.....
Σπετσιέρης Βασίλειος

Αγρονόμος και τοπογράφος μηχανικός – Μηχανικός γεωπληροφορικής ΕΜΠ

Copyright © Σπετσιέρης Βασίλειος, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Με την περάτωση αυτής της διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται η φοίτηση μου στην Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών - Μηχανικών Γεωπληροφορικής, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου όπου απέκτησα ανεκτίμητες γνώσεις και δεξιότητες που συνθέτουν τον σύγχρονο επαγγελματία Μηχανικό.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, την Καθηγήτρια Βασιλεία Καραθανάση, του Εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης του Τομέα Τοπογραφίας, για την ανάθεση της εργασίας και τις υποδείξεις, τις συμβουλές, την επίβλεψη και την αρωγή που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της. Ευχαριστίες θέλω να δώσω και στον κύριο Πολυχρόνη Κολοκούση (Δρ ΕΔΙΠ ΕΜΠ) για την βοήθεια που μου προσέφερε στην εξοικείωση μου με την Αντικειμενοστρεφή Ανάλυση δορυφορικών εικόνων καθώς και την επίλυση αποριών μου σε πρακτικά ζητήματα που αφορούν την εργασία. Ευχαριστίες επίσης οφείλω και στον Κωνσταντίνο Βαμβουκάκη (Δρ ΕΔΙΠ ΕΜΠ) για την βοήθεια του στην δημιουργία του ψηφιακού γεωλογικού χάρτη της Β. Εύβοιας. Ευχαριστώ τον ΟΠΕΚΕΠΕ για την παροχή ψηφιακών δεδομένων που αφορούν τις καλλιέργειες στην Β. Εύβοια. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και του φίλους μου για την στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια της ζωής μου.

Περίληψη

Αυτή η διπλωματική εργασία στοχεύει στην ανάδειξη επιπτώσεων δασικών πυρκαγιών στην επικινδυνότητα πλημμύρας αξιοποιώντας δορυφορικές εικόνες SENTINEL-2 και χρησιμοποιώντας μέθοδο πολυκριτηριακής ανάλυσης για την δημιουργία χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόστηκε σε ένα μέρος της Β. Εύβοιας που περιέχει οικισμούς που επλήγησαν από τις πλημμύρες στις 9/10/21 και είχαν προηγηθεί η μεγάλη πυρκαγιά αρχές Αυγούστου στις ίδιες εκτάσεις. Επιλέχθηκαν 2 δορυφορικές εικόνες SENTINEL-2 πριν και μετά την πυρκαγιά. Για την πολυκριτηριακή ανάλυση επιλέχθηκαν τα εξής κριτήρια: κλίση εδάφους, απόσταση από τους κύριους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου, υφή του υδρογραφικού δικτύου, γεωλογία και κάλυψη γης. Σε συνδυασμό με την πολυκριτηριακή ανάλυση εφαρμόστηκε και η μέθοδος Αναλυτικής Ιεράρχησης για την εξαγωγή βαρών του κάθε κριτηρίου που συμβάλλει στον Δείκτη Επικινδυνότητας Πλημμύρας (ΔΕΠ). Τα απαραίτητα δεδομένα είναι οι εικόνες SENTINEL-2 και τα υπόλοιπα εξάχθηκαν από το GDEM, που έχει παραχθεί κυρίως από δορυφορικές εικόνες ASTER. Οι δορυφορικές εικόνες SENTINEL-2 ταξινομήθηκαν εντός του λογισμικού eCognition με μέθοδο αντικειμενοστρεφούς ανάλυσης για να εξαχθούν οι χάρτες κάλυψης γης. Η κλίση του εδάφους, το υδρογραφικό δίκτυο με την υφή εξάχθηκαν εντός περιβάλλοντος GIS με εργαλεία γεωπεξεργασίας. Οι τελικοί χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας ταξινομήθηκαν σε 7 ζώνες επικινδυνότητας από πολύ χαμηλή έως πολύ υψηλή. Οι 2 χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας, πριν και μετά την πυρκαγιά συγκρίθηκαν μεταξύ τους ως προς τις διαφορές του και ο δεύτερος χάρτης μετά την πυρκαγιά συγκρίθηκε με επίσημες μελέτες επικινδυνότητας πλημμύρας για την περιοχή μελέτης. Παρατηρήθηκαν διαφορές στον ΔΕΠ στις καμένες εκτάσεις ανάμεσα στις 2 εικόνες αλλά σχετικά μικρότερες από τις αναμενόμενες. Για το κομμάτι της περιοχής μελέτης που έχουν εκπονηθεί επίσημες μελέτες παρατηρήθηκαν μεγάλες ομοιότητες με τους 2 χάρτες ΔΕΠ. Αυτή η διπλωματική εργασία αποδεικνύει τα οφέλη του συνδυασμού πολυκριτηριακής ανάλυσης με δεδομένα τηλεπισκόπησης για την παραγωγή πληροφορίας σχετικά με πλημμύρες, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα αξιόπιστα δεδομένα.

Λέξεις κλειδιά: Πολυκριτηριακή ανάλυση, Αντικειμενοστρεφής ανάλυση, Επικινδυνότητα Πλημμύρας, Β. Εύβοια, Πυρκαγιά, SENTINEL-2

ABSTRACT

This thesis aims to highlight the impact of forest fires on flood risk by utilizing SENTINEL-2 satellite imagery and using a multi-criteria analysis method to generate flood hazard maps. This methodology was applied to a part of North Evia containing settlements affected by the flooding on 9/10/21 and preceded by a large fire in early August in the same areas. Two SENTINEL-2 satellite images before and after the fire were selected. The following criteria were selected for the multicriteria analysis: terrain slope, distance from the main channels, drainage texture, geology and land cover. In conjunction with the multi-criteria analysis, the Analytical Hierarchy method was also applied to extract weights of each criterion contributing to the Flood Hazard Index (FHI). The necessary data are SENTINEL-2 images and the rest were extracted from GDEM, mainly generated from ASTER satellite images. The SENTINEL-2 satellite images were classified within the eCognition software using an object-oriented analysis method to extract the land cover maps. Land slope, hydrographic network with texture were extracted within GIS environment with geoprocessing tools. The final flood hazard maps were classified into 7 hazard zones from very low to very high. The 2 flood hazard maps, before and after the fire were compared with each other for differences and the second post-fire map was compared with official flood hazard studies for the study area. Differences in the FHI in burned areas were observed between the 2 images but relatively smaller than expected. For the part of the study area where official studies have been conducted, high similarities were observed with the 2 DEM maps. This thesis demonstrates the benefits of combining multicriteria analysis with remote sensing data to generate flood information when reliable data are not available.

Keywords: Multi-criteria analysis, Object-oriented analysis, Flood hazard, N. Evia, Fire, SENTINEL-2

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή	10
2.	Ανασκόπηση επιστημονικού πεδίου.....	11
2.1	Τηλεπισκόπηση και διαχείριση πλημμύρων.....	11
2.1.1	Τηλεπισκόπηση	11
2.1.2	Πλημμύρες και τεχνολογίες διαχείρισης της	12
2.1.3	Χάρτες για την διαχείριση κινδύνων πλημμύρας	12
2.2	Δορυφορικές εικόνες και SENTINEL-2.....	13
2.3	Αντικειμενοστρεφής ανάλυση εικόνων	14
2.3.1	Κατάτμηση.....	15
2.3.2	Ταξινόμηση.....	16
2.4	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	17
3.	Περιοχή μελέτης.....	18
4.	Μεθοδολογία	19
4.1	Συλλογή δεδομένων.....	20
4.2	Επεξεργασία δορυφορικών εικόνων με αντικειμενοστρεφή ανάλυση.....	21
4.2.1	Κατάτμηση των εικόνων.....	21
4.2.2	Ταξινόμηση των εικόνων.....	23
4.2.3	Ακρίβεια ταξινομήσεων	24
4.3	Υδρογραφικό δίκτυο και μορφομετρικοί παράμετροι	27
4.4	Πολυκριτηριακή ανάλυση	29
4.4.1	Κατάταξη τιμών κριτηρίων	29
4.4.2	Εκτίμηση βαρών κριτηρίων: Μέθοδος αναλυτική ιεράρχησης	31
4.5	Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας	33
5.	Αποτελέσματα	33
5.1	Χάρτες κάλυψης γης.....	33
5.2	Υδρογραφικό δίκτυο και μορφομετρικοί παράμετροι	34
5.3	Πολυκριτηριακή ανάλυση	34
5.4	Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας	38
5.4.1	Σχολιασμός των αποτελεσμάτων	38
5.4.2	Σύγκριση επικινδυνότητας πλημμύρας μεταξύ των 2 ημερομηνιών	40
5.4.3	Συσχέτιση με την πλημμύρα στις 09/10/21 και υπάρχουσες μελέτες	41
5.5	Σχολιασμός διαδικασίας ,αποτελεσμάτων και προτάσεις βελτίωσης τους	43
6.	Συμπεράσματα	45
7.	Βιβλιογραφία.....	46

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 3-1 Η περιοχή μελέτης με τις περιοχές που καταγράφηκαν καταστροφές από την πλημμύρα στις 9/10/21	19
Σχήμα 4-1 Ροή μεθοδολογίας	20
Σχήμα 4-2 Παράδειγμα κατηγοριών καμένης βλάστησης 1 και 2 σε φυσικό έγχρωμο σύνθετο	22
Σχήμα 4-3 Κατάτμηση σε υποσύνολο της εικόνας 27/09/21	23
Σχήμα 4-4 Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης	28
Σχήμα 5-1 Τα 5 κριτήρια και η επανακατηγοριοποίηση τους με βάση την συνεισφορά τους στην επικινδυνότητα πλημμύρας	37
Σχήμα 5-2 Ο χάρτης του ΔΕΠ 27/7/21 και ο χάρτης επικινδυνότητας πλημμύρας με ζώνες	39
Σχήμα 5-3 Ο χάρτης του ΔΕΠ 27/9/21 και ο χάρτης επικινδυνότητας πλημμύρας με ζώνες	39
Σχήμα 5-4 Χάρτης σύγκρισης δεικτών επικινδυνότητας πλημμύρας μεταξύ των 2 ημερομηνιών.....	41
Σχήμα 5-5 Ο χάρτης επικινδυνότητας πλημμύρας ημερομηνίας 29/07/21 με τους οικισμούς που επλήγησαν από πλημμύρα στις 9/10/21.....	42

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2-1 Τα φασματικά κανάλια των SENTINEL-2 αισθητήρων (S2A & S2B).....	14
Πίνακας 4-1 Οι 2 δορυφορικές εικόνες σε φυσικό έγχρωμο σύνθετο	20
Πίνακας 4-2 Οι κλάσεις κάλυψης γης για την κάθε δορυφορική εικόνα στην ταξινόμηση... ..	21
Πίνακας 4-3 Οι κανόνες ασαφούς λογικής που εφαρμόστηκαν για την κάθε κατηγορία	25
Πίνακας 4-4 Ο πίνακας συγχύσης για την ταξινόμηση στις 27/07/21.....	27
Πίνακας 4-5 Ο πίνακας συγχύσης για την ταξινόμηση στις 27/09/21.....	27
Πίνακας 4-6 Μορφομετρικοί παράμετροι για το σύνολο της περιοχής μελέτης.....	29
Πίνακας 4-7 Τιμές κατάταξης για την κάθε κλάση του κάθε κριτηρίου	31
Πίνακας 4-8 Εφαρμογή της μεθόδου αναλυτικής ιεράρχησης: δείκτες συνοχής και βάρη. Πηγή : Franci et al (2016).....	32
Πίνακας 5-1 Ποσοστά κάλυψης γης στις 27/09/21	33
Πίνακας 5-2 Τα διαστήματα της κάθε κατηγορίας για τους δύο χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας	38
Πίνακας 5-3 Ποσοστά έκτασης για την κάθε ζώνη επικινδυνότητας πλημμύρας. Αριστερά 27/07/21 και δεξιά 27/09/21	40
Πίνακας 5-4 Οι 3 χάρτες χωρικής μεταβολής μέγιστου βάθους πλημμύρας του ΥΠΕΝ και ο χάρτης Ε.Π για 27/09/21	43
Πίνακας 5-5 Πέντε αντίστοιχες μελέτες πολυκριτηριακής ανάλυσης για κίνδυνο ή επικινδυνότητα πλημμύρας με τα κριτήρια που εφάρμοσαν και τα βάρη τους	44

1. Εισαγωγή

Σε μία εποχή που χαρακτηρίζεται από πρωτόγνωρες παγκόσμιες προκλήσεις, η κλιματική κρίση φαίνεται να αποτελεί την σημαντικότερη λόγω των μεγάλων συνεπειών της στην ισορροπία των οικοσυστημάτων αλλά και στη διαβίωση του μεγαλύτερου μέρους του παγκόσμιου πληθυσμού. Σύμφωνα με μελέτες, τουλάχιστον το 85% του παγκόσμιου πληθυσμού έχει εκτεθεί σε συνέπειες από την κλιματική κρίση (Callaghan et al., 2021). Δύο βασικές συνέπειες είναι οι αύξηση και η ένταση των δασικών πυρκαγιών και των πλημμυρών (European Commission).

Έρευνες έχουν αποδείξει ότι υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ δασικών πυρκαγιών και των πλημμυρών που συμβαίνουν έπειτα στην ίδια περιοχή (Leopardi et al., 2015). Κρίνεται συνεπώς σκόπιμο να υπάρχει στρατηγικός σχεδιασμός με τον οποίο όχι μόνο θα εκτιμάται η επικινδυνότητα πλημμύρας (flood hazard) αλλά και οι ακριβείς συνέπειες που ενδεχομένως να έχει μια δασική πυρκαγιά στο παρελθόν.

Οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας (flood hazard maps) αποτελούν χρήσιμα εργαλεία για την εκτίμηση ευπαθών σε πλημμύρα περιοχών. Έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικές προσεγγίσεις για την παροχή δεδομένων για την διαχείριση κινδύνων πλημμύρας, χρησιμοποιώντας διαφορετικές πηγές, όπως χάρτες χρήσης γης, τοπογραφικοί χάρτες, υδραυλικά δεδομένα, πυκνότητα πληθυσμού. Οι μέθοδοι αξιολόγησης του κινδύνου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ποσοτικές και ποιοτικές (Wang et al. 2011). Οι ποσοτικές μέθοδοι προσεγγίζουν τον κίνδυνο πλημμύρας κυρίως με πιθανότητες υπέρβασης ή αναμενόμενες απώλειες, χρησιμοποιώντας αριθμητική μοντελοποίηση. Οι ποιοτικές μέθοδοι βασίζονται κυρίως στις εκτιμήσεις ειδικών και λαμβάνουν υπόψη διάφορους παράγοντες για την εκτίμηση του κινδύνου. Χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή δεικτών. Κάποιες ποιοτικές μέθοδοι περιλαμβάνουν κατάταξη και στάθμιση δεδομένων, καθιστώντας τις ημι-ποιοτικές (Wang et al. 2011).

Οι ποσοτικές μέθοδοι αν και παράγουν καλύτερα αποτελέσματα, απαιτούν αναλυτικά μορφολογικά δεδομένα και προχωρημένα αριθμητικά μοντέλα. Ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) μπορεί να διαχειριστεί με ευκολία ένα σύνολο ετερογενών δεδομένων και έτσι το καθιστά χρήσιμο εργαλείο για ποιοτικές μεθόδους που απαιτούν λιγότερο σύνθετες διαδικασίες.

Η πολυκριτηριακή ανάλυση είναι ένα εργαλείο που έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές περιβαλλοντικές μελέτες για την εκτίμηση του κινδύνου πλημμύρας. Με αυτό το εργαλείο αξιολογούνται διάφορες επιλογές και εκτιμώνται οι συνέπειές τους με βάση κάποια κριτήρια (Malczewski 2006). Συνεπώς τα GIS που χειρίζονται διαφόρων ειδών δεδομένα μπορούν να αξιοποιήσουν αυτό το εργαλείο. Η Μέθοδος Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytic Hierarchy Process - AHP) είναι μια διαδικασία εντός της πολυκριτηριακής ανάλυσης με την οποία συγκρίνονται τα κριτήρια μεταξύ τους ανά 2 με βάση την σημαντικότητά τους στην επίτευξη ενός στόχου (Saaty, 1980). Παράγεται ένας πίνακας σύγκρισης κατά ζεύγη που απεικονίζει την σημαντικότητα του κάθε κριτηρίου σε σχέση με τα άλλα. Καθώς ο χρήστης κρίνει αυθαίρετα, στο τέλος υπολογίζεται εάν υπάρχει συνοχή στις επιλογές του.

Συνήθως για την εκτίμηση επικινδυνότητας πλημμύρας απαιτείται η χαρτογράφηση των χρήσεων γης ή της εδαφοκάλυψης. Συνεπώς η χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης όπως δορυφορικές εικόνες κρίνεται απαραίτητη.

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας μιας περιοχής πριν και μετά από μια μεγάλης έντασης δασική πυρκαγιά και η εκτίμηση των ενδεχόμενων συνεπειών που είχε στον κίνδυνο πλημμύρας. Στις 3 Αυγούστου 2021 ξέσπασε στη Βόρεια Εύβοια δασική πυρκαγιά στην οποία κάηκαν 509.000 στρέμματα δασικής έκτασης (Copernicus, 2021). Στις 9 Οκτωβρίου 2021 στο Δήμο Μαντουδίου – Λίμνης - Αγίας Άννας συνέβη καταστροφική πλημμύρα στους παράκτιους οικισμούς αλλά και σε χωριά μεγαλύτερου υψομέτρου, με πολλές κατολισθήσεις και μεγάλες ζημιές σε οδικό δίκτυο και σπίτια. Σε αυτές τις εκτάσεις είχε προηγηθεί η πυρκαγιά του Αυγούστου. Συνεπώς κρίθηκε σκόπιμο να εκτιμηθεί το πόσο μεγάλος είναι η επικινδυνότητα πλημμύρας πριν και μετά την πυρκαγιά ώστε να εξεταστεί εάν υπάρχει πιθανή συσχέτιση μεταξύ των 2 καταστροφών. Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε μια ευρύτερη έκταση στην οποία περιλαμβάνονται όλοι οι οικισμοί που καταγράφηκαν καταστροφές, περιέχει ένα μεγάλο μέρος του Δήμου Μαντουδίου – Λίμνης - Αγίας Άννας και ένα μικρότερο του Δήμου Ιστιαίας – Αιδηψού .

Για την δημιουργία χάρτη είτε επικινδυνότητας πλημμύρας (flood hazard) είτε κινδύνου πλημμύρας (flood risk) έχουν γίνει αρκετές μελέτες στο παρελθόν με χρήση GIS και πολυκριτηριακής ανάλυσης (Sinha et al. 2008, Pradhan 2010, Krishnamurthy and Jayaprakash 2013, Yahaya et al. 2010, Musungu et al. 2012). Η μεθοδολογία αυτής της διπλωματικής εργασίας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη μελέτη των Franci et al (2016). Για την δημιουργία των τελικών χαρτών κινδύνου αξιοποιήθηκαν 5 κριτήρια: 2 πολυφασματικές δορυφορικές SENTINEL-2 πριν και μετά την πυρκαγιά, η γεωλογία του εδάφους, η υδρογραφική υφή του δικτύου, η απόσταση από τους κύριους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου και η κλίση του εδάφους.

2. Ανασκόπηση επιστημονικού πεδίου

2.1 Τηλεπισκόπηση και διαχείριση πλημμύρων

2.1.1 Τηλεπισκόπηση

Η τηλεπισκόπηση είναι η επιστήμη και η τέχνη της απόκτησης πληροφοριών για ένα αντικείμενο, μια περιοχή ή ένα φαινόμενο δια μέσου της ανάλυσης δεδομένων, τα οποία έχουν αποκτηθεί από μια συσκευή, η οποία δεν είναι σε επαφή με το υπό έρευνα αντικείμενο, περιοχή, ή φαινόμενο (Αργιαλάς, 1999).

Με τον όρο τηλεπισκοπικές απεικονίσεις αποκαλούνται οι διαφόρων μορφών καταγραφές της φυσικής και κοινωνικοοικονομικής πραγματικότητας και του περιβάλλοντος, όπως αυτές προκύπτουν σε αναλογική ή ψηφιακή μορφή απ' τους αντίστοιχους τηλεπισκοπικούς δέκτες.

Η αξιοποίηση τηλεπισκοπικών απεικονίσεων για τη μελέτη της γης άρχισε τη δεκαετία του 1960, όταν οι τεχνικές δυνατότητες των δορυφόρων που βρίσκονταν σε τροχιά γύρω από τη γη, ακολούθησαν τη ραγδαία ανάπτυξη των δυνατοτήτων των Η/Υ για τη διαχείριση μεγάλου

όγκου δεδομένων. Οι αεροφωτογραφίες καθώς και οι απεικονίσεις από οπτικούς δέκτες και δέκτες radar, οι οποίοι μεταφέρονται είτε από αεροπλάνα είτε από δορυφόρους, είναι οι διάφορες μορφές καταγραφής δεδομένων από απόσταση, με πιο χαρακτηριστικά και ευρέως χρησιμοποιούμενα τα δεδομένα που προέρχονται από δέκτες που βρίσκονται πάνω σε δορυφόρους.

2.1.2 Πλημμύρες και τεχνολογίες διαχείρισης της

Οι πλημμύρες αποτελούν σημαντική αιτία απώλειας ανθρώπινων ζώων, καταστροφής υποδομών και αρκετά ζημιογόνες για την οικονομία των χωρών. Οι πλημμύρες, ως φυσικές καταστροφές, δεν μπορούν να προληφθούν πλήρως. Ως εκ τούτου, χρειάζεται να ληφθούν προληπτικά μέτρα από τις κυβερνήσεις ώστε να περιοριστούν οι καταστροφικές τους επιπτώσεις. Καθώς οι πλημμύρες είναι δύσκολο να προβλεφθούν λόγω των πάρα πολλών κλιματικών και περιβαλλοντικών παραγόντων, απαιτούνται μέσα τελευταίας τεχνολογίας.

Με χρήση των τεχνολογιών τηλεπισκόπησης έχουν γίνει δεκάδες έρευνες τα τελευταία χρόνια για διαχείριση και την πρόληψη πλημμύρων. Στην ανασκόπηση των Munawar et al (Munawar et al , 2022) παρουσιάζονται πλήθος αυτών των μελετών. Στην πλειοψηφία τους οι μελέτες αποσκοπούν στην εκτίμηση του επικινδυνότητας πλημμυρών σε συγκεκριμένες περιοχές εξετάζοντας διάφορες παραμέτρους όπως μετεωρολογικά στοιχεία προηγούμενων ετών ή την υπάρχουσα στάθμη των υδάτων. Οι μεθοδολογίες αυτών των ερευνών κατηγοριοποιούνται κυρίως σε δημιουργία υδρολογικών μοντέλων, αριθμητικών μοντέλων, και τεχνικές μηχανικής μάθησης (machine learning). Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια οι τεχνικές μηχανικής μάθησης υιοθετούνται όλο και περισσότερο από ερευνητές καθώς μειώνουν τις τελικές αβεβαιότητες και διαχειρίζονται καλύτερα δεδομένα που επηρεάζονται από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως σύννεφα και ρύπανση.

Οι τηλεπισκοπικοί δέκτες σύμφωνα με την παραπάνω ανασκόπηση μπορούν να διαχωριστούν σε 2 κατηγορίες: Τους ενεργητικούς και τους παθητικούς. Οι ενεργητικοί δέκτες χρησιμοποιούν δικές τους πηγές ακτινοβολίας και είναι οι αισθητήρες radar και LIDAR. Οι παθητικοί δέκτες βασίζονται στην ανακλώμενη Ηλιακή ακτινοβολία και πρόκειται για δορυφορικούς αισθητήρες λήψης πολυφασματικών και υπερφασματικών απεικονίσεων. Με την πολυφασματική απεικόνιση συλλαμβάνονται δεδομένα σε μορφή εικόνας εντός συγκεκριμένων μηκών κύματος σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Τα μήκη κύματος μπορούν να διαχωριστούν με φίλτρα ή να ανιχνευθούν με τη χρήση οργάνων που είναι ευαίσθητα σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, συμπεριλαμβανομένου του φωτός από συχνότητες πέρα από το εύρος του ορατού φωτός. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι δορυφορικές εικόνες SENTINEL-2 που αναλύονται σε επόμενη υπο-ενότητα.

2.1.3 Χάρτες για την διαχείριση κινδύνων πλημμύρας

Η Ευρωπαϊκή Ένωση στην Οδηγία 2007/60/EK «Αξιολόγηση και Διαχείριση Κινδύνων Πλημμύρας» καλεί τα κράτη μέλη να καταρτίσουν και δημοσιοποιήσουν Χάρτες Επικινδυνότητας Πλημμύρας και Χάρτες Κινδύνων Πλημμύρας για όλα τα Υδατικά Διαμερίσματα των μελών. Σύμφωνα με αυτήν την οδηγία αυτά τα 2 είδη χαρτών ορίζονται ως εξής:

- Οι Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας διερευνούν την πιθανότητα εμφάνισης πλημμύρας σε μια περιοχή από ακραία φαινόμενα και καταρτίζονται, όπου χρειάζεται, και για άλλες αιτίες, όπως πλημμύρες από τη θάλασσα ή πλημμύρες από υπόγεια ύδατα. Στους χάρτες αυτούς απεικονίζεται η επιφάνεια κατάκλισης από το νερό, το μέγιστο βάθος νερού, η μέγιστη ταχύτητα ροής και πληροφορίες για τους χρόνους άφιξης και παραμονής του πλημμυρικού κύματος σε σημεία ενδιαφέροντος εντός των περιοχών που κατακλύζονται. Οι χάρτες αυτοί χωρίζονται σε πλημμύρες χαμηλής, μέσης και υψηλής πιθανότητας υπέρβασης.
- Οι Χάρτες Κινδύνου Πλημμύρας περιγράφουν τις δυνατές αρνητικές συνέπειες που συνδέονται με τις πλημμύρες χαμηλής/μέσης/υψηλής πιθανότητας υπέρβασης και διαμορφώνονται με βάση : (α) τον ενδεικτικό αριθμό κατοίκων που ενδέχεται να πληγούν, (β) τους τύπους οικονομικής δραστηριότητας στην περιοχή που ενδέχεται να πληγούν, (γ) εγκαταστάσεις που ενδέχεται να προκαλέσουν ρύπανση της γύρω περιοχής σε περίπτωση πλημμύρας, (δ) προστατευόμενες περιοχές σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία που ενδέχεται να πληγούν, (ε) άλλες πληροφορίες που θεωρούνται χρήσιμες, όπως η επισήμανση των ζωνών όπου υπάρχει το ενδεχόμενο πλημμυρών με αυξημένο ποσοστό μεταφερόμενων ιζημάτων και πλημμυρών που μπορεί να προκαλέσουν ροή λάσπης ή κατολισθήσεις, καθώς και πληροφορίες για άλλες σημαντικές πηγές ρύπανσης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δημιουργήθηκαν χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας που δείχνουν τις περιοχές που είναι πιο πιθανό να συμβούν πλημμυρικά φαινόμενα.

2.2 Δορυφορικές εικόνες και SENTINEL-2

Η SENTINEL-2 είναι μια αποστολή του προγράμματος Copernicus της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Εταιρείας, η οποία περιλαμβάνει την κίνηση δύο δορυφόρων σε πολική τροχιά, τοποθετημένων στην ίδια τροχιά, με διαφορά φάσεων 180° μεταξύ τους. Σκοπός της είναι η παρακολούθηση της μεταβλητότητας των συνθηκών της επιφάνειας της γης, ενώ το μεγάλο πλάτος σάρωσης (290 km) και ο υψηλός χρόνος επαναφοράς (10 ημέρες στον ισημερινό με έναν δορυφόρο και 5 ημέρες με 2 δορυφόρους σε συνθήκες χωρίς σύννεφα, που καταλήγει σε 2-3 ημέρες στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη) υποστηρίζουν την παρακολούθηση των αλλαγών στην επιφάνεια της Γης.

Η αποστολή SENTINEL-2 έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Πολυφασματικά δεδομένα με 13 κανάλια στο ορατό, εγγύς υπέρυθρο και υπέρυθρο τμήμα του φάσματος μικρού μήκους κύματος
- Συστηματική παγκόσμια κάλυψη των χερσαίων επιφανειών από 56° N έως 84° B, των παράκτιων υδάτων και ολόκληρης της Μεσογείου.
- Καταγραφή της κάθε έκτασης κάθε 10 ημέρες υπό τις ίδιες γωνίες θέασης. Σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, η σάρωση του Sentinel-2 επικαλύπτεται και ορισμένες περιοχές παρατηρούνται δύο ή περισσότερες φορές κάθε 10 ημέρες, αλλά με διαφορετικές γωνίες θέασης.
- Χωρική ανάλυση 10 m, 20 m και 60 m.

- Οπτικό πεδίο 290 km (Field of View)
- Ελεύθερη και ανοικτή πολιτική δεδομένων

Οι δορυφόροι Sentinel-2 φέρουν από ένα πολυφασματικό δέκτη (MSI) με 13 φασματικά κανάλια στο ορατό/εγγύς υπέρυθρο (VNIR) και στο υπέρυθρο μικρού μήκους κύματος (SWIR).

Πίνακας 2-1 Τα φασματικά κανάλια των SENTINEL-2 αισθητήρων (S2A & S2B)

SENTINEL-2 Bands	S2A		S2B		Spatial resolution (m)
	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	
1 – Coastal aerosol	442.7	21	442.3	21	60
2 - Blue	492.4	66	492.1	66	10
3 - Green	559.8	36	559.0	36	10
4 - Red	664.6	31	665.0	31	10
5 - Vegetation red edge	704.1	15	703.8	16	20
6 - Vegetation red edge	740.5	15	739.1	15	20
7 - Vegetation red edge	782.8	20	779.7	20	20
8 - NIR	832.8	106	833.0	106	10
8a - Narrow NIR	864.7	21	864.0	22	20
9 - Water vapour	945.1	20	943.2	21	60
10 - SWIR – Cirrus	1373.5	31	1376.9	30	60
11 - SWIR	1613.7	91	1610.4	94	20
12 - SWIR	2202.4	175	2185.7	185	20

2.3 Αντικειμενοστρεφής ανάλυση εικόνων

Στην επιστήμη της Τηλεπισκόπησης ένας από τους πιο συνήθεις στόχους είναι η εξαγωγή καλύψεων γης από μια περιοχή χρησιμοποιώντας δορυφορικά δεδομένα. Μέχρι το 1999 η ανάλυση των δορυφορικών εικόνων γινόταν βάσει εικονοστοιχείων (pixel – based image

analysis) καθώς οι μέχρι τότε δορυφόροι είχαν χωρική ανάλυση μεγαλύτερη των επίγειων χαρακτηριστικών ενδιαφέροντος. Με την εκτόξευση του δορυφόρου υψηλής ανάλυσης IKONOS οι μέθοδοι ανάλυσης εικόνων άλλαξαν από ανάλυση των εικονοστοιχείων σε ανάλυση αντικειμένων. Οι μέθοδοι ανάλυσης που βασίζονται σε εικονοστοιχεία χρησιμοποιούν μόνο την φασματική πληροφορία που είναι διαθέσιμη για κάθε εικονοστοιχείο για την ανάλυση της εικόνας . Ενώ είναι πιο γρήγορες , αλλά όχι αποτελεσματικές για εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης και ανίχνευσης ετερογενών δεδομένων καθώς αγνοούνται θέσεις ιεραρχίας και τοπολογίας των χαρακτηριστικών της εικόνας. Συνεπώς αναδύθηκε η μέθοδος της αντικειμενοστρεφούς ανάλυσης εικόνων (Object Based Image Analysis) ως ιδανικότερη μέθοδος ανάλυσης εικόνων (Hossain & Chen, 2019).

Η μέθοδος αυτή ομαδοποιεί τα εικονοστοιχεία σε μεμονωμένα αντικείμενα (objects), δημιουργώντας σημασιολογικά αντικείμενα με βάση κάποιες χωρικές, φασματικές ή γεωμετρικές ιδιότητες τους. Ο στόχος της OBIA είναι ο προσδιορισμός σύνθετων κλάσεων που ορίζονται από χωρικές και ιεραρχικές σχέσεις κατά τη διάρκεια της ταξινόμησης. Απαρτίζεται από δύο φάσεις: την κατάτμηση πολλαπλών επιπέδων και την ταξινόμηση της εικόνας. Η κατάτμηση ορίζεται ως η μέθοδος διαίρεσης της εικόνας σε ομογενείς περιοχές και μπορεί να γίνει σε πολλαπλά επίπεδα τα οποία διαφοροποιούνται από το μέγεθος των αντικειμένων τους. Η αρχική κατακερμάτιση της εικόνας σε αντικείμενα, παρομοιάζει με τον τρόπο που το ανθρώπινο μάτι αντιλαμβάνεται το περιβάλλον με υψηλή ακρίβεια. Ένα από τα πλεονεκτήματα της κατάτμησης είναι ότι μειώνει την φασματική διακύμανση των αντικειμένων που ανήκουν στην ίδια κλάση που θα ταξινομηθεί έπειτα, εξαφανίζοντας ταυτόχρονα το φαινόμενο αλατιού - πιπεριού (salt-and-pepper effect) που προκύπτει από τα μεμονωμένα εικονοστοιχεία που ταξινομήθηκαν εσφαλμένα, φαινόμενο που παρουσιάζεται συνήθως στην ταξινόμηση βάσει εικονοστοιχείων. Εάν γίνει σωστά η κατάτμηση , τα παραγόμενα αντικείμενα θα ταυτίζονται με τα περιγράμματα των πραγματικών αντικειμένων στην εικόνα που μας ενδιαφέρει μετέπειτα να ταξινομήσουμε. Τα αντικείμενα μπορούν εύκολα να εξαχθούν ως διανύσματα και να εισαχθούν στα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών για περαιτέρω επεξεργασία. Εν κατακλείδι, η μέθοδος αντικειμενοστρεφούς ανάλυσης εικόνας υπερτερεί έναντι των μεθόδων βάσει εικονοστοιχείων καθώς δίνει την δυνατότητα να ληφθούν υπόψη πολλά περισσότερα χαρακτηριστικά των κλάσεων ενδιαφέροντος πέρα της φασματικής υπογραφής τους και να γίνει έπειτα ταξινόμηση σε πολλαπλά επίπεδα.

2.3.1 Κατάτμηση

Η κατάτμηση εικόνας είναι το αρχικό και βασικότερο στάδιο της αντικειμενοστρεφούς ανάλυσης, κατά την οποία η εικόνα διαιρείται σε επιμέρους περιοχές που ονομάζονται αντικείμενα. Στόχος των αλγορίθμων κατάτμησης είναι η ομαδοποίηση των εικονοστοιχείων σε αντικείμενα με παρόμοια χαρακτηριστικά. Τα εικονοστοιχεία από μόνα τους δεν περιέχουν σημασιολογική πληροφορία που να σχετίζεται και με τα γύρω τους, παρά μόνο φασματική. Τα παραγόμενα αντικείμενα έχουν χωρικά, φασματικά και τοπολογικά χαρακτηριστικά, αντίστοιχα με τα πραγματικά αντικείμενα της περιοχής που εκπροσωπούν. Επιπλέον ,τα φασματικά τους χαρακτηριστικά δεν περιορίζονται σε τιμές καναλιών αλλά περιλαμβάνουν μέση, ελάχιστη, μέγιστη τιμή και τα παράγωγα τους.

Υπάρχουν τεσσάρων ειδών κατατμήσεις οι οποίες χωρίζονται με βάσει τον αλγόριθμό τους ως εξής:

- Κατατμήσεις βάσει σημείου (point based)
- Κατατμήσεις βάσει ακμών (edge based)
- Κατατμήσεις βάσει περιοχών (region based)
- Συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων

Είναι σύνηθες τα πραγματικά αντικείμενα που ενδιαφέρουν τον χρήστη να ταξινομήσει να διαφέρουν ως προς την κλίμακα ανάλυσης. Για αυτό συνηθίζεται η κατάτμηση να γίνεται σε πολλαπλά επίπεδα διαφορετικής κλίμακας το κάθε ένα. Έπειτα τα αντικείμενα συνδυάζονται για την καλύτερη ταξινόμηση.

Για αυτήν την διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό eCognition της Trimble. Το λογισμικό αυτό έχει δυο προσεγγίσεις: α) την από πάνω προς τα κάτω, κατά την οποία τα αντικείμενα του πρώτου επιπέδου διαιρούνται σε μικρότερα σε επόμενα επίπεδα και την β) από κάτω προς τα πάνω, όπου τα αντικείμενα ενώνονται σε μεγαλύτερα. Η μέθοδος κατάτμησης που εφαρμόστηκε στην εργασία λέγεται εντός του λογισμικού multiresolution segmentation (πολλαπλής κατάτμησης) και είναι κατάτμηση βάσει περιοχών (region based).

Με τον αλγόριθμο πολλαπλής κατάτμησης σε περιοχές ενώνονται βάσει του κριτηρίου ομοιότητας το οποίο βασίζεται στην εσωτερική ετερογένεια των περιοχών, η οποία ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της τιμής της εν λόγω περιοχής και του αθροίσματος των τιμών των δύο περιοχών που μαζί σχηματίζουν το εν λόγω αντικείμενο. Πριν υλοποιηθεί ο αλγόριθμος ορίζονται παράμετροι από τον χρήστη, συνήθως έπειτα αρκετές δοκιμές για τον υπολογισμό της ετερογένειας των αντικειμένων. Οι παράμετροι είναι :

- Κλίμακα (Scale): Καθορίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ετερογένεια των παραγόμενων αντικειμένων. Όσο αυξάνεται η τιμή της κλίμακας, τόσο αυξάνεται η ετερογένεια των αντικειμένων και το μέγεθος τους.
- Χρώμα (Color): Καθορίζει το βάρος με το οποίο οι φασματικές τιμές συμβάλλουν στην κατάτμηση της εικόνας και είναι το σταθμισμένο άθροισμα των τυπικών αποκλίσεων κάθε καναλιού για μια δεδομένη περιοχή/αντικειμένου.
- Σχήμα (Shape): Καθορίζει το βάρος που συμβάλλει το σχήμα έναντι του χρώματος και αναλύεται σε 2 παραμέτρους που έχουν να κάνουν με την ομαλότητα του σχήματος (smoothness) και το πόσο συμπαγές είναι (compactness). Το πρώτο σχετίζεται με λεία περιγράμματα και αποτελεί την αναλογία της περιμέτρου ενός αντικειμένου με την περίμετρο του περιγραφόμενου παραλληλογράμμου του αντικειμένου. Το δεύτερο είναι η αναλογία της περιμέτρου ενός αντικειμένου με την τετραγωνική ρίζα του αριθμού των εικονοστοιχείων του.

Η μεταβλητές του χρώματος και του σχήματος δέχονται τιμές από 0 έως 1 και το άθροισμα τους πρέπει να είναι ίσο με 1. Το ίδιο ισχύει και για τις 2 υποπαραμέτρους του σχήματος μεταξύ τους.

2.3.2 Ταξινόμηση

Ως ταξινόμηση της εικόνας κατά την αντικειμενοστρεφή ανάλυση ορίζεται η διαδικασία κατά την οποία τα αντικείμενα που δημιουργήθηκαν κατά το προηγούμενο στάδιο της

κατάτμησης, αναπαριστούν πλέον σημασιολογικές οντότητες, ενώνοντας εικονοστοιχεία με παρόμοια χαρακτηριστικά. Στην αντικειμενοστρεφή ανάλυση εικόνας τα αντικείμενα έχοντας χωρική και τοπολογική πληροφορία από την κατάτμηση κατηγοριοποιούνται σε κλάσεις με βάση την φασματική τους υπογραφή. Τα αντικείμενα συνιστούν μια ιεραρχία επιπέδων που συμμετέχουν σε ένα δίκτυο, και η μοντελοποίηση τους διαμορφώνεται από κανόνες.

Το λογισμικό διαθέτει διάφορες μεθόδους ταξινόμησης των αντικειμένων από τις οποίες στη συγκεκριμένη εργασία αξιοποιήθηκε η μέθοδος του εγγύτερου γείτονα (nearest neighbour). Κατά την μέθοδο του εγγύτερου γείτονα απαιτείται δειγματοληψία που μπορεί να έχει γίνει επίγεια ή φωτοερμηνευτικά. Συγκεκριμένα ένα αριθμός αντικειμένων επιλέγονται ως περιοχές ελέγχου για την κάθε κλάση που συμμετέχει στην ταξινόμηση. Η ταξινόμηση του εγγύτερου γείτονα στο eCognition βασίζεται σε αλγόριθμο ασαφούς λογικής όπου τα ταξινομημένα αντικείμενα συμμετέχουν σε άνω της 1 κλάσεις. Το κάθε υποψήφιο προς ταξινόμηση αντικείμενο έχει τιμή μέλους ανάλογα με το πόσο προσεγγίζει τα αντικείμενα που συμμετείχαν στην δειγματοληψία της κάθε κλάσης. Όσο μεγαλύτερος ο βαθμός συμμετοχής μεταξύ της καλύτερης και της δεύτερης καλύτερης ανάθεσης κατηγορίας, τόσο καλύτερη είναι η σταθερότητα ταξινόμησης ενός αντικειμένου εικόνας. Ο χρήστης μπορεί να προσθέσει κανόνες ασαφούς λογικής για την κάθε κλάση ώστε να βελτιωθεί η ταξινόμηση. Η ασαφής λογική ή ασαφείς κανόνες βασίζεται στην θεωρία των ασαφών συνόλων για να γίνει η κατά προσέγγιση επαγωγή. Η ασαφής λογική επιτρέπει τη χρήση των συναρτήσεων μέλους και του βαθμού αληθείας που αποδίδεται στο εξαγόμενο αντικείμενο. Τα ασαφή σύνολα έχουν συναρτήσεις (membership function) που εκφράζουν τον βαθμό συμμετοχής τους (degree of truth), η οποία είναι η μαθηματική προσέγγιση για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας.

2.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Σε αυτό το υποκεφάλαιο αναφέρονται μελέτες από την διεθνή βιβλιογραφία που συνδυάζουν χάρτες επικινδυνότητας ή κινδύνου πλημμύρας με πολυκριτηριακή ανάλυση με ή χωρίς αναλυτική ιεράρχηση εντός GIS.

Στην μελέτη των Sinha et al (2008) η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Κόσι στην Ινδία και έχουν καταγραφεί πολλές πλημμύρες τα τελευταία χρόνια. Στην μελέτη γίνεται αρχικά υδρολογική ανάλυση του κινδύνου πλημμύρας εξετάζοντας δεδομένα για την μηνιαία εκροή νερού του ποταμού. Έπειτα έγινε υπολογισμός του Δείκτη Κινδύνου Πλημμύρας αξιοποιώντας κριτήρια με πολυκριτηριακή ανάλυση. Τα κριτήρια που επιλέχθηκαν είναι : πυκνότητα πληθυσμού, απόσταση από ενεργούς κλάδους του υδρογραφικού δικτύου, γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, υψόμετρο, κάλυψη γης, πυκνότητα βλάστησης. Τα βάρη των κριτηρίων υπολογίστηκαν με την μέθοδο της αναλυτικής ιεράρχησης.

Στην μελέτη του Pradhan B (2010) η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Κελαντάν στην Μαλαισία. Χρησιμοποιώντας μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης υπολόγισε βάρη κριτηρίων με τα οποία δημιούργησε χάρτη επικινδυνότητας πλημμύρας. Τα κριτήρια είναι : κλίση εδάφους, ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων ,καμπυλότητα ,κατεύθυνση ροής, συσσωρευση ροής, απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο, έδαφος ,κάλυψη γης, βροχόπτωση.

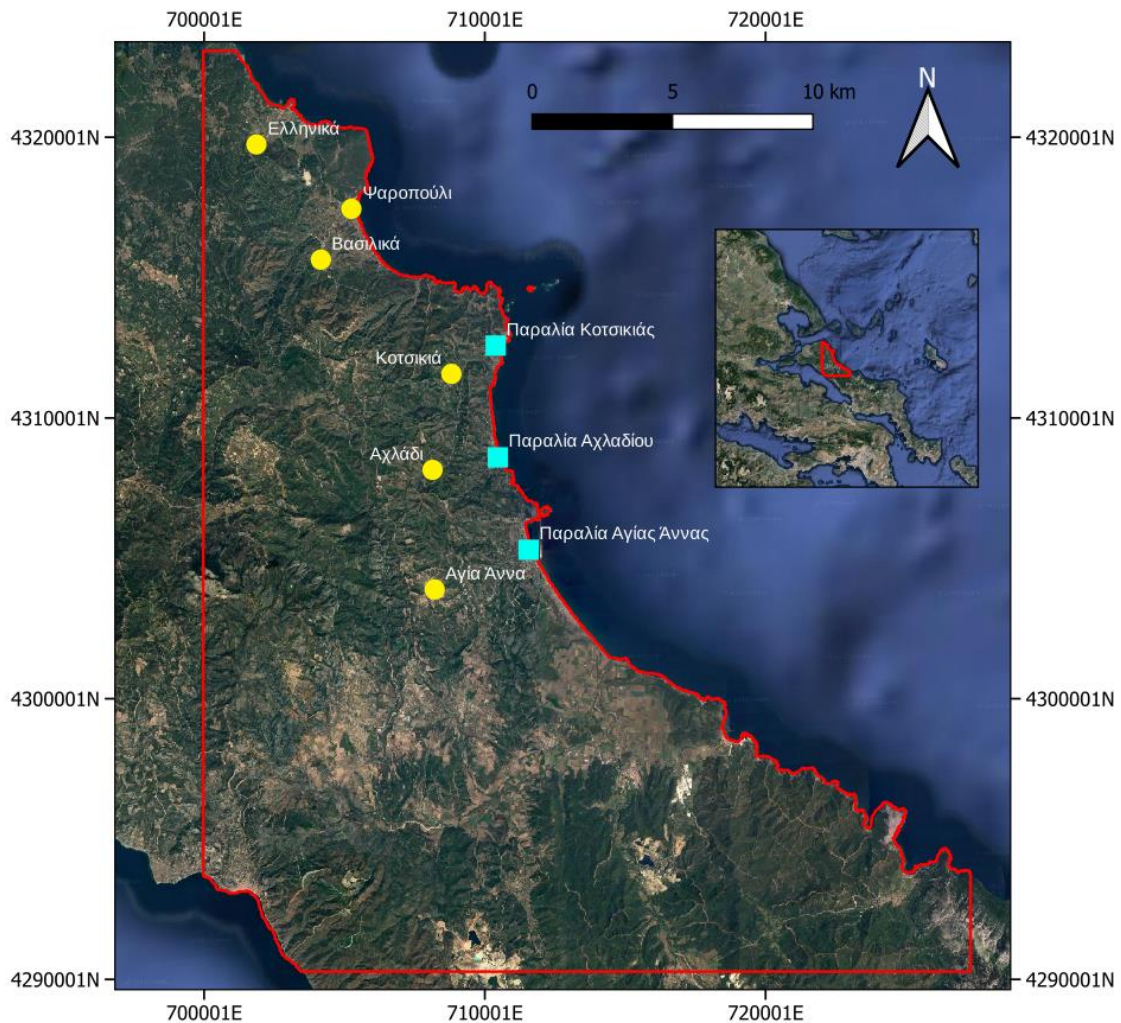
Στην μελέτη των Krishnamurthy και Jayaprakash (2013) η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Βαμαναπούραμ στην Ινδία. Και σε αυτή τη μελέτη αξιοποιήθηκαν κριτήρια που συμβάλλουν στην επικινδυνότητα πλημμύρας για την δημιουργία αντίστοιχου χάρτη. Ο χάρτης δημιουργήθηκε με πολυκριτηριακή ανάλυση και τα βάρη των κριτηρίων υπολογίστηκαν με την μέθοδο ανάλυσης σταθμισμένης επικάλυψης (Weighted Overlay Analysis). Τα κριτήρια είναι : κατανομή βροχόπτωσης, μέγεθος μικρής λεκάνης απορροής, κλίση του εδάφους, υδρογραφική πυκνότητα, χρήση/κάλυψη γης, τύπος εδάφους, οδοί ανά μικρή λεκάνη απορροής.

Στην μελέτη Franci et al (2016) η περιοχή μελέτης είναι εάν μέρος της λεκάνης απορροής του ποταμού Γιαλιά στην Κύπρο. Στην μελέτη δημιουργήθηκε ο χάρτης επικινδυνότητας πλημμύρας της περιοχής με πολυκριτηριακή ανάλυση σε συνδυασμό με μέθοδο αναλυτικής ιεράρχησης για τα βάρη των κριτηρίων. Τα κριτήρια είναι: κλίση του εδάφους, απόσταση από τους κύριους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου ,η υφή του υδρογραφικού δικτύου, γεωλογία και κάλυψη γης.

Για την παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε να ακολουθηθεί η μεθοδολογία της μελέτης των Franci et al (2016). Οι λόγοι είναι ότι η μεθοδολογία είναι σχετικά απλή, τα δεδομένα που απαιτούνται αντίστοιχα για την Β. Εύβοια είναι εύκολα προσβάσιμα, η μελέτη είναι σχετικά πρόσφατη σε σχέση με τις άλλες μελέτες, η Β. Εύβοια με την Κύπρο έχει σχετικά παρόμοια χαρακτηριστικά και στην μεθοδολογία συμπεριλαμβάνεται και αντικειμενοστρεφής ανάλυση για δορυφορικές εικόνες.

3. Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στα βόρεια της νήσου Εύβοιας, έχει έκταση περίπου 442 km² και οριοθετείται από τις συντεταγμένες X=699.960 m έως X=727.296 m και Y=4.290.286 m έως Y=4.323.090 m στο προβολικό σύστημα αναφοράς WGS 84 / UTM zone 34N. Κατά την οριοθέτηση της περιοχής μελέτης στόχος ήταν η συμπερίληψη όλων των καταγεγραμμένων περιοχών που επλήγησαν σημαντικά από την πλημμύρα στις 9 Οκτωβρίου 2021 σύμφωνα με τις δημοσιογραφικές πηγές αλλά και η ευρύτερη έκταση εκεί. Οι περιοχές που καταγεγραμμένα επλήγησαν ήταν οι οικισμοί Κοτσικιά, Αχλάδι, Βασιλικά, Ψαροπούλι, Ελληνικά, Αγία Άννα και οι παραλίες Κοτσικιάς, Αγίας Άννας και Αχλαδιού. Η περιοχή μελέτης καταλαμβάνει ένα μεγάλο μέρος του Δήμου Μαντουδίου – Λίμνης - Αγίας Άννας και ένα μικρότερο του Δήμου Ιστιαίας – Αιδηψού. Αποτελείται από πολλές μικρές σε έκταση λεκάνες απορροής και η μεγαλύτερη είναι των ποταμών Νηλεύς, Κηρεύς, Βούδωρος. Το υψόμετρο κυμαίνεται από 0 έως 987 m. Το μεγαλύτερο μέρος της έκτασης αποτελείται από αλλουβιακά πετρώματα και ακολουθούν τα μαγματικά στα βόρεια και ειδικότερα στα νότια της περιοχής.

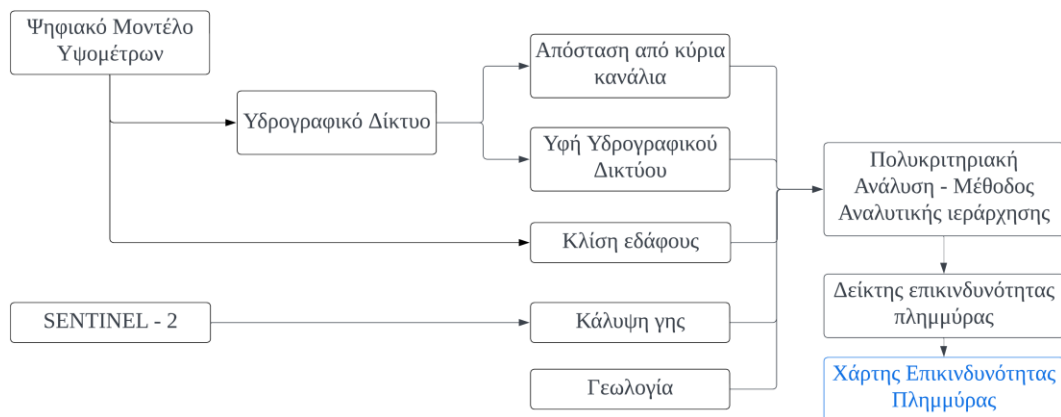


Σχήμα 3-1 Η περιοχή μελέτης με τις περιοχές που καταγράφηκαν καταστροφές από την πλημμύρα στις 9/10/21. Χάρτης από Google Earth .

4. Μεθοδολογία

Για την παραγωγή των 2 χαρτών κινδύνου πλημμύρας της περιοχής μελέτης εφαρμόστηκε μεθοδολογία πολυκριτηριακής ανάλυσης χρησιμοποιώντας παραμέτρους που έχουν άμεση συσχέτιση με τη ροή του νερού σε λεκάνες απορροής όταν υπερβαίνει τις δυνατότητες αποστράγγισης τους (Fernandez and Lutz , 2010).

Η 5 παράμετροι που σχετίζονται με τον κίνδυνο πλημμύρας και επιλέχθηκαν είναι: κλίση εδάφους, απόσταση από τους κύριους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου, γεωλογία , υφή υδρογραφικού δικτύου (drainage texture) και η κάλυψη γης . Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρου (DEM) της περιοχής μελέτης για την εξαγωγή των κλίσεων γης, του υδρογραφικού δικτύου , απόστασης από τους κύριους κλάδους και τα δεδομένα για την υφή του υδρογραφικού δικτύου. Ο γεωλογικός χάρτης που παράχθηκε στα πλαίσια της εργασίας προήλθε από ψηφιοποίηση γεωλογικού χάρτη που αρχικά σκαναρίστηκε ώστε να υπάρχει σε μορφή raster. Οι χάρτες κάλυψης γης προήλθαν από ταξινόμηση 2 δορυφορικών εικόνων SENTINEL-2.

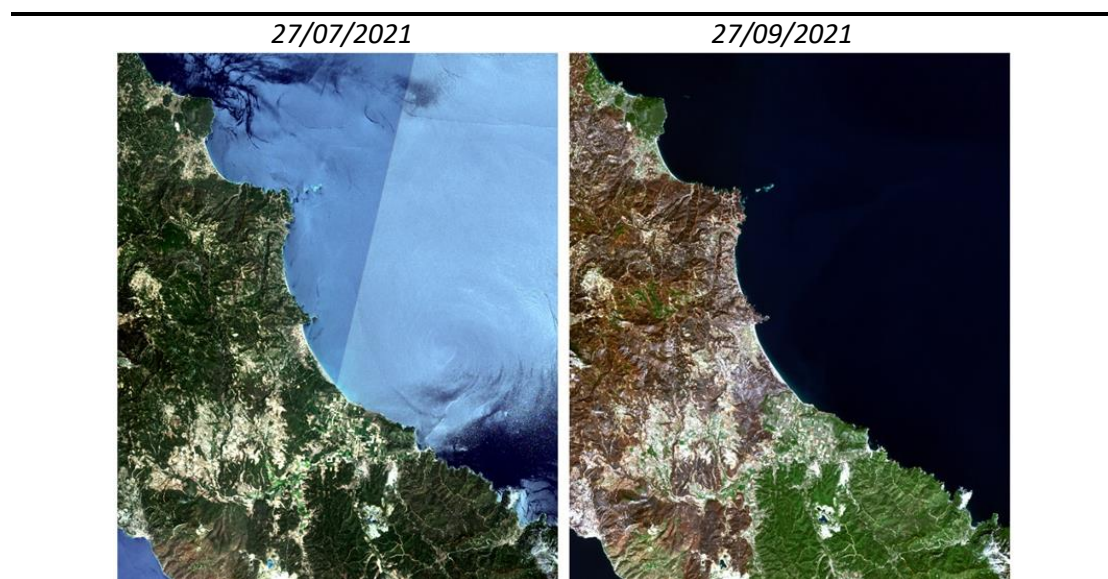


Σχήμα 4-1 Ροή μεθοδολογίας

4.1 Συλλογή δεδομένων

Για την κάλυψη γης χρησιμοποιήθηκαν 2 δορυφορικές εικόνες SENTINEL-2 με ημερομηνίες 27 Ιουλίου 2021 και 27 Σεπτεμβρίου 2021 (Πιν. 4-1) για την περιοχή μελέτης. Στόχος ήταν να έχουν παρθεί οι εικόνες πριν και μετά το χρονικό διάστημα 3 έως 10 Αυγούστου 2021 που η μεγάλη πυρκαγιά είχε καταστρέψει τεράστιο αριθμό εκτάσεων στην Β. Εύβοια, και όσο το δυνατόν πιο κοντινές χρονολογικά γίνεται. Ως ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων χρησιμοποιήθηκε το GDEM Version 3 με ανάλυση 30μ. του οργάνου ASTER στον δορυφόρο Terra ,που ανήκει στο σύστημα παρακολούθησης της γης (EOS) από την NASA .Για την γεωλογία χρησιμοποιήθηκε γεωλογικός χάρτης 1:50.000 του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών. Για τις καλλιέργειες και τις οδούς που είναι κατηγορίες χρήσης γης της ταξινόμησης μετέπειτα πάρθηκαν τα shapfile τους από το Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε και το Open Street Map αντίστοιχα.

Πίνακας 4-1 Οι 2 δορυφορικές εικόνες σε φυσικό έγχρωμο σύνθετο



4.2 Επεξεργασία δορυφορικών εικόνων με αντικειμενοστρεφή ανάλυση

Αρχικά πριν το στάδιο της ταξινόμησης, έγινε προεπεξεργασία των 2 δορυφορικών εικόνων στο λογισμικό SNAP της European Space Agency που προορίζεται για την διαχείριση εικόνων SENTINEL-2. Έγινε η κατάλληλη περικοπή τους ώστε να καλύπτουν μόνο την περιοχή μελέτης, ακολούθησε η αναδόμηση τους με βάση κανάλι 10μ ώστε να έχουν όλα την ίδια ανάλυση και αφαιρέθηκαν τα κανάλια B1 (coastal aerosol) ,B9 (water vapour) και B10 (SWIR-cirrus) καθώς κρίθηκαν περιττά για τον προσδιορισμό της εδαφοκάλυψης της περιοχής μελέτης. Ακολούθησε η διαδικασία ταξινόμησης στο λογισμικό eCognition 10 της Trimble καθώς δίνει την δυνατότητα κατάτμησης με πλήθος αλγορίθμων και εφαρμογής κανόνων ασαφούς λογικής, κάτι το οποίο δεν προσφέρουν άλλα λογισμικά GIS.

4.2.1 Κατάτμηση των εικόνων

Πριν την έναρξη της διαδικασίας της κατάτμησης των εικόνων καθορίστηκαν από τον χρήστη οι κλάσεις κάλυψης γης οι οποίες υπάρχουν στην περιοχή μελέτης στις 2 δορυφορικές εικόνες και με τις οποίες έγινε η ταξινόμηση μετέπειτα. Η επιλογή τους (Πιν. 4-2) έγινε λαμβάνοντας υπόψη τα περιθώρια που αφήνει η ανάλυση 10 μέτρων των δορυφορικών εικόνων, την συσχέτιση που έχουν με τον κίνδυνο πλημμύρας και την μελέτη των Franci et al (2016). Οι οδοί, στους οποίους περιλαμβάνονται οι χωματοδρόμοι και οι ασφαλτόδρομοι, συμμετείχαν λόγω του σχήματος τους και της φασματικής του υπογραφής που ξεχωρίζει από τα γύρω αντικείμενα, και έτσι κρίθηκε απαραίτητο να υπάρχουν ως ξεχωριστά αντικείμενα στην κατάτμηση και έπειτα ως κλάση στην ταξινόμηση. Ως προς τις κλάσεις βλάστησης επιλέχθηκαν 6 διαφορετικές λόγω των διαφορετικών τους φασματικών υπογραφών για το κάθε είδος. Έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη ποιοτικά ταξινόμηση μετέπειτα. Η επιλογή των κλάσεων βλάστησης υλοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη το Corine Land Cover 2018 του Copernicus για την περιοχή μελέτης. Στην δορυφορική εικόνα μετά την πυρκαγιά για τις καμένες εκτάσεις προστέθηκαν οι κλάσεις καμένη βλάστηση 1 και 2. Ο λόγος που επιλέχθηκαν 2 κατηγορίες καμένης γης είναι γιατί παρατηρήθηκε ότι έχουν αρκετά διαφορετική φασματική υπογραφή λόγω της παρουσίας μερικής βλάστησης στην πρώτη κατηγορία (Σχ. 4-2).

Πίνακας 4-2 Οι κλάσεις κάλυψης γης για την κάθε δορυφορική εικόνα στην ταξινόμηση

	27/07/21	27/09/21
Αστικός ιστός	+	+
Οδοί	+	+
Νερό	+	+
Καλλιέργειες	+	+
Κωνοφόρα βλάστηση	+	+
Πλατύφυλλη βλάστηση	+	+
Μικτό δάσος	+	+
Σκληροφυλλική βλάστηση	+	+
Μεταβατικές δασώδεις- θαμνώδεις εκτάσεις	+	+
Γυμνό έδαφος	+	+
Βραχώδης έδαφος	+	+
Καμένο βλάστηση 1		+
Καμένη βλάστηση 2		+

Καμένη βλάστηση 1



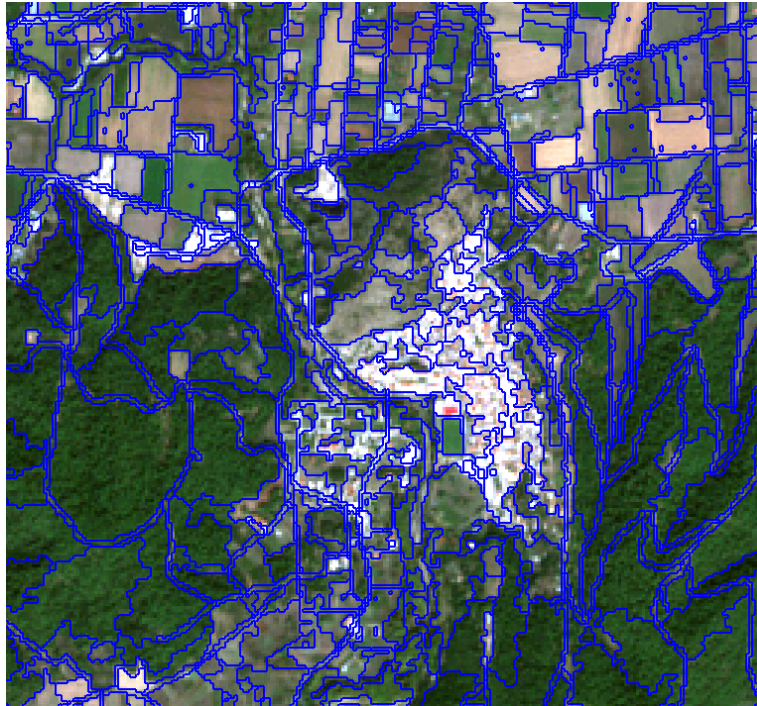
Καμένη βλάστηση 2



Σχήμα 4-2 Παράδειγμα κατηγοριών καμένης βλάστησης 1 και 2 σε φυσικό έγχρωμο σύνθετο

Για την κατάτμηση των εικόνων έγινε χρήση του αλγορίθμου πολλαπλής κατάτμησης (multi-resolution segmentation) ο οποίος είναι αλγόριθμος βάσει περιοχών (region based) (Franci et al, 2016). Λόγω της ανάλυσης των εικόνων και του σχετικά παρόμοιου μεγέθους των αντικειμένων στην περιοχή μελέτης που πρόκειται να ταξινομηθούν κρίθηκε ιδανικό να μην γίνει κατάτμηση πολλών επιπέδων αλλά να είναι όλα σε ένα επίπεδο. Πριν την κατάτμηση έγινε εισαγωγή στο project των εικόνων τα shapfile των καλλιεργειών και των δρόμων ώστε να εισαχθούν ως δεδομένα στην κατάτμηση και τα αντικείμενα που θα παραχθούν να τα αντιπροσωπεύουν πλήρως. Το ίδιο έγινε επίσης και για τον αστικό ιστό για την 2^η εικόνα στις 27/09/2021. Το αρχείο του αστικού ιστού παράχθηκε από την ταξινόμηση της 1^{ης} εικόνας και έγινε εισαγωγή του ως δεδομένο στην δεύτερη. Ο λόγος είναι ότι έπειτα γίνεται σύγκριση των ταξινομήσεων των 2 εικόνων και θεωρήθηκε ότι ο αστικός ιστός σε τέτοια ανάλυση δεν αναμένετε να αλλάξει καθόλου σε διάστημα 2 μήνων.

Ο αλγόριθμος πολλαπλής κατάτμησης λαμβάνει υπόψη του παραμέτρους που σχετίζονται με το χρώμα (φασματική υπογραφή), το σχήμα και την κλίμακα των αντικειμένων ενδιαφέροντος. Η κλίμακα σχετίζεται με την ετερογένεια των αντικειμένων. Οι μεγάλες κλίμακες αντιστοιχούν συνήθως σε μεγάλα αντικείμενα (Benz et al., 2004). Συνήθως απαιτούνται αρκετές δοκιμές των παραμέτρων από τον χρήστη για να υπάρξει επιθυμητό αποτέλεσμα. Μετά από πολλές δοκιμές οι τελικές παράμετροι που απέδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα είναι Scale 40, Shape 0.7 και Compactness 0.7 και για τις 2 εικόνες. Να σημειωθεί ότι για την κατάτμηση χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα κανάλια B2 (Blue), B3 (Green), B4 (Red) και B8 (NIR) επειδή κρίθηκαν επαρκή. Εφόσον η κατάτμηση είναι ενός μόνο επιπέδου έγινε σε επίπεδο εικονοστοιχείων.



Σχήμα 4-3 Κατάτμηση σε υποσύνολο της εικόνας 27/09/21

4.2.2 Ταξινόμηση των εικόνων

Μετά την κατάτμηση ακολούθησε η διαδικασία της ταξινόμησης στα παραγόμενα αντικείμενα της κατάτμησης. Ως αλγόριθμος ταξινόμησης χρησιμοποιήθηκε αυτός του εγγύτερου γείτονα ο οποίος απαιτεί για δείγματα ως δεδομένα εκπαίδευσης αντικείμενα για την κάθε κλάση που συμμετέχει στον αλγόριθμο. Η εφαρμογή του έγινε λαμβάνοντας τις φασματικές τιμές και των 10 καναλιών. Αφού ορίστηκαν οι κλάσεις χρήσης γης για την κάθε εικόνα επιλέχθηκαν τα δείγματα με φωτοερμηνεία. Κατά την φωτοερμηνεία λήφθηκε υπόψη το Corine Land Cover 2018 για τις κλάσεις βλάστησης. Επιλέχθηκαν δείγματα για όλες τις κλάσεις εκτός αυτών που εισάχθηκαν αρχικά ως θεματικά επίπεδα (Πιν.4-3). Ως προς τον αριθμό των δειγμάτων, γενικός στόχος ήταν να καλύπτουν περίπου το 1-2% της επιφάνειας της κατηγορίας τους. Στην περίπτωση του νερού ένας μονοψήφιος αριθμός δειγμάτων ήταν επαρκής για να ταξινομηθεί ορθά από τον αλγόριθμο, λόγω της ιδιαίτερης φασματικής του υπογραφής. Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε αρκετές φορές ώστε να γίνονται από τον χρήστη διορθώσεις στα δείγματα. Η δειγματοληψία δεν ήταν επαρκής για είναι επιτυχής η ταξινόμηση και εφαρμόστηκαν και κανόνες ασαφούς λογικής (Πιν.4-3). Αρχικά για τις κλάσεις της βλάστησης πλην των καλλιεργειών δεν εφαρμόστηκε κανόνας καθώς έχουν αρκετά κοντινές φασματικές υπογραφές. Ο αστικός ιστός έχει αρκετά μεγαλύτερη διασπορά στο μπλε κανάλι (B1) σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες. Για τις υπόλοιπες κλάσεις εφαρμόστηκε ο δείκτης NDVI (Normalized Index Vegetation Index) που ορίζεται ως εξής:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

(1)

Για τον δορυφόρο Sentinel-2 τα κανάλια που συμμετέχουν στον τύπο είναι τα B8 (NIR) και B4 (Red). Ο δείκτης NDVI με κατώφλι αποδείχθηκε αρκετός για να βοηθήσει τον αλγόριθμο να ξεχωρίσει τις κλάσεις με κοντινές φασματικές υπογραφές. Για τις καμένες εκτάσεις η κλάση καμένη βλάστηση 2 είχε αρκετά υψηλότερο NDVI έναντι της καμένης βλάστησης 1. Η κλάση καλλιέργειες παρόλο που εισάχθηκε εξαρχής ως θεματικό επίπεδο δεν παρείχε πληροφορία για το αν την στιγμή της λήψης της δορυφορική εικόνας η κάθε καλλιέργεια έχει βλάστηση ή αν είναι γυμνό έδαφος. Με την προσθήκη κατωφλίου στον δείκτη NDVI εξασφαλίστηκε σε ικανοποιητικό βαθμό αυτός ο διαχωρισμός.

4.2.3 Ακρίβεια ταξινομήσεων

Για την αξιολόγηση των 2 ταξινομήσεων παράχθηκαν οι πίνακες σύγχυσης τους παίρνοντας δείγματα ελέγχου για την κάθε κατηγορία. Τα δείγματα είναι αντικείμενα της κατάτμησης και στόχος ήταν κατά την επιλογή τους να είναι περίπου 20 για την κάθε κατηγορία. Τα δείγματα αυτά επιλέχθηκαν με φωτοερμηνεία λαμβάνοντας υπόψη το Corine Land Cover του 2018. Για τις κλάσεις οδοί και για τις 2 εικόνες και αστικό ιστό για την 2^η εικόνα δεν λήφθηκαν δείγματα καθώς είχαν εισαχθεί εξαρχής στην ταξινόμηση ως θεματικά επίπεδα. Οι καλλιέργειες παρόλο που είχαν εισαχθεί και αυτές ως θεματικό επίπεδο λήφθηκαν δείγματα ώστε να εξεταστεί κατά πόσο ο κανόνας ασαφούς λογικής NDVI με κατώφλι ήταν επιτυχής στο διαχωρισμό τους από τις γυμνές καλλιέργειες που ταξινομούνται ως γυμνό έδαφος.







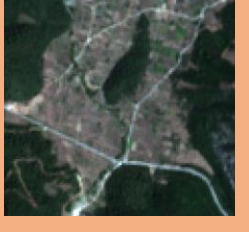





Στην τηλεπισκόπηση ο πίνακας σύγχυσης είναι ένας πίνακας στον οποίο ουσιαστικά ένας χάρτης ή μια ταξινόμηση συγκρίνεται με την πραγματικότητα ώστε να υπολογιστεί αριθμητικά κατά πόσο την προσεγγίζει. Η πραγματικότητα στον πίνακα εκπροσωπείται από τα δείγματα ελέγχου που παίρνει ο χρήστης. Η ακρίβεια μιας ταξινόμησης φαίνεται από τους εξής δείκτες στον πίνακα σύγχυσης:

- Ακρίβεια χρήση (User's Accuracy): Είναι το πηλίκο του αριθμού των δειγμάτων ελέγχου που και η ταξινόμηση και ο χρήστης τα θεώρησαν ίδια κλάση προς το σύνολο των δειγμάτων ελέγχου που στην ταξινόμηση ήταν σε αυτή την κλάση.
- Ακρίβεια παραγωγού (Producer's Accuracy): Είναι το πηλίκο του αριθμού των δειγμάτων ελέγχου που και η ταξινόμηση και ο χρήστης τα θεώρησαν ίδια κλάση προς το σύνολο των δειγμάτων ελέγχου που ο χρήστης ταξινόμησε σε αυτή την κλάση.
- Ολική ακρίβεια (Overall Accuracy): Είναι το πηλίκο του αθροίσματος των δειγμάτων ελέγχου που ταξινομήθηκαν στην ίδια κλάση με την ταξινόμηση προς το σύνολο των δειγμάτων ελέγχου. Το άθροισμα αυτό είναι ουσιαστικά η διαγώνιος του πίνακα.
- Συντελεστής Κάρπα (Kappa Coefficient): Ο συντελεστής K (Kappa coefficient) μετρά τη σχέση ανάμεσα στην πέρα από κάθε πιθανότητα συμφωνία και στην αναμενόμενη διαφωνία. Η μέτρηση αυτή χρησιμοποιεί όλα τα στοιχεία του πίνακα και όχι μόνο τα διαγώνια. Η εκτίμηση του K είναι το ποσοστό της συμφωνίας που απομένει όταν αφαιρεθεί από την εξέταση η πιθανότητα συμφωνίας.

Οι πίνακες σύγχυσης έδειξαν ολική ακρίβεια 83% και 81% που καθιστά την ακρίβεια των ταξινομήσεων επαρκή (Πιν. 4-4 και Πιν. 4-5). Τα χαμηλά σχετικά ποσοστά ακρίβειας εμφανίζονται κυρίως στις κατηγορίες βλάστησης που έχουν πολύ κοντινές φασματικές υπογραφές μεταξύ τους. Δεν επηρεάζει όμως τον δείκτη επικινδυνότητας πλημμύρας καθώς έπειτα θεωρήθηκε ότι έχουν ίδια συμβολή.

Πίνακας 4-3 Οι κανόνες ασαφούς λογικής που εφαρμόστηκαν για την κάθε κατηγορία

<i>Δορυφορική εικόνα 27/07/21</i>		<i>Δορυφορική εικόνα 27/09/21</i>	
	<p>Αστικός ιστός</p> <p>NDVI <= 0.36 Std.Dev B1 >= 0.85</p>		<p>Αστικός ιστός</p> <p>Έγινε εισαγωγή ως θεματικό επίπεδο</p>
	<p>Οδοί</p> <p>Έγινε εισαγωγή ως θεματικό επίπεδο</p>		<p>Οδοί</p> <p>Έγινε εισαγωγή ως θεματικό επίπεδο</p>
	<p>Νερό</p>		<p>Νερό</p>
	<p>Καλλιέργειες</p> <p>Έγινε εισαγωγή ως θεματικό επίπεδο</p> <p>NDVI >= 0.21</p>		<p>Καλλιέργειες</p> <p>Έγινε εισαγωγή ως θεματικό επίπεδο</p> <p>NDVI >= 0.24</p>
	<p>Κωνοφόρα βλάστηση</p>		<p>Κωνοφόρα βλάστηση</p>
	<p>Πλατύφυλλη βλάστηση</p>		<p>Πλατύφυλλη βλάστηση</p>

	Μικτό δάσος		Μικτό δάσος
	Σκληροφυλλική βλάστηση		Σκληροφυλλική βλάστηση
	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις		Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις
	Γυμνό έδαφος		Γυμνό έδαφος NDVI <= 0.37
	Βραχώδης έδαφος NDVI <= 0.24		Βραχώδης έδαφος NDVI <= 0.29
			Καμένη βλάστηση 2 NDVI <= 0.14
			Καμένη βλάστηση 1 NDVI <= 0.35

Πίνακας 4-4 Ο πίνακας σύγκρισης για την ταξινόμηση στις 27/07/21

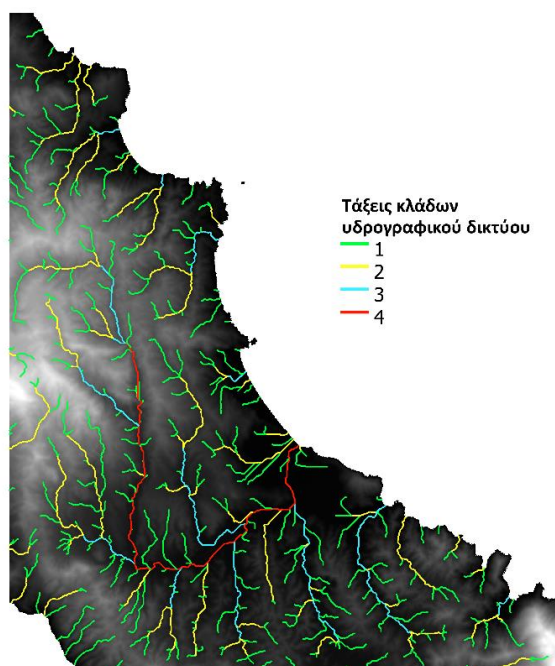
Κλάση	Αστικός	βραχώδης	Πλατύφυλλη	Κωνοφόρα	Σκληρόφυλλη	Μικτό	Μεταβατικές	Καλλιέργειες	Γυμνό	Σύνολο
Αστικός ιστός	20	0	0	0	0	0	0	0	0	20
βραχώδης έδαφος	0	16	0	0	0	0	0	0	0	16
Πλατύφυλλη βλάστηση	0	0	17	0	0	3	0	2	0	22
Κωνοφόρα βλάστηση	0	0	0	18	0	2	0	0	0	20
Σκληρόφυλλη βλάστηση	0	0	0	0	14	1	0	0	0	15
Μικτό δάσος	0	0	2	2	1	14	0	0	0	19
Μεταβατικές δ.-θ. εκτάσεις	0	0	1	2	3	0	20	0	0	26
Καλλιέργειες	0	0	0	0	2	0	0	16	4	22
Γυμνό έδαφος	0	3	0	0	0	0	0	2	16	21
Σύνολο	20	19	20	22	20	20	20	20	20	
Ακρίβεια παραγωγού (%)	1	0.842	0.85	0.818	0.7	0.7	1	0.8	0.8	
Ακρίβεια χρήστη (%)	1	1	0.772	0.9	0.933	0.736	0.769	0.727	0.761	
Κ ανά κλάση	1	0.826	0.829	0.795	0.672	0.664	1	0.772	0.773	
Ολική ακρίβεια %	0.834									
Συντελεστής Κάππα	0.813									

Πίνακας 4-5 Ο πίνακας σύγκρισης για την ταξινόμηση στις 27/09/21

Κλάση / δείγμα	Κωνοφόρα	Βραχώδης	Σκληρόφυλλη	Μικτό	Καμένη βλ.	Καμένη βλ.	Μεταβατικές	Καλλιέργειες	Γυμνό	Πλατύφυλλη	Σύνολο
Κωνοφόρα βλάστηση	13	0	1	10	0	0	0	0	0	1	25
Βραχώδης έδαφος	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	16
Σκληρόφυλλη βλάστηση	0	0	17	0	0	0	1	0	0	1	19
Μικτό δάσος	6	0	0	9	0	0	0	0	0	0	15
Καμένη βλάστηση 2	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	19
Καμένη βλάστηση 1	0	0	0	0	1	20	0	0	0	0	21
Μεταβατικές δ.- θ. εκτάσεις	1	0	0	0	0	0	18	1	0	1	21
Καλλιέργειες	0	0	1	0	0	0	0	17	0	0	18
Γυμνό έδαφος	0	3	0	0	0	0	1	0	20	0	24
Πλατύφυλλη βλάστηση	0	0	3	1	0	0	0	2	0	15	21
unclassified	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2
Σύνολο	20	20	22	20	20	20	20	20	20	19	
Ακρίβεια παραγωγού (%)	0.65	0.8	0.772	0.45	0.95	1	0.9	0.85	1	0.789	
Ακρίβεια χρήστη (%)	0.52	1	0.894	0.6	1	0.952	0.857	0.944	0.833	0.714	
Κ ανά κλάση	0.600	0.782	0.749	0.405	0.944	1	0.888	0.835	1	0.764	
Ολική ακρίβεια (%)	0.815										
Συντελεστής Κ	0.795										

4.3 Υδρογραφικό δίκτυο και μορφομετρικές παράμετροι

Το υδρογραφικό δίκτυο εξάχθηκε αυτόματα από το ΨΜΕ χρησιμοποιώντας εργαλεία γεωεπεξεργασίας στο περιβάλλον του QGIS. Από αυτή την γεωεπεξεργασία παράχθηκε το υδρογραφικό δίκτυο με ταξινόμηση κατά Strahler, κατά το οποίο οι μικρότεροι μη διακλαδιζόμενοι κλάδοι ρεμάτων ορίζονται ως πρώτης τάξης, όταν δύο κλάδοι πρώτης τάξης συναντώνται σχηματίζεται ένας κλάδος δεύτερης τάξης και συνεχίζεται η ίδια ταξινόμηση για μεγαλύτερες τάξεις (Strahler, 1964).



Σχήμα 4-4 Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης

Ακολούθησε ο υπολογισμός 2 βασικών μορφομετρικών παραμέτρων στο QGIS: Η υδρογραφική πυκνότητα (D_d) και η υδρογραφική συχνότητα (F_s). Κατά την διαδικασία υπολογισμού τους στην περιοχή μελέτης εφαρμόστηκε κάναβος 1 km^2 που είναι και η μονάδα επιφάνειας των παραμέτρων. Ο υπολογισμός έγινε σύμφωνα με τις μελέτες των Horton (1945) και Strahler (1964). Η υδρογραφική πυκνότητα είναι ο λόγος του συνολικού μήκους όλων των κλάδων του δικτύου ανά μονάδα επιφάνειας και δείχνει την εγγύτητα των ρεμάτων μεταξύ τους και ποικίλλει ανάλογα το κλίμα και την βλάστηση, τις ιδιότητες των πετρωμάτων και του εδάφους, και το ανάγλυφο (Shankar & Dharanirajan, 2014). Τιμές κοντά στο $1 \text{ km}/\text{km}^2$ μπορεί να υποδεικνύουν διαπερατά πετρώματα, ενώ όταν ξεπερνούν τα $5 \text{ km}/\text{km}^2$ πρόκειται για πολύ υψηλής διαπερατότητας εδάφη (Withanage et al. 2014). Χαμηλές τιμές D_d γενικά υποδεικνύουν περιοχές με μεγάλης αντίστασης ή διαπερατότας υποεδαφικό υλικό και με πυκνή βλάστηση (Rudraiah et al. 2008). Υψηλό D_d είναι το αποτέλεσμα μη διαπερατού υλικού στο υπέδαφος και αραιής βλάστησης (Rudraiah et al. 2008). Υδρογραφική συχνότητα είναι ο συνολικός αριθμός όλων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου ανά μονάδα επιφάνειας. Υψηλή υδρογραφική συχνότητα δείχνει μεγαλύτερη επιφάνεια απορροής και πιο κρημνώδης επιφάνεια εδάφους. Η ύπαρξη κλάδων εξαρτάται από την φύση των πετρωμάτων, την βλάστηση, την διαπερατότητα του εδάφους και την βροχόπτωση (Reddy et al. 2004; Magesh et al. 2013). Ο Πίνακας 4-6 δείχνει τις τιμές των 2 μορφομετρικών παραμέτρων για το σύνολο της περιοχής μελέτης.

Έπειτα ακολούθησε η παραγωγή του χάρτη της υψής το υδρογραφικού δικτύου. Σύμφωνα με τον τύπο του Smith (1950) η υδρογραφική υφή είναι το γινόμενο της υδρογραφικής πυκνότητας με την υδρογραφική συχνότητα. Η υδρογραφική υφή εξαρτάται από πολλούς περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως το κλίμα, την βροχόπτωση, την βλάστηση, τα είδη πετρωμάτων και εδάφους, την ικανότητα διήθησης στο έδαφος. Τα πετρώματα που δεν προστατεύονται από βλάστηση παράγουν λεπτή υφή, ενώ τα πετρώματα με μεγάλη αντίσταση παράγουν τραχύς υφή (Sreedevi et al. 2004).

Όπως προαναφέρθηκε ο υπολογισμός της υψής το υδρογραφικού δικτύου έγινε σε κάρναβο τους ενός χιλιομέτρου. Για την παραγωγή του τελικού χάρτη στο QGIS έγινε παρεμβολή των τιμών με τον αλγόριθμο inverse distance weight (IDW). Ο τελικός χάρτης είναι ανάλυσης 30μ.

Πίνακας 4-6 Μορφομετρικές παράμετροι για το σύνολο της περιοχής μελέτης

Παράμετρος	Τύπος	Τιμή	Αναφορά	Περιγραφή
Εμβαδόν (km ²)	A	441.84		
Σύνολο ρεμάτων	N_u	553.00	Strahler (1964)	
Συνολικό μήκος ρεμάτων (km)	L_u	487.91	Horton (1945)	
Υδρογραφική Πυκνότητα (km/km ²)	$D_d = L_u/A$	1.10	Horton (1945)	Η εγγύτητα των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου στο χώρο ~1 km/km ² Αρκετά διαπερατά πετρώματα > 5 km/km ² Αδιαπέραστα πετρώματα
Υδρογραφική συχνότητα (km ⁻²)	$F_s = N_u/A$	1.25	Horton (1945)	Κλάδοι ανά μονάδα επιφάνειας <1 km ⁻² Αρκετά διαπερατά πετρώματα και χαμηλό ανάγλυφο >5 km ⁻² Αδιαπέραστο εδαφικό υλικό και και κρημνώδης επιφάνεια εδάφους

4.4 Πολυκριτηριακή ανάλυση

Εφαρμόστηκε πολυκριτηριακή ανάλυση για τον υπολογισμό του δείκτη επικινδυνότητας πλημμύρας (ΔΕΠ) (flood hazard index) λαμβάνοντας υπόψη τα 5 κριτήρια: Κάλυψη γης, απόσταση από τα κύρια κανάλια, υφή το υδρογραφικού δικτύου, γεωλογία και κλίση του εδάφους. Συγκεκριμένα, η προσέγγιση έγινε με μέθοδο αναλυτικής ιεραρχίας (analytical hierarchy process) όπου υπολογίστηκαν τα βάρη του κάθε κριτηρίου για τον δείκτη επικινδυνότητας πλημμύρας. Επιπλέον ο χάρτης του κάθε κριτηρίου μετασηματίστηκε κατατάσσοντας τις τιμές του σε βαθμούς από το 1-9 ώστε να γίνουν ομογενή. Αυτό έγινε με το εργαλείο raster calculator στο QGIS. Ο τύπος υπολογισμού του ΔΕΠ είναι:

$$\Delta E \Pi = \sum w_i * x_i \quad (2)$$

Όπου w_i = βάρος κριτηρίου i και x_i = τιμή κατάταξης της κλάσης του κριτηρίου i

4.4.1 Κατάταξη τιμών κριτηρίων

Εφόσον το κάθε κριτήριο μετριέται σε διαφορετικές κλίμακες, οι χάρτες των κριτηρίων επανακατηγοριοποιήθηκαν ώστε να συσχετίζονται με την επικινδυνότητα πλημμύρας. Σε γενικές γραμμές η επανακατηγοριοποίηση γίνεται από ειδικούς λαμβάνοντας υπόψη την

εμπειρία τους και την περιοχή μελέτης. Για το κάθε κριτήριο ταξινομήθηκαν τα χαρακτηριστικά του σε κλάσεις με βάση την συνεισφορά τους στον κίνδυνο πλημμύρας. Στόχος ήταν η ποσοτικοποίηση αυτής της συνεισφοράς. Στον πίνακα απεικονίζονται οι τιμές που ορίστηκαν για την κάθε κλάση και βασίζονται στον αντίστοιχο πίνακα στην μελέτη των Franci et al (2016).

Η κλίση του εδάφους είναι ένα σημαντικό κριτήριο που βοηθά στον εντοπισμό περιοχών που είναι επιρρεπής σε πλημμύρες λόγω των χαμηλών τους κλίσεων. Από την κλίση του εδάφους καθορίζεται η κατεύθυνση, η ταχύτητα και η ποσότητα του νερού που φτάνει σε κάθε σημείο. Οι περιοχές με μικρή κλίση του εδάφους τείνουν να συσσωρεύουν μεγάλες ποσότητες νερού σε αντίθεση με αυτές κρημνώδεις περιοχές που το νερό έχει διεξόδους και έτσι είναι πιο επιρρεπής σε υφαλμύρωση και πλημμύρες. Ο χάρτης κλίσεων του εδάφους εκπονήθηκε στο SAGA GIS με τις τιμές του να είναι σε %. Χρησιμοποιήθηκε το GDEM που αναφέρθηκε προηγουμένως με εδαφοψηφίδα 30μ.. Οι τιμές του χωρίστηκαν σε 4 κλάσεις (Πιν. 4-5).

Στις πλημμύρες συνηθίζεται οι πιο πληγείσες περιοχές να είναι αυτές κοντά στα ποτάμια. Κατ' επέκταση έγινε εξαγωγή των κύριων κλάδων της περιοχής μελέτης από το υδρογραφικό δίκτυο. Οι κύριοι κλάδοι που εξάχθηκαν είναι 3^{ης} και 4^{ης} τάξης κατά Strahler. Στο QGIS υπολογίστηκε η ευκλείδεια απόσταση του κάθε σημείου από αυτούς τους κλάδους και δημιουργήθηκαν 4 ζώνες που σχετίζονται με την εγγύτητα από τα κανάλια οι οποίες επανακατηγοριοποιήθηκαν (Πιν. 4-5).

Η υφή του υδρογραφικού δικτύου (drainage texture) ή αλλιώς βαθμός κατείσδυσης (Infiltration number) είναι ένα κριτήριο που δείχνει την ικανότητα διείσδυσης του νερού στο έδαφος σε μια λεκάνη απορροής. Ως αριθμός είναι αντιστρόφως ανάλογος της ικανότητας διείσδυσης. Υψηλές τιμές δείχνουν χαμηλή ικανότητα διείσδυσης και κατ' επέκταση υψηλότερες πιθανότητες πλημμύρας. Με βάση την κατηγοριοποίηση του Smith (1950) ο χάρτης υφή υδρογραφικού δικτύου χωρίστηκε σε 4 κλάσεις και έπειτα επανακατηγοριοποιήθηκε σε βαθμούς (Πιν. 4-5).

Για τον γεωλογικό χάρτη, η επανακατηγοριοποίηση τους έγινε με κριτήριο την υδραυλική αγωγιμότητα του κάθε γεωλογικού πετρώματος. Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι μια υδρογεωλογική παράμετρος που περιγράφει πόσο εύκολα μπορεί να μετακινηθεί ένα υγρό μέσα από τους πόρους ή της ρωγμές ενός γεωλογικού σχηματισμού (Πιν. 4-5).

Η απορροή των όμβριων υδάτων είναι πιο έντονη σε γυμνό έδαφος από ότι έδαφος που καλύπτεται από πυκνή βλάστηση ή καλλιέργειες. Σε βραχώδης έδαφος είναι ακόμα εντονότερη. Η ύπαρξη βλάστησης καθιστά πολύ πιο εύκολη την απορρόφηση του νερού από το έδαφος. Αφετέρου, το τσιμέντο και γενικά οι επιφάνειες που υπάρχουν στον αστικό ιστό δεν απορροφούν σχεδόν καθόλου νερό. Επιπλέον οι καμένες εκτάσεις αποτελούν ουσιαστικά γυμνό έδαφος που έχει χαθεί η βλάστηση που το κάλυπτε. Με βάση τα παραπάνω επανακατηγοριοποιήθηκαν οι 2 χάρτες κάλυψης γης σε αντίστοιχους βαθμούς επικινδυνότητας πλημμύρας (Πιν. 4-5). Στην τάξη της βλάστησης έχουν ενσωματωθεί οι 6 κλάσεις βλάστησης των ταξινομήσεων. Στην τάξη γυμνό έδαφος έχει ενσωματωθεί η κλάση γυμνό έδαφος και οι 2 κλάσεις καμένων εκτάσεων.

Πίνακας 4-7 Τιμές κατάταξης για την κάθε κλάση του κάθε κριτηρίου

Κριτήριο	Κλάση	Κατάταξη
Κλίση εδάφους (%)	<2	9
	2-5	6
	5-8	4
	>8	2
Απόσταση από τους κύριους κλάδους (m)	<50	9
	50-100	7
	100-200	6
	200-500	5
	500-1000	4
	>1000	2
Υφή του υδρογραφικού δικτύου	<4	2
	4-10	4
	10-15	7
	>15	9
Γεωλογία	Σχίστες	9
	Μάργες	8
	Μαγματικά πετρώματα	7
	Αλλουβιακά	4
	Ασβεστόλιθοι	3
Κάλυψη γης	Αστικός ιστός	9
	Βραχώδης έδαφος	7
	Γυμνό έδαφος	6
	Βλάστηση	4

4.4.2 Εκτίμηση βαρών κριτηρίων: Μέθοδος αναλυτική ιεράρχησης

Μετά την κατάταξη τιμών κριτηρίων ακολούθησε η εφαρμογή της μεθόδου αναλυτικής ιεράρχησης για την εκτίμηση βαρών των 5 κριτηρίων και ώστε να βρεθεί η σημαντικότητα του καθενός στον δείκτη επικινδυνότητας πλημμύρας.

Για τον υπολογισμό των βαρών δημιουργήθηκε πίνακας 2 διαστάσεων για σύγκριση ανάμεσα σε όλα τα πιθανά ζευγάρια των κριτηρίων. Η σημαντικότητα μεταξύ 2 κριτηρίων για την επίτευξη του τελικού στόχου ποσοτικοποιήθηκε σε κλίμακα 1 έως 9 (Saaty, 1980). Η επιλογή των τιμών σε αυτή την διπλωματική εργασία έγινε λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές που επέλεξαν στην μελέτη τους οι Franci et al (2016).

Το βάρος του κάθε κριτηρίου προέρχεται από το κύριο ιδιοδιάνυσμα του τετραγωνικού πίνακα συγκρίσεων μεταξύ των κριτηρίων. Πιο απλά, υπολογίζεται αθροίζοντας τις τιμές της κάθε στήλης του πίνακα, έπειτα διαιρώντας το κάθε στοιχείο του πίνακα με το άθροισμα της

αντίστοιχης στήλης του πίνακα (κανονικοποιημένος πίνακας σύγκρισης) και εν τέλει υπολογίζοντας το μέσο όρο των στοιχείων για την κάθε γραμμή στον κανονικοποιημένο πίνακα (Drobne and Lisec 2009).

Για την εκτίμηση της συνοχής κατά τον υπολογισμό των παραπάνω υπολογίστηκε ο λόγος συνοχής (consistency ratio). Αυτός ο λόγος δείχνει την πιθανότητα οι τιμές σύγκρισης των κριτηρίων να είναι τυχαίες, και σύμφωνα με τον Saaty (1980) τιμές του λόγου μεγαλύτερες του 0.10 δείχνουν ότι πρέπει να επανεκτιμηθούν. Ο τύπος είναι :

$$CR = CI/RI \quad (3)$$

Ο δείκτης τυχειότητας (random index) είναι ο δείκτης συνοχής ενός τυχαίου πίνακα συγκρίσεων ανά ζευγάρι, και εξαρτάται από τον αριθμό των αντικειμένων για σύγκριση. Για 5 αντικείμενα ο δείκτης ισούται με 1.12 (Ouma and Tateishi 2014). Ο δείκτης συνοχής (consistency index) δείχνει την απόκλιση από την απόλυτη συνοχή:

$$CI = (\lambda - n)/(n - 1) \quad (4)$$

Οπού λ είναι η μέση τιμή του διανύσματος συνοχής και n είναι ο αριθμός των κριτηρίων. Υπολογίζεται το διάνυσμα αθροισμένων βαρών πολλαπλασιάζοντας το βάρος του πρώτου κριτηρίου με την πρώτη στήλη του αρχικού πίνακα συγκρίσεων, έπειτα πολλαπλασιάζεται το δεύτερο βάρος με την δεύτερη στήλη του αρχικού πίνακα συγκρίσεων, και συνεχίζει μέχρι το 5^ο βάρος. Έπειτα αθροίζονται αυτές οι τιμές ανά γραμμή. Τέλος υπολογίζεται το διάνυσμα συνοχής διαιρώντας τα 5 αθροίσματα των 5 γραμμών με τα βάρη των κριτηρίων που εκτιμήθηκαν αρχικά.

Πίνακας 4-8 Εφαρμογή της μεθόδου αναλυτικής ιεράρχησης: δείκτες συνοχής και βάρος. Πηγή: Franci et al (2016)

	Κλίση εδάφους	Απόσταση από τους κύριους κλάδους	Υφή υδρογραφικού δικτύου	Γεωλογία	Κάλυψη γης	Βάρος
Κλίση εδάφους	1	1/3	5	7	3	0.260
Απ. από τους κύριους κλάδους	3	1	7	9	5	0.503
Υφή υδρ.δικτύου	1/5	1/7	1	3	1/3	0.068
Γεωλογία	1/7	1/9	1/3	1	1/5	0.035
Κάλυψη γης	1/3	1/5	3	5	1	0.134
M.A.I δείκτες	$\lambda=5.248$	CI= 0.062	CR =0.055			

4.5 Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας

Οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας χωρίστηκαν σε ποιοτικές κατηγορίες ώστε να είναι εύκολη η ερμηνεία τους. Ως μέθοδος κατηγοριοποίησης επιλέχθηκε αυτή των φυσικών διακοπών (natural breaks) για τον καθορισμό των διαστημάτων βασιζόμενη στην διασπορά των τιμών επικινδυνότητας πλημμύρας. Αυτή η τεχνική επιχειρεί να μειώσει τη διακύμανση εντός των κλάσεων και να μεγιστοποιήσει τη διακύμανση μεταξύ των κλάσεων (Stefanidis and Stathis 2013).

5. Αποτελέσματα

5.1 Χάρτες κάλυψης γης

Οι χάρτες κάλυψης γης για τις 2 ημερομηνίες που προέκυψαν από την ταξινόμηση με αντικειμενοστρεφή ανάλυση εικόνων φαίνονται στο σχήμα 5.1. Τα ποσοστά κάλυψης γης της κάθε κλάσης για την κάθε ταξινόμηση απεικονίζονται στον πίνακα 5-1. Για τις 27/07/21 ο αστικός ιστός καλύπτει το 1.1% της περιοχής μελέτης, το βραχώδες έδαφος καλύπτει 3%, η βλάστηση καλύπτει συνολικά 81.4% και οι δρόμοι μαζί με το γυμνό έδαφος 15.2%. Για τις 27/09/21 η κάλυψη βραχώδους εδάφους αυξήθηκε σε 3% και η βλάστηση μειώθηκε σημαντικά στο 37,6%. Οι συνολικές καμένες εκτάσεις καλύπτουν το 38,8% και το γυμνό έδαφος αυξήθηκε σε 13%. Τα προηγούμενα μαζί με τις οδούς καλύπτουν ποσοστό 58,2%. Από την στήλη των διαφορών φαίνεται ότι ένα ποσοστό 43,8% της βλάστησης αντικαταστάθηκε μετά την πυρκαγιά από βραχώδες και γυμνό έδαφος. Οι ακρίβειες των ταξινομήσεων είναι στους πίνακες 4-4 και 4-5.

Πίνακας 5-1 Ποσοστά κάλυψης γης στις 27/09/21

Κλάση κάλυψης γης	27/07/21		27/09/21		Διαφορά ανά τάξη ε.π.
	Ποσοστό έναντι συνολικής έκτασης	Ανά τάξη επικινδυνότητα πλημμύρας	Ποσοστό έναντι συνολικής έκτασης	Ανά τάξη επικινδυνότητα πλημμύρας	
Αστικός ιστός	1.1%	1.1%	1,1%	1,1%	0%
Νερό	0.1%	0.1%	0,1%	0,1%	0%
Βραχώδες έδαφος	2.3%	2.3%	3%	3%	+0.7%
Πλατύφυλλη βλάστηση	4.9%	81.4%	2,1%	37,6%	-43,8%
Κωνοφόρα βλάστηση	25.2%		10.8%		
Σκληρόφυλλη βλάστηση	6.1%		3.9%		
Μικτό δάσος	14.4%		3,7%		
Μετ. θαμνώδης -	18.9%		9,7%		

δασώδεις εκτάσεις καλλιέργειες	11.9%		7,4%		
Οδοί	6.2%	15.2%	6,2%	58,2%	+43%
Γυμνό έδαφος	9.0%		13%		
Καμένη βλάστηση 2	-		18,8%		
Καμένη βλάστηση 1	-		20%		

5.2 Υδρογραφικό δίκτυο και μορφομετρικές παράμετροι

Σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Strahler το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης είναι 4^η τάξης (Σχ.4-4). Οι μορφομετρικές παράμετροι για το σύνολο της περιοχής μελέτης είναι στον πίνακα 4-6. Η υδρογραφική πυκνότητα της περιοχής ισούται με 1.10 .Σύμφωνα με τον Strahler αυτή η τιμή δείχνει χαμηλή υδρογραφική πυκνότητα (<5) και αυτό υποδεικνύει διαπερατούς βραχώδεις σχηματισμούς, χαμηλό ανάγλυφο και πυκνή βλάστηση. Η χαμηλή υδρογραφική συχνότητα το επιβεβαιώνει.

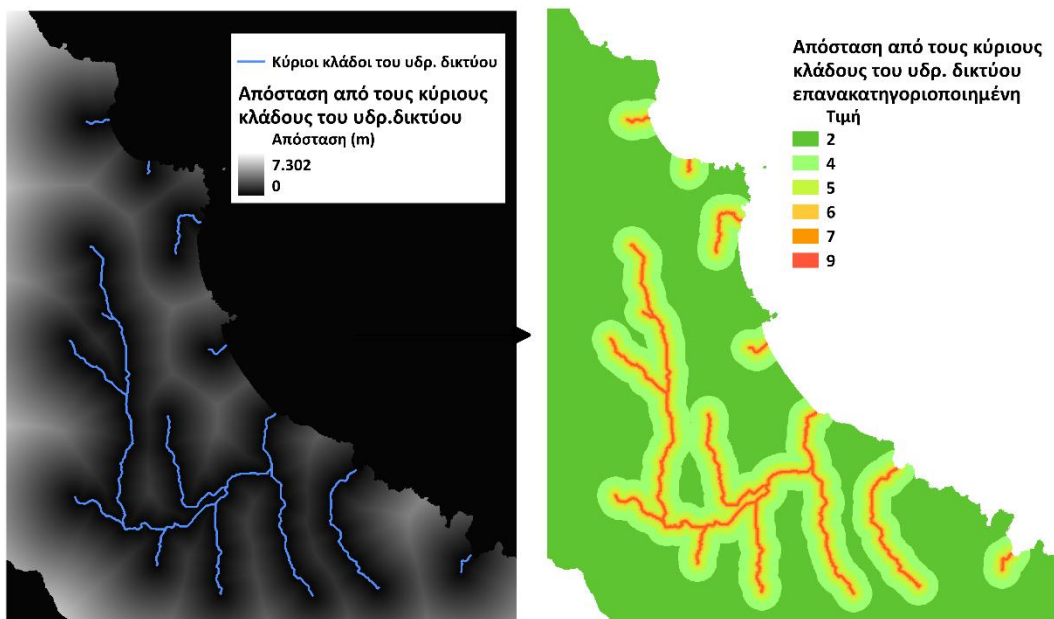
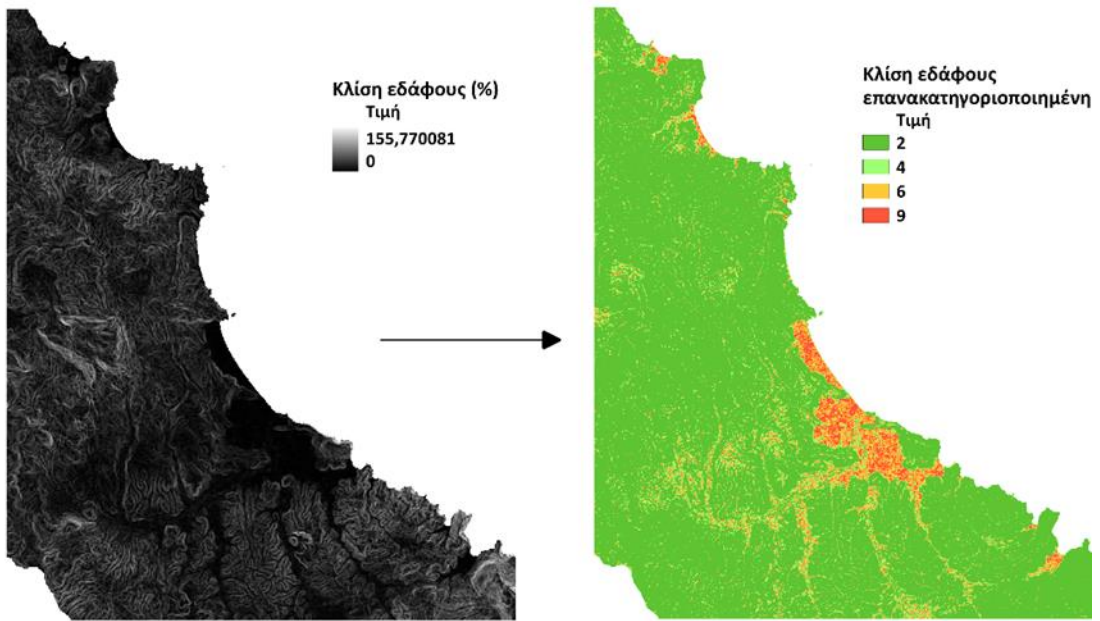
5.3 Πολυκριτηριακή ανάλυση

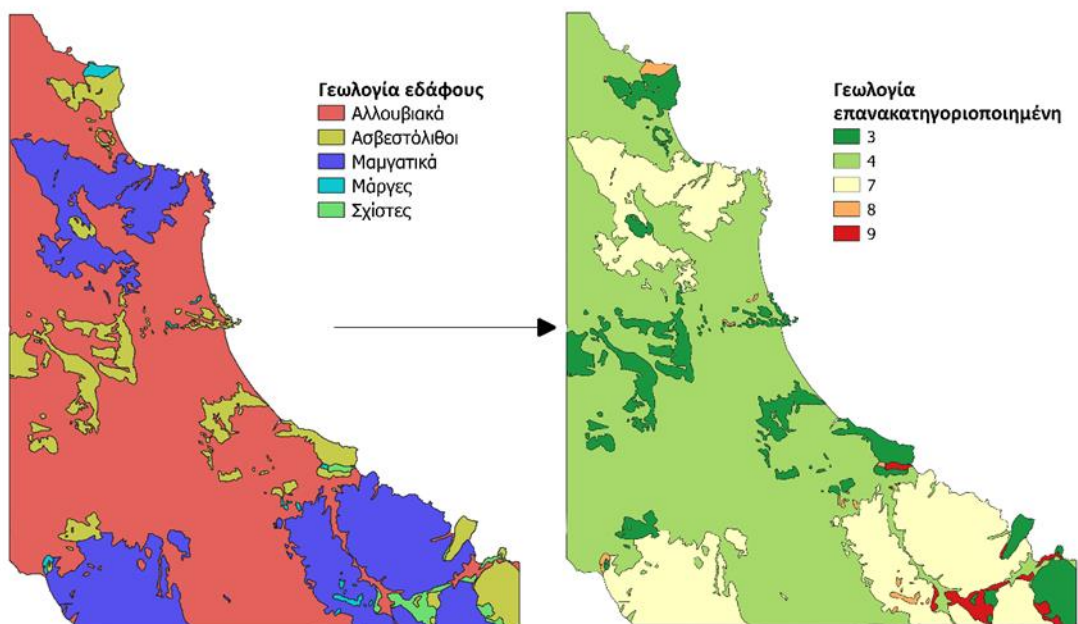
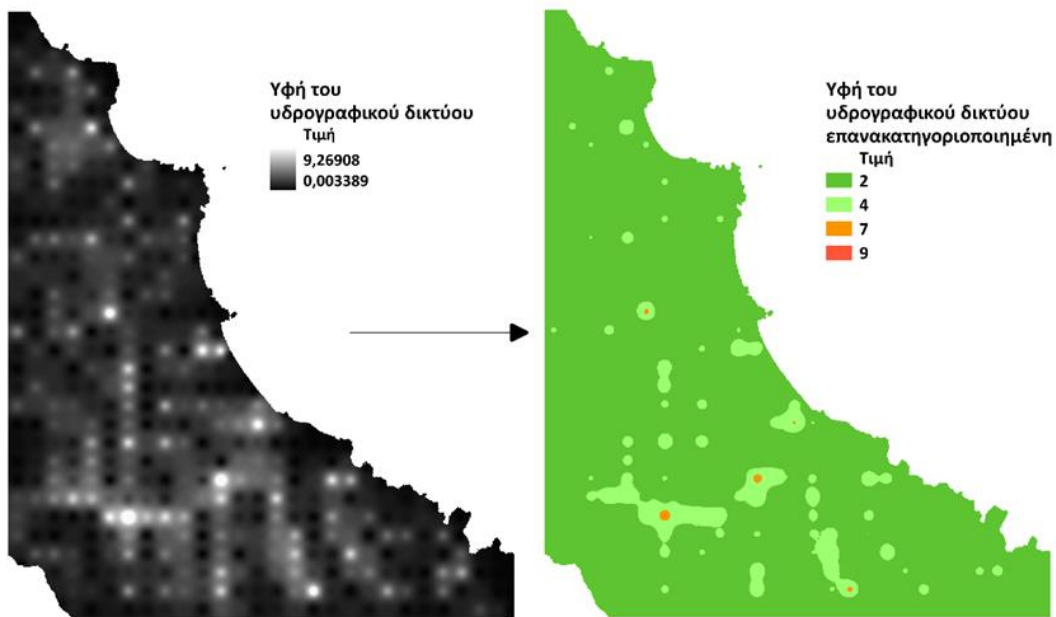
Οι θεματικοί χάρτες των 5 κριτηρίων επικινδυνότητας πλημμύρας, εκπονήθηκαν στο QGIS και ανατέθηκαν τιμές κατάταξης στην κάθε κλάση του κάθε κριτηρίου (Σχ. 5-1). Η επιρροή του κάθε κριτηρίου υπολογίστηκε στον πίνακα σύγκρισης κριτηρίων (Πιν. 4-8). Στην τελευταία στήλη είναι τα τελικά βάρη . Ο λόγος συνοχής (CR) του πίνακα ισούται με 0.055 που είναι αρκετά μικρότερο του 0.1 και επομένως επιβεβαιώνει την συνοχή του πίνακα και την αξιοπιστία των βαρών. Ο Δείκτης Επικινδυνότητας Πλημμύρας (ΔΕΠ) υπολογίστηκε στο QGIS σε μορφή χάρτη raster με την γραμμική εξίσωση 2 (Εξ.2):

$$\begin{aligned} \Delta \text{ΕΠ} = & 0.260 * \text{κλίση εδάφους} + 0.503 * \text{απόσταση από τα κύρια κανάλια} + 0.068 \\ & * \text{υφή του υδρογραφικού δικτύου} + 0.035 * \text{γεωλογία} + 0.134 \\ & * \text{κάλυψη γης} \end{aligned}$$

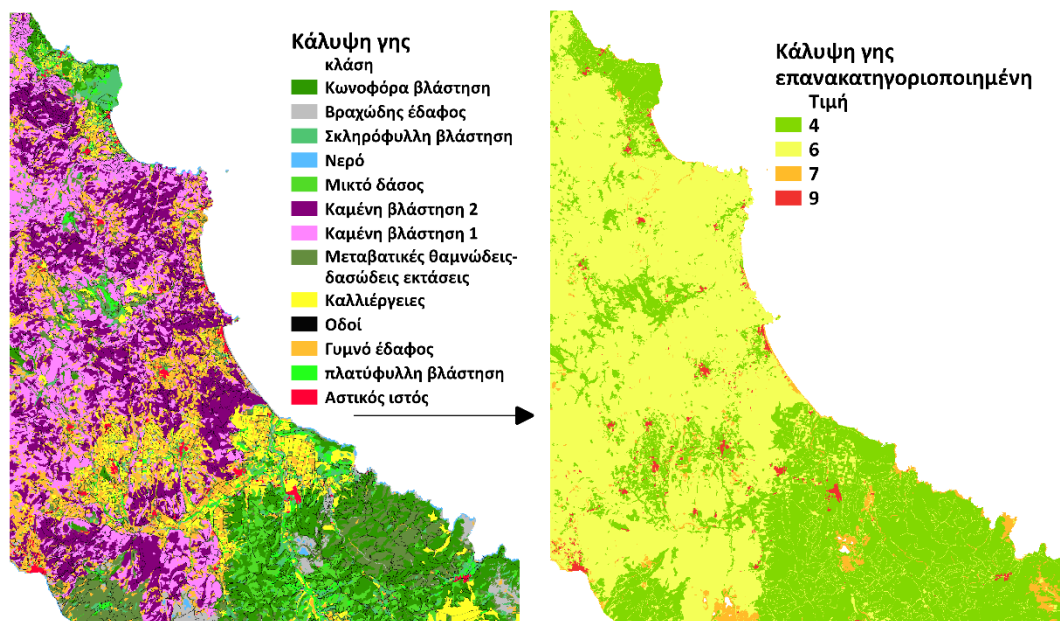
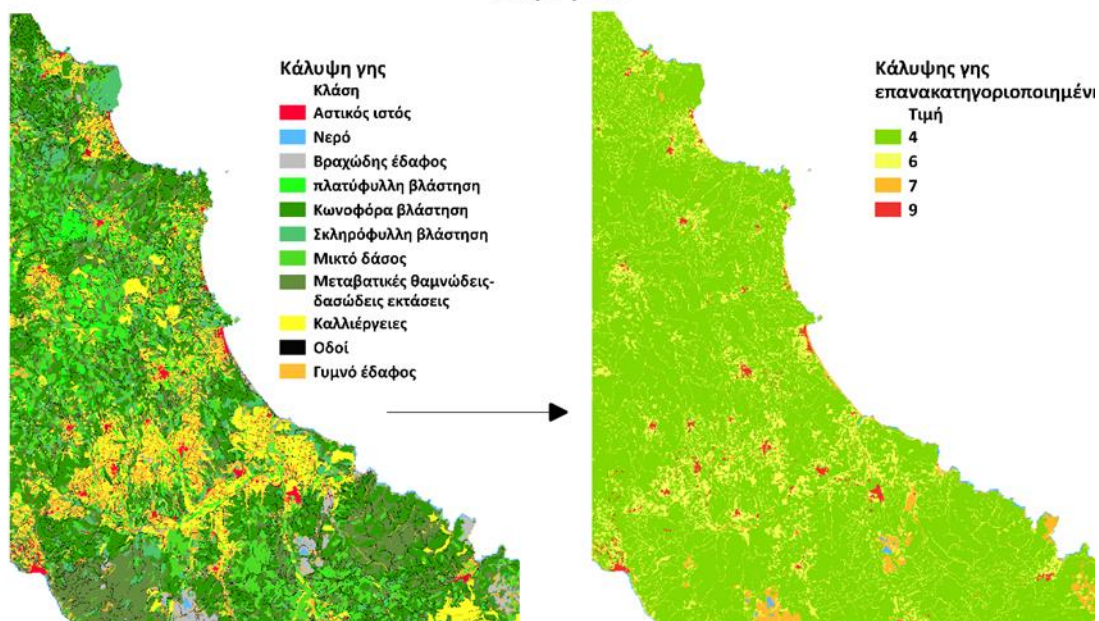
(5)

Οι τιμές ΔΕΠ και για τους 2 χάρτες είναι μεταξύ 1.767 έως 8.349. Τα εικονοστοιχεία με τις μεγαλύτερες τιμές είναι τα πιο επιρρεπή σε πλημμύρες και κατ' επέκταση αυτά με τις μικρότερες τιμές είναι τα λιγότερο επιρρεπή.





27/7/21



Σχήμα 5-1 Τα 5 κριτήρια και η επανακατηγοριοποίηση τους με βάση την συνεισφορά τους στην επικινδυνότητα πλημμύρας

5.4 Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας

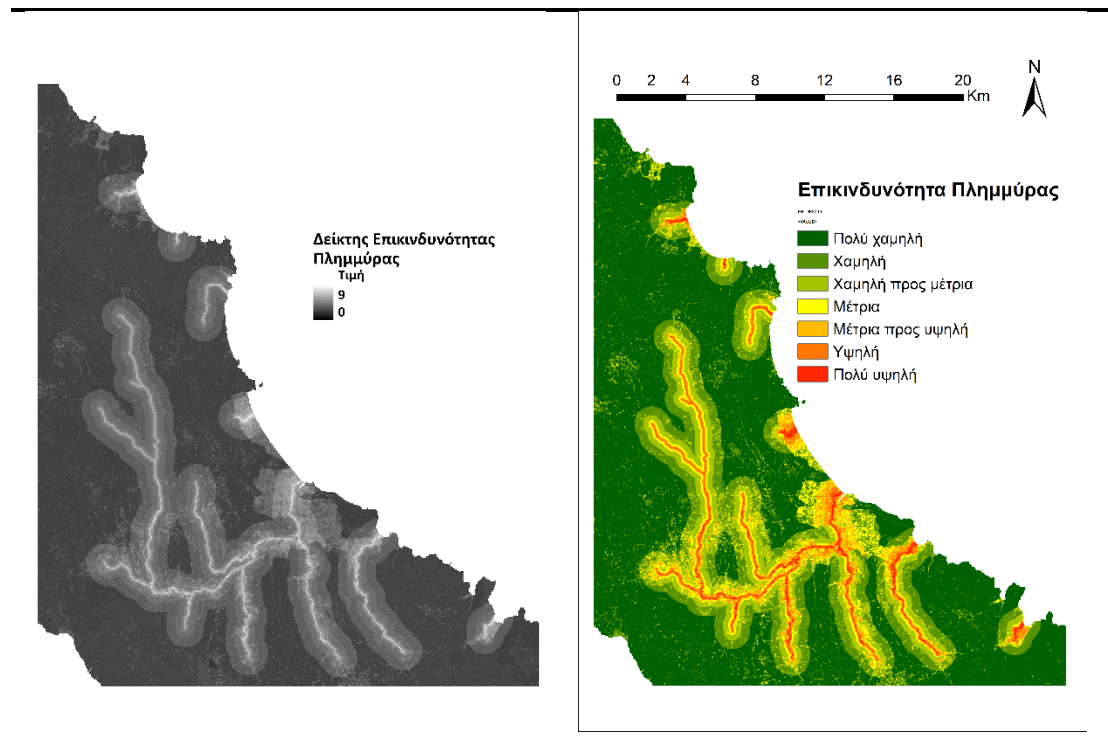
5.4.1 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας εκπονήθηκαν χωρίζοντας τους σε ποιοτικές κατηγορίες. Συγκεκριμένα, χωρίστηκαν σε 7 κατηγορίες από πολύ χαμηλή επικινδυνότητα έως πολύ υψηλή και τα διαστήματα καθορίστηκαν από την μέθοδο φυσικών διακοπών (natural breaks) (βλέπε ενότητα 4.5). Στον πίνακα 5-2 απεικονίζονται τα διαστήματα και στα σχήματα 5.2 και 5.3 παρουσιάζονται οι τελικοί χάρτες επικινδυνότητας.

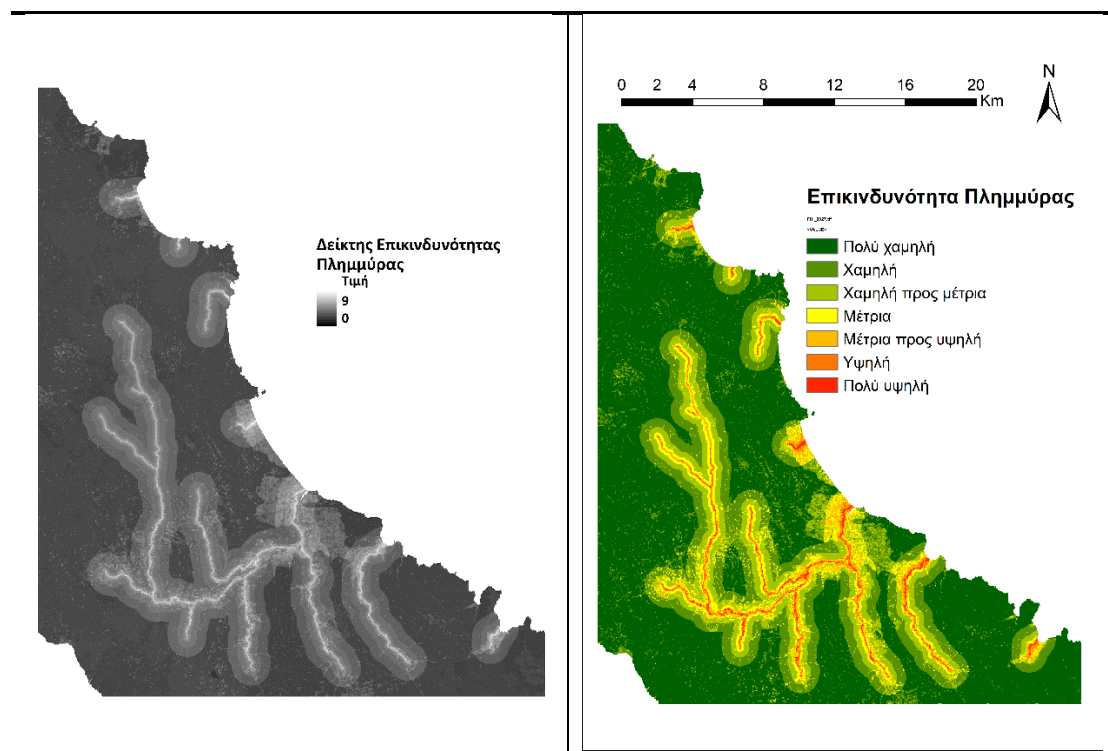
Εμφανώς και για τους 2 χάρτες η μεγαλύτερη επικινδυνότητα βρίσκεται κοντά στους κύριους κλάδους όπως στο ποταμό Νηλεύς και στις περιοχές με χαμηλή κλίση εδάφους, κοντά στις παράκτιες εκτάσεις και παραλίες. Στον πίνακα 5.3 απεικονίζονται τα ποσοστά εκτάσεων για κάθε μια από τις 7 κατηγορίες. Και για τους 2 χάρτες περίπου το 60% της έκτασης έχει κατηγοριοποιηθεί ως «πολύ χαμηλή», ως «χαμηλή» το 20%, ως «χαμηλή προς μέτρια» το 12% περίπου και οι υπόλοιπες κατηγορίες καλύπτουν περίπου το 10-13% της έκτασης. Υπενθυμίζεται ότι τα διαστήματα των κατηγοριών είναι ελαφρώς διαφορετικά για τον κάθε χάρτη (Πιν.5-2). Η σύγκριση των 2 χαρτών και η συσχέτιση με υπάρχουσες μελέτες γίνεται στις επόμενες 2 υπο-ενότητες.

Πίνακας 5-2 Τα διαστήματα της κάθε κατηγορίας για τους δύο χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας

Τιμές ΔΕΠ 27/07/21	Κατηγορίες επικινδυνότητας πλημμύρας	Τιμές ΔΕΠ 27/09/21
<2.847	Πολύ χαμηλή	<3.005
2.847 – 3.584	Χαμηλή	3.005 – 3.769
3.584 – 4.138	Χαμηλή προς μέτρια	3.769 – 4.454
4.138 – 4.770	Μέτρια	4.454 – 5.270
4.770 – 5.534	Μέτρια προς υψηλή	5.270 – 6.113
5.534 – 6.561	Υψηλή	6.113 – 7.009
>6.561	Πολύ υψηλή	>7.009

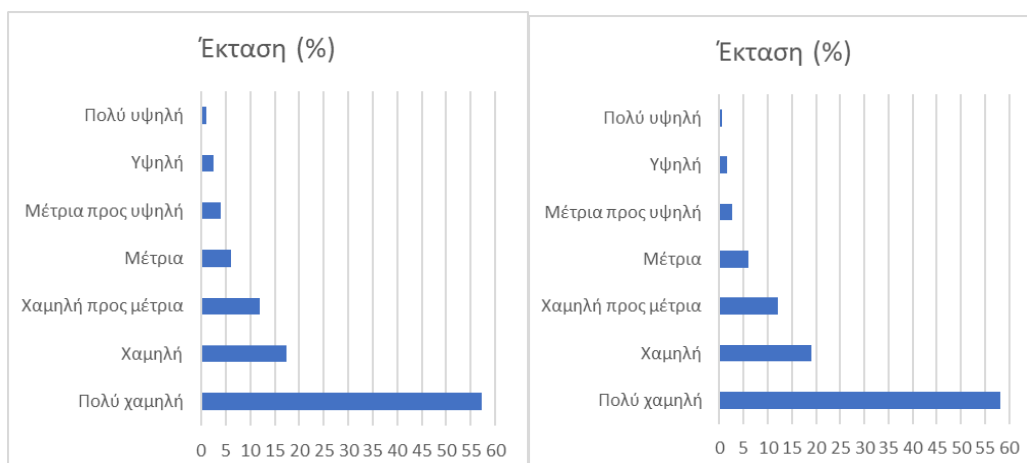


Σχήμα 5-2 Ο χάρτης του ΔΕΠ 27/7/21 και ο χάρτης επικινδυνότητας πλημμύρας με ζώνες



Σχήμα 5-3 Ο χάρτης του ΔΕΠ 27/9/21 και ο χάρτης επικινδυνότητας πλημμύρας με ζώνες

Πίνακας 5-3 Ποσοστά έκτασης για την κάθε ζώνη επικινδυνότητας πλημμύρας. Αριστερά 27/07/21 και δεξιά 27/09/21



5.4.2 Σύγκριση επικινδυνότητας πλημμύρας μεταξύ των 2 ημερομηνιών

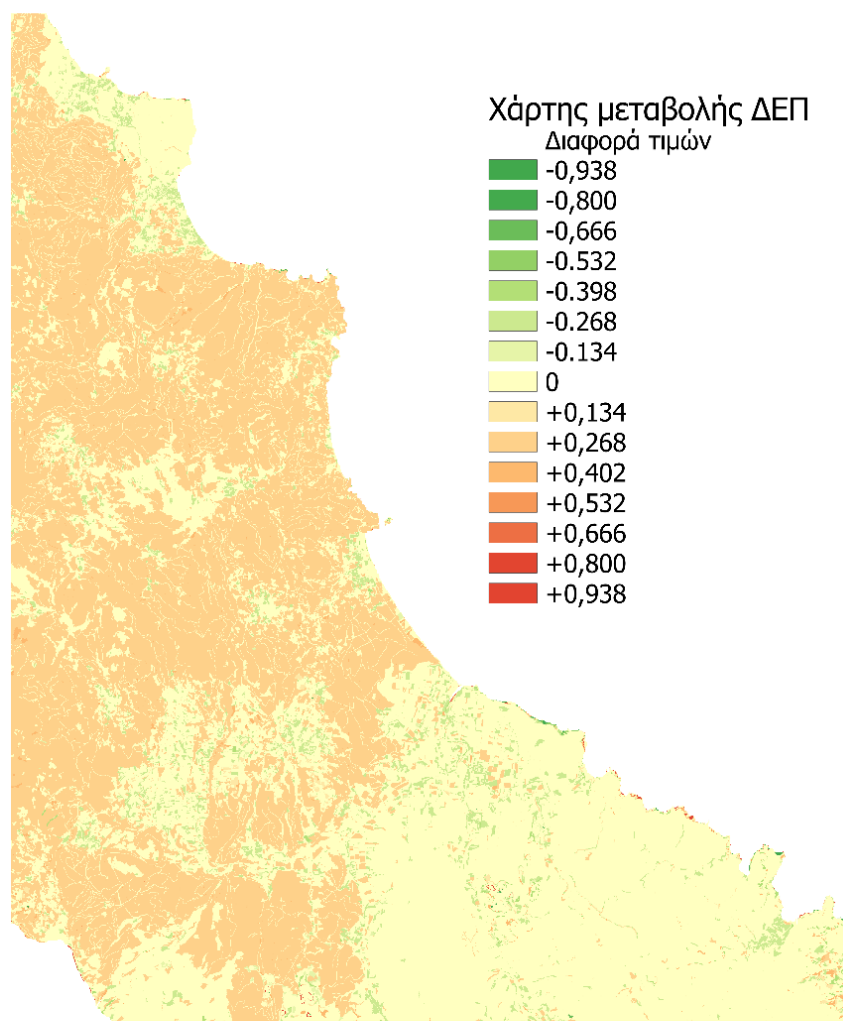
Για να εξεταστεί η μεταβολή του δείκτη επικινδυνότητας πλημμύρας από τις 27/07/21 στις 27/09/21 στην περιοχή μελέτης, λόγω της μεγάλης πυρκαγιάς του Αυγούστου, δημιουργήθηκε χάρτης μεταβολής ΔΕΠ που απεικονίζονται οι διαφορές των 2 δεικτών. Ο χάρτης αυτός δημιουργήθηκε αφαιρώντας για κάθε ρικελ τον δείκτη της ημερομηνίας του Σεπτεμβρίου από αυτόν του Ιουλίου:

$$\text{Χάρτης σύγκρισης} = \Delta\text{ΕΠ}(2) - \Delta\text{ΕΠ}(1)$$

(6)

Όπου (2) είναι ο ΔΕΠ για 27/09/21 και (1) ο ΔΕΠ για 27/07/21. Ο χάρτης απεικονίζεται στο σχήμα 5.4. Αρχικά επισημαίνεται ότι οι διαφορές στους δείκτες μπορεί να είναι μόνο πολλαπλάσια του 0.134. Ο λόγος είναι ότι προφανώς μόνο το κριτήριο της κάλυψης γης αλλάζει ανάμεσα στις 2 ημερομηνίες. Το βάρος αυτού του κριτηρίου είναι 0.134 και η κατάταξη των κλάσεων κάλυψης γης ως προς τον ΔΕΠ έχει ακέραιους αριθμούς (Πιν.4-7). Στον χάρτη παρατηρείται ότι κυριαρχούν οι τιμές: 0, +0.268 και -0.268. Η τιμή 0 δείχνει καμία αλλαγή και παρατηρείται σχεδόν σε όλες τις εκτάσεις που δεν επλήγησαν από πυρκαγιές, ιδιαίτερα στο δάσος στα νοτιοανατολικά. Η τιμή +0.268 υποδεικνύει αύξηση στην κατάταξη ΔΕΠ κατά 2 μονάδες το οποίο μπορεί να ισχύει μόνο για μεταβολή από βλάστηση σε γυμνό έδαφος και αυτό παρατηρείται προφανώς στις καμένες εκτάσεις που υπήρχε προηγουμένως βλάστηση. Η τιμή -0.268 υποδεικνύει ακριβώς το αντίστροφο και παρατηρείται κυρίως σε καλλιέργειες που δεν είχαν βλάστηση τον Ιούλιο και απέκτησαν τον Σεπτέμβριο. Παρατηρούνται και λίγα σχετικά ρικελ στις εκτάσεις των καμένων με τιμή +0.402 που δείχνει αλλαγή από βλάστηση σε βραχώδη έδαφος που είναι λογικό. Οι υπόλοιπες τιμές και ιδιαίτερα των ακραίες αποτελούν σφάλματα στην συντριπτική πλειοψηφία τους και είναι μόνο μερικά ρικελ. Συγκεκριμένα οι τιμές +/-0.938 εμφανίζονται αποκλειστικά σε ρικελ ανάμεσα σε χερσαίο έδαφος και λίμνες ή θάλασσες που στην μια δορυφορική εικόνα είναι νερό και στην άλλη έδαφος. Στην υπο-ενότητα 5.5 προτείνονται αλλαγές στην μεθοδολογία

που θα έδειχναν ενδεχομένως μεγαλύτερη επιρροή πυρκαγιών στην επικινδυνότητα πλημμύρας.

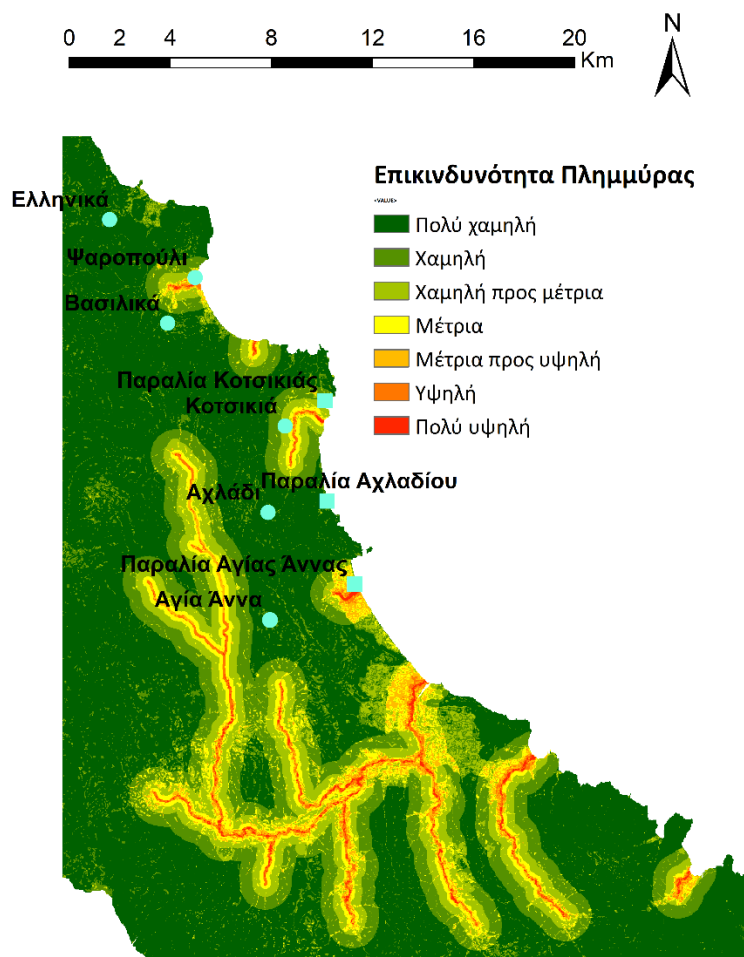


Σχήμα 5-4 Χάρτης σύγκρισης δεικτών επικινδυνότητας πλημμύρας μεταξύ των 2 ημερομηνιών

5.4.3 Συσχέτιση με την πλημμύρα στις 09/10/21 και υπάρχουσες μελέτες

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα «Εισαγωγή» στις 9/10/21 καταγράφηκαν καταστροφές από πλημμύρες σε παράκτιους και ορεινούς οικισμούς. Στο σχήμα 5-5 απεικονίζονται αυτοί οι οικισμοί πάνω στον χάρτη επικινδυνότητας. Παρατηρείται ότι οι παράκτιοι οικισμοί βρίσκονται σε εκτάσεις μεγάλης επικινδυνότητας πλημμύρας καθώς βρίσκονται κοντά σε κλάδους 3^{ης} και 4^{ης} τάξης. Σύμφωνα με τις δημοσιογραφικές εκεί συνέβησαν και μεγαλύτερες

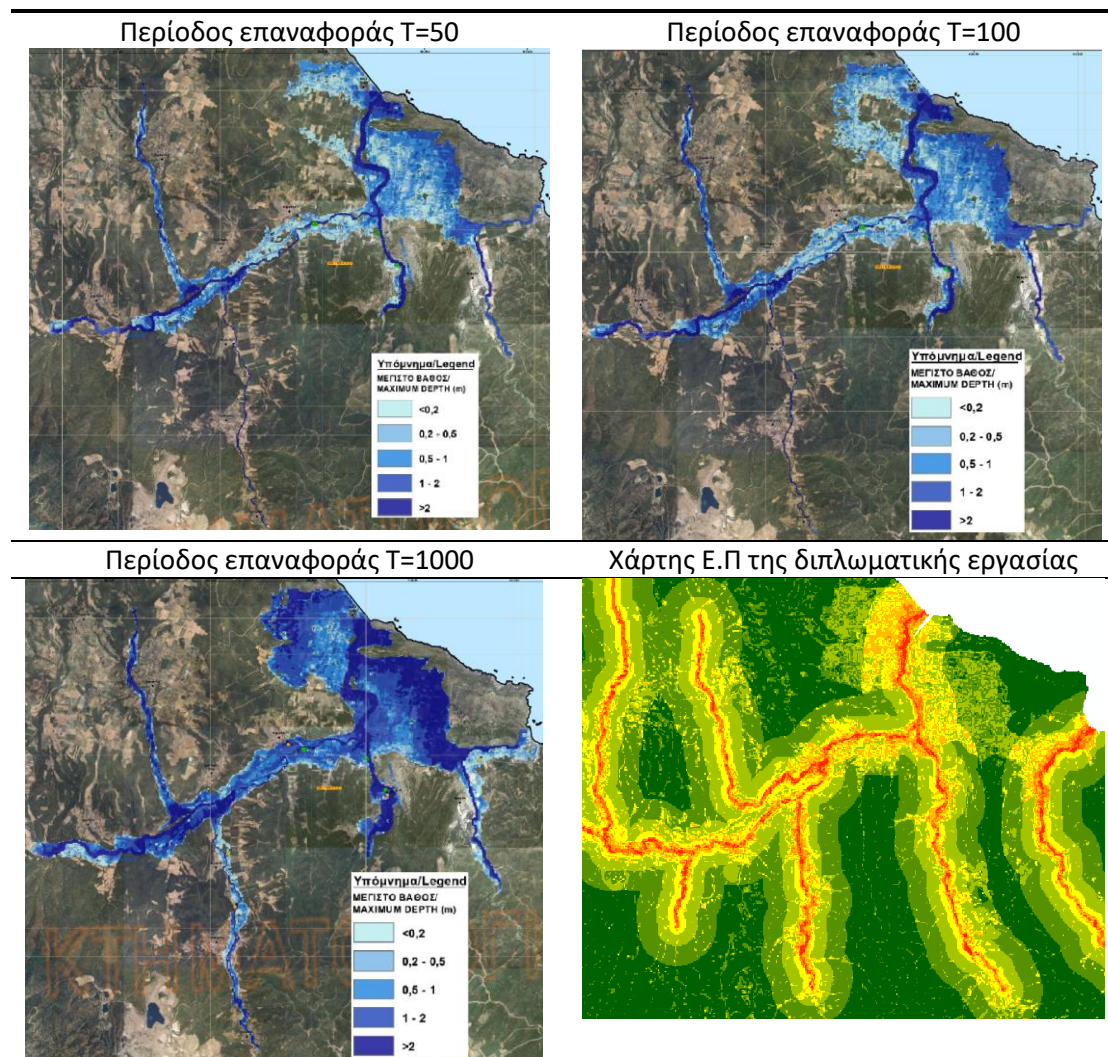
καταστροφές. Οι ορεινοί οικισμοί δεν φαίνεται να διατρέχουν κίνδυνο κυρίως λόγω των μεγάλων κλίσεων του εδάφους και της μεγάλης απόστασης τους από τους κύριους κλάδους που είναι οι κλάδοι 3^{ης} και 4^{ης} τάξης. Αξίζει όμως να αναφερθεί ότι βρίσκονται πολύ κοντά σε κλάδους 1^{ης} και 2^{ης} τάξης.



Σχήμα 5-5 Ο χάρτης επικινδυνότητας πλημμύρας ημερομηνίας 29/07/21 με τους οικισμούς που επλήγησαν από πλημμύρα στις 9/10/21

Κρίθηκε σκόπιμο να γίνει σύγκριση του χάρτη επικινδυνότητας πλημμύρας της διπλωματικής εργασίας με αντίστοιχους χάρτες που έχουν εκπονηθεί από το Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας στην ίδια περιοχή μελέτης. Η Ειδική Γραμματεία Υδάτων αυτού του υπουργείου έχει δημιουργήσει χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας για ποτάμιες ροές μόνο για το νότιο μέρος της περιοχής μελέτης, συγκεκριμένα για τη χαμηλή ζώνη λεκάνης του ρέματος Κηρεύς (Ειδική Γραμματεία υδάτων ΥΠΕΝ, 2017). Δημιουργήθηκαν χάρτες χωρικής μεταβολής μέγιστου βάθους πλημμύρας για 3 σενάρια πλημμυρών: (α) περίοδος επαναφοράς $T=1000$ χρόνια (πολύ χαμηλής πιθανότητας), (β) περίοδος επαναφοράς $T=100$ χρόνια (μέση πιθανότητα), (γ) περίοδος επαναφοράς $T=50$ χρόνια (υψηλή πιθανότητα). Οι χάρτες αυτοί απεικονίζουν το μέγιστο βάθος και την έκταση των πλημμυρών (Πιν.5-4). Παρατηρείται ότι ο χάρτης Ε.Π έχει μεγάλες ομοιότητες με τους 3 αντίστοιχους χάρτες του ΥΠΕΝ.

Πίνακας 5-4 Οι 3 χάρτες χωρικής μεταβολής μέγιστου βάθους πλημμύρας του ΥΠΕΝ και ο χάρτης Ε.Π για 27/09/21



5.5 Σχολιασμός διαδικασίας, αποτελεσμάτων και προτάσεις βελτίωσής τους

Η εφαρμογή της μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης σε συνδυασμό με την αναλυτική ιεράρχηση αποδείχθηκε επιτυχής στην δημιουργία χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας που προσεγγίζουν αντίστοιχους επίσημους χάρτες. Για αυτούς του επίσημους χάρτες αξιοποιούνται πλήθος αριθμητικών δεδομένων εντός αριθμητικών μοντέλων με μεγάλη ακρίβεια. Η μεθοδολογία της παρούσας εργασίας χαρακτηρίζεται ως ημι-ποιοτική καθώς διαχειρίζεται και ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα εντός περιβάλλοντος GIS.

Παρ' όλα αυτά στις περίπτωση της σύγκρισης χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας πριν και μετά την πυρκαγιά η μεταβολή του δείκτη φανερώθηκε αρκετά μικρότερη από την αναμενόμενη στην παρούσα εργασία. Η προέλευση αυτής της μικρότερης από την αναμενόμενη μεταβολή είναι από την επιλογή των βαρών των κριτηρίων, συγκεκριμένα του κριτηρίου κάλυψης γης και της κατάταξης των κατηγοριών του. Τα βάρη για την παρούσα εργασία προέρχονται από την μελέτη των Franci et al. (2016) όπου η περιοχή μελέτης ήταν

ένα μέρος μιας λεκάνης απορροής της Κύπρου. Υπενθυμίζεται ότι τα βάρη καθορίζονται από την εμπειρία του χρήστη και τις διαθέσιμες πληροφορίες για την περιοχή μελέτης. Υπάρχουν και άλλες μελέτες πολυκριτηριακής ανάλυσης για επικινδυνότητα ή κίνδυνο πλημμύρας όπου είτε θέτονται διαφορετικά βάρη για τα 5 κριτήρια είτε χρησιμοποιώντας αρκετά περισσότερα κριτήρια από διαθέσιμα δεδομένα. Υπάρχουν μελέτες που θέτουν μεγαλύτερο βάρος στην κάλυψη γης και έτσι έχει μεγαλύτερη επιρροή στον δείκτη επικινδυνότητας πλημμύρας σε περίπτωση κάποια αλλαγής όπως μια πυρκαγιά. Περιπτώσεις αντίστοιχων μελετών με διαφορετικά κριτήρια και βάρη στην κάλυψη γης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-5. Φαίνεται ότι θα μπορούσε το κριτήριο της κάλυψης γης να είχε μεγαλύτερο βάρος και έτσι να αποτυπώνονταν πιο αισθητά οι διαφορές ανάμεσα στους 2 χάρτες. Θα μπορούσαν επίσης να συμμετέχουν περισσότερα κριτήρια όπως η ποσότητα βροχόπτωσης ή το υψόμετρο για πιο κοντινά με την πραγματικότητα αποτελέσματα, εάν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα. Τέλος στην κατάταξη των κατηγοριών κάλυψης γης θα μπορούσε η βλάστηση να είχε μικρότερη επιρροή στο ΔΕΠ.

Τα τελικά αποτελέσματα θα μπορούσαν να ήταν ακόμα πιο ακριβή εάν ήταν διαθέσιμα ψηφιακά δεδομένα των τεχνητών καναλιών της περιοχής μελέτης. Στον πίνακα 5-4 η περιοχή στα βορειοανατολικά με τις μεγάλες τιμές βάθους πλημμύρας οφείλεται στην ύπαρξη τεχνητών καναλιών γύρω από τις καλλιέργειες τα οποία δεν συμμετείχαν σε αυτήν την εργασία.

Πίνακας 5-5 Πέντε αντίστοιχες μελέτες πολυκριτηριακής ανάλυσης για κίνδυνο ή επικινδυνότητα πλημμύρας με τα κριτήρια που εφάρμοσαν και τα βάρη τους

Μελέτη/κριτήριο	R.Sinha et al.	Pradhan 2010	Krishnamurthy and Jayaprakash 2013	Surjit Saini 2012	Sani Yahaya et al. 2010
Πυκνότητα πληθυσμού	0.49				
Απόσταση από ενεργούς κλάδους	0.23	0.274			
Υψόμετρο	0.15	0.011			
Κάλυψη γης	0.07	0.328	3	0.13	0.057
Πυκνότητα βλάστησης (Agriculture)	0.04				
Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά	0.02			0.20	
Κλίση εδάφους		0.032	5	0.33	0.197
Είδη καμπυλότητας		0.013			
Κατεύθυνση ροής		0.063			
Είδη εδάφους		0.316	2	0.07	0.152
Ποσότητα βροχόπτωσης		0.092	7		0.339
Μέγεθος της μικρο-λεκάνης απορροής			6		

Πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου	4	0.27	0.255
Δρόμοι ανά Μικρή Λεκάνη Απορροής	1		

6. Συμπεράσματα

Σε αυτή την διπλωματική εργασία εφαρμόστηκε πολυκριτηριακή ανάλυση εντός περιβάλλοντος GIS για την παραγωγή 2 χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας και την μετέπειτα σύγκριση τους, μια μέθοδος που αξιοποιεί και ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα. Ως περιοχής μελέτης επιλέχθηκε ένας μέρος της Βόρειας Εύβοιας που περιέχει και οικισμούς που καταγεγραμμένα επλήγησαν από πλημμύρες στις 09/10/21. Οι 5 παράμετροι που επηρεάζουν την επικινδυνότητα πλημμύρας μιας περιοχής και επιλέχθηκαν είναι: κλίση του εδάφους, απόσταση από τους κύριους κλάδους, υφή του υδρογραφικού δικτύου, γεωλογία και κάλυψη γης. Με την μέθοδο της αναλυτικής ιεράρχησης καθορίστηκε η σημαντικότητα του κάθε κριτηρίου σε σχέση με τα άλλα και έπειτα υπολογίστηκε το βάρος του κάθε ενός. Μετά τον υπολογισμό των βαρών, δημιουργήθηκαν οι 2 χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας χωρισμένοι σε ζώνες. Τα διαστήματα των ζωνών καθορίστηκαν με την μέθοδο φυσικών διακοπών. Τέλος οι χάρτες συγκρίθηκαν μεταξύ τους ώστε να εντοπιστούν διαφορές λόγω των πυρκαγιών που μεσολάβησαν και με επίσημους χάρτες της περιοχής μελέτης για να φανεί εάν προσεγγίζουν την πραγματικότητα.

Η μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης σε συνδυασμό με αναλυτική ιεράρχηση αποδείχθηκε χρήσιμη στον προσδιορισμό επικινδυνότητας πλημμύρας αφού μπορούν να αξιοποιούνται ετερογενή δεδομένα σε ανεξαρτήτου έκτασης περιοχές μελέτης. Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι όλα τα δεδομένα της διπλωματικής εργασίας είναι δημόσια και προέρχονται από εφαρμογές τηλεπισκόπησης, με εξαίρεση τον γεωλογικό χάρτη.

Οι χάρτες κάλυψης γης προήλθαν από αντικειμενοστρεφή ανάλυση εικόνων SENTINEL-2 με ταξινόμηση υπό εποπτεία (supervised). Η δομή αυτής της διαδικασίας μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε είδους δορυφορική εικόνα, εφόσον ο χρήστης ορίζει τις παραμέτρους της κατάτμησης και του κανόνες ασαφούς λογικής που συμπληρώνουν την ταξινόμηση.

Στα δεδομένα για την παραγωγή των χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας συμπληρώνουν τα γεωλογικά δεδομένα από γεωλογικό χάρτη και τα μορφολογικά δεδομένα που εξάχθηκαν από ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων ανάλυσης 30-m. Οι χάρτες συγκρίθηκαν μεταξύ τους και εντοπίστηκαν μικρές κλίμακας διαφορές. Συγκρίθηκαν επίσης με υπάρχουσες μελέτες παρατηρήθηκαν μεγάλες ομοιότητες μεταξύ τους. Προφανώς ο υπολογισμός του δείκτη μπορεί να βελτιωθεί εάν συμμετέχουν περαιτέρω κριτήρια που σχετίζονται με την βροχόπτωση ή προηγούμενες πλημμύρες, εάν είναι διαθέσιμα φυσικά. Και η προσέγγιση της αναλυτικής ιεράρχησης μπορεί να βελτιωθεί με τη βοήθεια ειδικών επιστημόνων, θέτοντας βάρη που προσεγγίζουν περισσότερο την πραγματικότητα και αναδεικνύουν περισσότερο τις επιπτώσεις δασικών πυρκαγιών στην επικινδυνότητα πλημμύρας.

Οι χάρτες επικινδυνότητας με ζώνες βοηθάνε στον εντοπισμό κινδύνων που μπορούν να προκύψουν από μια πλημμύρα και επίσης σε πρώτο στάδιο συνεπικουρούν στον εντοπισμό των πιο ευάλωτων περιοχών, στην διαχείριση γης και στον σχεδιασμό στρατηγικών

αντιμετώπισης καταστροφών. Μπορούν να συνεισφέρουν σε αυτό και εξειδικευμένες έρευνες.

Από τα αποτελέσματα της διπλωματικής αυτής εργασίας, παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης με αναλυτική ιεράρχηση σε περιβάλλον GIS δίνει την δυνατότητα για έναν σχετικά εύκολο, ευέλικτο και γρήγορο τρόπο επίλυσης περίπλοκων προβλημάτων. Η διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε περιοχή και να προστεθούν τα αντίστοιχα δεδομένα. Προφανώς αυτά τα δεδομένα θα καθορίσουν τις παραμέτρους που σχετίζονται με την αντικειμενοστρεφή ανάλυση και τα βάρη των κριτηρίων μετέπειτα και την κατάταξη των κλάσεων τους. Σε αυτά χρήσιμη θα είναι η γνώμη ειδικών επιστημόνων αφού όλα τα προηγούμενα ορίζονται από χρήστες. Ωστόσο η διαδικασία παραμένει ίδια και υλοποιήσιμη παντού αφού βασίζεται σε δεδομένα τηλεπισκόπησης.

7. Βιβλιογραφία

1. Callaghan, M., Schleussner, CF., Nath, S. *et al.* Machine-learning-based evidence and attribution mapping of 100,000 climate impact studies. *Nat. Clim. Chang.* **11**, 966–972 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01168-6>
2. https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_en
3. Leopardi M, Scorzini AR (2015). Effects of wildfires on peak discharges in watersheds. *iForest* 8: 302-307. - <https://doi.org/10.3832/ifor1120-007>
4. Wang, Y., Li, Z., Tang, Z. *et al.* A GIS-Based Spatial Multi-Criteria Approach for Flood Risk Assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water Resour Manage* 25, 3465–3484 (2011). <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9866-2>
5. Malczewski J (2006) GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *Int J Geogr Inf Sci* 20:703–726. doi:10.1080/13658810600661508
6. Saaty TL (1980) *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation*. McGraw, New York
7. Sinha R, Bapalu GV, Singh LK, Rath B (2008) Flood risk analysis in the Kosi river basin, North Bihar using multi-parametric approach of analytical hierarchy process (AHP). *J Indian Soc Remote Sens* 36:293–307
8. Pradhan B (2010) Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing. *J Spat Hydrol* 9(2)
9. Krishnamurthy R, Jayaprakash M (2013) Flood hazard assessment of vamanapuram river basin, Kerala, India: an approach using remote sensing and GIS techniques. *Adv Appl Sci Res* 4:263–274

10. Yahaya S, Ahmad N, Abdalla RF (2010) Multicriteria analysis for flood vulnerable areas in HadejiaJama'are river Basin, Nigeria. *Eur J Sci Res* 42:71–83
11. Musungu K, Motala S, Smit J (2012) Using multi-criteria evaluation and GIS for flood risk analysis in informal settlements of cape town: the case of Graveyard Pond. *S Afr J Geomat* 1:77–91
12. Franci, F., Bitelli, G., Mandanici, E. et al. Satellite remote sensing and GIS-based multi-criteria analysis for flood hazard mapping. *Nat Hazards* 83 (Suppl 1), 31–51 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2504-9>
13. Χαλκιάς, Χ., & Γκούσια, Μ. (2015). Μεθοδολογία Αναλυτικής Ιεράρχησης [Κεφάλαιο]. Στο Χαλκιάς, Χ., & Γκούσια, Μ. 2015. Γεωγραφική ανάλυση με την αξιοποίηση της γεωπληροφορικής [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://hdl.handle.net/11419/4549>
14. R.W. Saaty, The analytic hierarchy process—what it is and how it is used, *Mathematical Modelling*, Volume 9, Issues 3–5, 1987, Pages 161-176, ISSN 0270-0255, [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).
15. Munawar HS, Hammad AWA, Waller ST. Remote Sensing Methods for Flood Prediction: A Review. *Sensors (Basel)*. 2022 Jan 26;22(3):960. doi: 10.3390/s22030960. PMID: 35161706; PMCID: PMC8838435.
16. Mohammad D. Hossain, Dongmei Chen, Segmentation for Object-Based Image Analysis (OBIA): A review of algorithms and challenges from remote sensing perspective, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 150, 2019, Pages 115-134, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.02.009>.
17. Fernandez DS, Lutz MA (2010) Urban flood hazard zoning in Tucuman Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Eng Geol* 111:90–98. doi:10.1016/j.enggeo.2009.12.006
18. Benz UC, Hofmann P, Willhauck G et al (2004) Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 58:239–258. doi:10.1016/j.isprsjprs.2003.10.002
19. Strahler AN (1964) Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: Chow VT(ed) *Handbook of applied hydrology*. McGraw Hill Book Company, New York, pp 4–35
20. Horton RE (1945) Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol Soc Am Bull* 56:275–370
21. Shankar S, Dharanirajan K (2014) Drainage morphometry of flood prone rangat watershed, middle Andaman, India—a geospatial approach. *Int J Innov Technol Explor Eng* 3:15–2

22. Withanage NS, Dayawansa NDK, De Silva RP (2014) Morphometric analysis of the Gal Oya river basin using spatial data derived from GIS. *Trop Agric Res* 26:175–188
23. Rudraiah M, Govindaiah S, Vittala S (2008) Morphometry using remote sensing and GIS techniques in the sub-basins of Kagna river basin, Gulburga district, Karnataka, India. *J Indian Soc Remote Sens* 36:351–360
24. Reddy GPO, Maji AK, Gajbhiye KS (2004) Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India—a remote sensing and GIS approach. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 6:1–16. doi:10.1016/j.jag.2004.06.003
25. Magesh NS, Jitheshlal KV, Chandrasekar N, Jini KV (2013) Geographical information system-based morphometric analysis of Bharathapuzha river basin, Kerala, India. *Appl Water Sci* 3:467–477. doi:10.1007/s13201-013-0095-0
26. Sreedevi PD, Subrahmanyam K, Ahmed S (2004) The significance of morphometric analysis for obtaining groundwater potential zones in a structurally controlled terrain. *Environ Geol* 47:412–420. doi:10.1007/s00254-004-1166-1
27. Drobne S, Lisec A (2009) Multi-attribute decision analysis in GIS: weighted linear combination and ordered weighted averaging. *Informatica* 33:459–474
28. Ouma Y, Tateishi R (2014) Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment. *Water* 6:1515–1545. doi:10.3390/w6061515
29. Civita M (2005) *Idrogeologia applicata e ambientale*, CEA-Casa Editrice Ambrosiana
30. Stefanidis S, Stathis D (2013) Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP). *Nat Hazards* 68:569–585. doi:10.1007/s11069-013-0639-5
31. Ειδική Γραμματεία Υδάτων ΥΠΕΝ Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας – 2016. https://floods.ypeka.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=408&catid=23&Itemid=707 . Επίσκεψη στον ιστότοπο στις 19/09/2023.