

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης



Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
- Μηχανικών Γεωπληροφορικής

Διπλωματική Εργασία με Θέμα:

«Προσομοίωση Συμπεριφοράς Δασικής Πυρκαγιάς με χρήση
Τηλεπισκοπικών Δεδομένων και Μοντέλων Διάδοσης. Η περίπτωση
της Β. Εύβοιας - Αύγουστος 2021»



Επιβλέπων Καθηγητής: Καράντζαλος Κωνσταντίνος

Μάντζαρης Γιάννης

25-6-2023

National Technical University Of Athens

Remote Sensing Laboratory



School Of Rural and Surveying Engineering
- Geoinformatics Engineering

Thesis:

«Simulating Forest Fire Behavior Using Remote Sensing Data and Propagation Models. The case of North Evia - August 2021»



Supervisor: Karantzalos Konstantinos

Mantzaris Giannis

25-6-2023

Περίληψη

Οι Δασικές πυρκαγιές στη περιοχή της Μεσογείου και συγκεκριμένα στην Ελλάδα και την Εύβοια, αποτελούν ένα διαχρονικό γεγονός, αναπόφευκτο λόγω της φύσης των δασικών εκτάσεων, κυρίως των κωνοφόρων και ταυτόχρονα καταστρεπτικό. Η κατάσταση στην Ελλάδα γύρω από την μελέτη και τη πρόληψη των καταστρεπτικών επιπτώσεων των πυρκαγιών βρίσκεται σε πολύ πρώιμο στάδιο. Με τη χρήση μοντέλων προσομοίωσης πυρκαγιών και συγκεκριμένα του FlamMap, έγινε προσομοίωση της πυρκαγιάς της Β. Εύβοιας που έλαβε χώρα τον Αύγουστο του 2021. Για την προσομοίωση δημιουργήθηκαν χάρτες βλάστησης με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Landsat 8 και αντικειμενοστρεφή ανάλυση στο λογισμικό e Cognition Developer. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό QGIS για την παραγωγή των υπόλοιπων χαρτών που ήταν αναγκαίοι (κλίσεων, προσανατολισμού κ.α.). Τα υπόλοιπα δεδομένα πάρθηκαν από διαφορετικούς επίσημους φορείς. Τα μετεωρολογικά δεδομένα από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, οι εστίες της δασικής πυρκαγιάς από την Πυροσβεστική Υπηρεσία και οι δορυφορικές εικόνες από το Copernicus Open Access Hub. Στόχος είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με την πραγματική έκταση της πυρκαγιάς και η εξαγωγή συμπερασμάτων.

Λέξεις Κλειδιά: Δασικές Πυρκαγιές, Βόρεια Εύβοια, Τηλεπισκόπηση, FlamMap, Μοντέλα Καύσιμης Ύλης (M.K.Y.)

Abstract

Forest Fires in Mediterranean, specifically in Greece and Euboea, are a perennial event, inevitable due to the nature of forest areas, especially the conifers, and at the same time destructive. The situation in Greece regarding the study and prevention of the destructive effects of forest fires is at an exceedingly early stage. Using fire simulation models and specifically FlamMap, the North Euboea fire that took place in August 2021 was simulated. For the needs of the simulation vegetation maps were created using Landsat 8 satellite imagery and object-oriented analysis in eCognition Developer software. Furthermore, QGIS software was used to create the rest of the maps that were necessary (slope, orientation, etc.). The rest of the data were collected from official institutions. Meteorological data from the National Observatory of Athens, the starting fire points from Fire Service and the satellite imagery from Copernicus Open Access Hub. The aim is to compare the simulation results with the actual extent of the burned area and draw conclusions.

Keywords: Forest Fires, North Euboea, Remote Sensing, FlamMap, Fuel Models

Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος αυτής της εργασίας, θα ήθελα να δώσω ευχαριστήσω κάποια άτομα που με βοήθησαν ώστε να τη διεκπεραιώσω. Αρχικά, ένα ευχαριστώ στον επιβλέπων καθηγητή κ. Καράντζαλο, για την ανταπόκριση του στη διάθεση μου να ασχοληθώ με αυτό το θέμα. Ένα τεράστιο θερμό ευχαριστώ στον Δρ. Πολυχρόνη Κολοκούση, του οποίου χωρίς την συμβολή δεν θα είχε ολοκληρωθεί αυτή η εργασία. Ο χρόνος, η γνώση και η στήριξη που αφιέρωσε ήταν καίριας σημασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Κοσμά Σταμπουλίδη και τον Χρήστο Ντίνη, οι οποίοι με συμβούλεψαν αρχικά σε ένα πρώτο επίπεδο, όταν ξεκίνησα την εργασία και ήταν παρών σε μελλοντικές μου ερωτήσεις και απορίες σχετικά με τις δικές τους διπλωματικές εργασίες.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υλική και ψυχολογική στήριξη όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου, τους φίλους που έκανα τα χρόνια της φοίτησης μου αλλά και τα υπόλοιπα αγαπημένα μου πρόσωπα, που στάθηκαν δίπλα μου.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	- 3 -
Ευχαριστίες.....	- 4 -
Ευρετήριο Εικόνων.....	- 6 -
Ευρετήριο Πινάκων.....	- 10 -
Κεφάλαιο 1.....	- 11 -
1.1 Εισαγωγή.....	- 11 -
1.2 Αντικείμενο της Μελέτης.....	- 11 -
1.3 Δομή της Εργασίας.....	- 12 -
Κεφάλαιο 2. Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας.....	- 13 -
2.1 Δασικές Πυρκαγιές.....	- 13 -
2.1.1 Ανατομία Πυρκαγιάς.....	- 18 -
2.1.2 Εξάπλωση Πυρκαγιάς.....	- 19 -
2.1.3 Είδη Δασικών Πυρκαγιών.....	- 20 -
2.1.4 Παράγοντες που επηρεάζουν μια δασική πυρκαγιά.....	- 21 -
2.2 Τηλεπισκόπηση.....	- 24 -
2.2.1 Δορυφορικές εικόνες.....	- 25 -
2.2.2 Αντικειμενοστρεφής ανάλυση – eCognition.....	- 28 -
2.3 Μοντέλα πρόβλεψης δασικών πυρκαγιών.....	- 30 -
2.3.1 Επιλογή Λογισμικού προσομοίωσης.....	- 34 -
2.4 Μοντέλα Καύσιμης Ύλης.....	- 35 -
Κεφάλαιο 3. Περιοχή Μελέτης.....	- 37 -
3.1 Δήμος Ιστιαίας-Αιδηψού.....	- 38 -
3.2 Δήμος Μαντουδίου-Λίμνης-Αγίας Άννας.....	- 40 -
3.3 Γεωμορφολογία.....	- 44 -
3.4 Χλωρίδα και Πανίδα περιοχής.....	- 44 -
3.5 Ιστορικό Πυρκαγιών.....	- 47 -
3.6 Δεδομένα Πυρκαγιάς Μελέτης.....	- 48 -
Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογική Προσέγγιση.....	- 51 -
4.1 Δεδομένα που συλλέχθηκαν.....	- 51 -
4.2 Παραγωγή θεματικών επιπέδων.....	- 52 -
4.2.1 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους.....	- 53 -

4.2.2 Χάρτης Κλίσεων Πραγών (Slope) και Χάρτης Προσανατολισμού Πραγών (Aspect)	- 54 -
4.2.3 Χάρτης Καλύψεων Γης	- 56 -
4.2.3.1 Δημιουργία Χάρτη Καλύψεων γης πριν την πυρκαγιά.....	- 56 -
4.2.3.2 Δημιουργία Χάρτη Καλύψεων Γης Μετά την Πυρκαγιά.....	- 66 -
4.2.4 Δημιουργία Χάρτη Βαθμού Συγκόμωσης	- 72 -
4.3 Προσομοίωση στο λογισμικό FlamMap	- 74 -
4.3.1 Αντιστοίχιση κλάσεων με Μοντέλα Καύσιμης Ύλης.....	- 75 -
4.3.2 Εισαγωγή δεδομένων στο FlamMap	- 81 -
4.3.2.1 Μετεωρολογικά Δεδομένα	- 83 -
4.3.2.2 Χρονική Υστέρηση της Καύσιμης Ύλης.....	- 83 -
4.3.2.3 Εστία Έναρξης Πυρκαγιάς	- 86 -
4.3.3 Αρχικά Αποτελέσματα	- 86 -
4.4 Δείκτες F-Score	- 101 -
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα.....	- 104 -
Κεφάλαιο 6. Προοπτικές.....	- 105 -
Επίλογος.....	- 105 -
Βιβλιογραφία	- 107 -

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Το “τρίγωνο της φωτιάς” σε διαφορετικές χρονικές και χωρικές κλίμακες (Claire M. Belcher et al. 2021).....	- 14 -
Εικόνα 2 Πυρκαγιά από κεραυνό	- 15 -
Εικόνα 3 Φωτιά από τσιγάρο.....	- 16 -
Εικόνα 4 Φωτιά από καύση απορριμμάτων	- 16 -
Εικόνα 5 Φωτιά από εμπρησμό	- 16 -
Εικόνα 6 Φωτιά από σιδηρόδρομο.....	- 17 -
Εικόνα 7 Φωτιά κατασκηνωτών.....	- 17 -
Εικόνα 8 Φωτιά από βλάβη ηλεκτρικού δικτύου	- 17 -
Εικόνα 9 Αυτανάφλεξη σε σκουπιδότοπο	- 18 -
Εικόνα 10 Ανατομία μιας δασικής πυρκαγιάς (Alexander, 2000)	- 19 -
Εικόνα 11 Πυρκαγιές Επιφάνειας, Εδάφους και Κόμης (Griffith, 2004).....	- 21 -
Εικόνα 12 Φασματικά κανάλια των δορυφόρων Landsat 8, 9 και τα κύρια χαρακτηριστικά τους (USGS, 2021)	- 27 -

Εικόνα 13 Διάγραμμα ατμοσφαιρικής μετάδοσης (%) προς το μήκος κύματος (nm) των πολυφασματικών καναλιών των Landsat 7 και 8 (NASA, Landsat Science)	- 27 -
Εικόνα 14 Ο δορυφόρος Landsat 8 (Satellite Imaging Corporation).....	- 28 -
Εικόνα 15 Δεδομένα εισόδου για την κατασκευή του αρχείου Τοπίου (Landscape) στο FlamMap/FARSITE (Finney, 2006).....	- 34 -
Εικόνα 16 Όρος Ξηρό (Wonder Greece, N. Ευβοίας, 2013).....	- 38 -
Εικόνα 17 Καταρράκτες Δρυμώνα (Πηγή: Wonder Greece, N. Ευβοίας, 2013)	- 39 -
Εικόνα 18 Δήμος Ιστιαιάς Αιδηψού (Wikipedia, 2023)	- 39 -
Εικόνα 19 Κάτοικοι ανά δημοτική ενότητα και κοινότητα με βάση την απογραφή του 2021 (ΕΛΣΤΑΤ, 2021).....	- 40 -
Εικόνα 20 Όρος Καντήλι (Wonder Greece, N. Ευβοίας, 2013).....	- 41 -
Εικόνα 21 Ποταμός Νηλέας (Wonder Greece, N. Ευβοίας, 2013).....	- 41 -
Εικόνα 22 Ποταμός Κηρέας (Wonder Greece, N. Ευβοίας, 2013)	- 42 -
Εικόνα 23 Ο Γεροπλάτανος του Ποταμού Κηρέα (Wonder Greece, N. Ευβοίας, 2013).-	- 42 -
Εικόνα 24 Δήμος Μαντουδίου-Λίμνης-Αγίας Άννας (Wikipedia, 2023).....	- 43 -
Εικόνα 25 Κάτοικοι ανά δημοτική ενότητα και κοινότητα με βάση την απογραφή του 2021 (ΕΛΣΤΑΤ, 2021).....	- 43 -
Εικόνα 26 Χάρτης Υψομέτρων Περιοχής Μελέτης	- 44 -
Εικόνα 27 Ακανθόχοιρος (Μουσείο Φυσικής Ιστορίας Κρήτης).....	- 45 -
Εικόνα 28 Τρανορινόλοφος Νυχτερίδα (lifegrecabat.eu).....	- 45 -
Εικόνα 29 Έβενος του Σίμπυορπ (Greekflora.gr)	- 46 -
Εικόνα 30 Ευβοϊκό Όνοσμο (Greekflora.gr).....	- 46 -
Εικόνα 31 Μπούφος (Wikipedia)	- 46 -
Εικόνα 32 Χρυσαιτός (Wikipedia)	- 47 -
Εικόνα 33 Καμένο Πευκόδασος στους Παπάδες	- 49 -
Εικόνα 34 Καμένη Έκταση στη Στροφυλιά	- 50 -
Εικόνα 35 Καμένη Έκταση στα Βασιλικά	- 51 -
Εικόνα 36 Περιοχή μελέτης πριν την πυρκαγιά (Ιούνιος 2021).....	- 52 -
Εικόνα 37 Περιοχή μελέτης μετά τη πυρκαγιά (Αύγουστος 2021)	- 53 -
Εικόνα 38 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους	- 54 -
Εικόνα 39 Χάρτης Κλίσεων Πρανών (Slope)	- 55 -
Εικόνα 40 Χάρτης Προσανατολισμού Πρανών (Aspect).....	- 55 -
Εικόνα 41 Παράδειγμα κατάτμησης σε σημείο της εικόνας.....	- 56 -
Εικόνα 42 Κατάτμηση (multiresolution segmentation) στο περιβάλλον του eCognition -	- 57 -
Εικόνα 43 Παράδειγμα δειγμάτων ταξινόμησης	- 58 -
Εικόνα 44 Υπολογισμός δείκτη NDVI στο Raster Calculator του QGIS.....	- 59 -
Εικόνα 45 Δείκτης NDVI Ιουνίου	- 60 -
Εικόνα 46 Δείκτης NDVI Οκτωβρίου.....	- 60 -
Εικόνα 47 Οι δύο δείκτες NDVI στο λογισμικό eCognition	- 61 -
Εικόνα 48 Λεπτομέρεια 2 NDVI με έμφαση στις αλλαγές	- 62 -
Εικόνα 49 Χρήση του αλγορίθμου Rasterize στο QGIS.....	- 63 -
Εικόνα 50 Εκπαίδευση του αλγορίθμου Random Forest.....	- 64 -

Εικόνα 51 Εκτέλεση του αλγορίθμου Random Forest	- 64 -
Εικόνα 52 Πράξεις στο Raster Calculator για την εισαγωγή των κλάσεων "Καλλιέργειες" και "Ελαιώνες"	- 65 -
Εικόνα 53 Ταξινομημένη περιοχή μελέτης πριν την πυρκαγιά	- 66 -
Εικόνα 54 Υπολογισμός Δείκτη NBR.....	- 67 -
Εικόνα 55 Δείκτης NDWI	- 68 -
Εικόνα 56 Κανόνας Ασαφούς Λογικής NDWI.....	- 69 -
Εικόνα 57 Κανόνας Ασαφούς Λογικής NBR	- 69 -
Εικόνα 58 Κανόνας Ασαφούς Λογικής για τις μη-καμένες εκτάσεις	- 70 -
Εικόνα 59 Αποτέλεσμα ιεραρχικής ταξινόμησης περιοχής μελέτης μετά την πυρκαγιά -	71 -
Εικόνα 60 Υπολογισμός της στατιστικής τιμής quantile. Παράδειγμα κλάσης πλατύφυλλων	- 72 -
Εικόνα 61 Κανόνες ασαφούς λογικής για τη δημιουργία του Χάρτη Βαθμού Συγκόμωσης- 73 -	
Εικόνα 62 Παράδειγμα κανόνων ασαφούς λογικής εισαγωγής της κλάσης των πλατύφυλλων στην κλάση "0-25%"	- 73 -
Εικόνα 63 Χάρτης Βαθμού Συγκόμωσης	- 74 -
Εικόνα 64 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για τους οικισμούς (Scott & Burgan, 2005).....	- 75 -
Εικόνα 65 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για τις καλλιέργειες (Scott & Burgan, 2005)	- 76 -
Εικόνα 66 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για τα υδάτινα σώματα (Scott & Burgan, 2005).-	76 -
Εικόνα 67 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για το γυμνό έδαφος (Scott & Burgan, 2005).....	- 77 -
Εικόνα 68 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για τα φρύγανα (Scott & Burgan, 2005)	- 77 -
Εικόνα 69 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για τις θαμνώδεις εκτάσεις (Scott & Burgan, 2005)..- 78 -	
Εικόνα 70 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για τους ελαιώνες (Scott & Burgan, 2005)	- 79 -
Εικόνα 71 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για τις εκτάσεις κωνοφόρων (Scott & Burgan, 2005) - 79 -	
Εικόνα 72 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για τις εκτάσεις πλατύφυλλων (Scott & Burgan, 2005).....	- 80 -
Εικόνα 73 Εισαγωγή πρώτης σειράς δεδομένων στο FlamMap.....	- 81 -
Εικόνα 74 Δημιουργία Κανόνα αντιστοίχισης κλάσης με M.K.Y. στο λογισμικό FlamMap- 82 -	
Εικόνα 75 Τελικοί κανόνες αντιστοίχισης κλάσεων με M.K.Y.	- 82 -
Εικόνα 76 Μετεωρολογικά Δεδομένα (.wx) στο λογισμικό FlamMap.....	- 83 -
Εικόνα 77 Υπολογισμός χρονικής υστέρησης υγρασίας για 1 ώρα με το λογισμικό BehavePlus	- 85 -
Εικόνα 78 Αρχείο .FMS με υγρασία νεκρής καύσιμης ύλης χρονικής υστέρησης 1, 10, 100 ωρών και περιερχόμενη υγρασία ποώδους και ξυλώδους βλάστησης (σε %).....	- 85 -
Εικόνα 79 Εστία Έναρξης Πυρκαγιάς σε υπόβαθρο Google Satellite.....	- 86 -
Εικόνα 80 Ταχύτητα εξάπλωσης πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και την επίσημη εστία έναρξης	- 87 -

Εικόνα 81 Μήκος φλόγας πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και την επίσημη εστία έναρξης.....	- 88 -
Εικόνα 82 Ρυθμός εξάπλωσης πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και την επίσημη εστία έναρξης.....	- 88 -
Εικόνα 83 Ένταση πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και την επίσημη εστία έναρξης.....	- 89 -
Εικόνα 84 Σύγκριση αποτελέσματος προσομοίωσης πυρκαγιάς με την επίσημη εστία έναρξης με την ταξινομημένη καμένη έκταση και υπόβαθρο Google Satellite.....	- 89 -
Εικόνα 85 Θέση της επίσημης εστίας έναρξης και μιας δεύτερης υποθετικής.....	- 91 -
Εικόνα 86 Πιθανή (και ταχύτερη) Πορεία προς τη δεύτερη εστία με τη χρήση του Google Maps.....	- 92 -
Εικόνα 87 Ταχύτητα εξάπλωσης πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και δύο εστίες.....	- 93 -
Εικόνα 88 Μήκος φλόγας πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και δύο εστίες- 93 -	-
Εικόνα 89 Ρυθμός εξάπλωσης πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και δύο εστίες.....	- 94 -
Εικόνα 90 Ένταση πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και δύο εστίες.....	- 94 -
Εικόνα 91 Σύγκριση αποτελέσματος προσομοίωσης πυρκαγιάς με δύο εστίες με την ταξινομημένη καμένη έκταση και υπόβαθρο Google Satellite.....	- 95 -
Εικόνα 92 Θέση της επίσημης εστίας έναρξης και άλλων δύο υποθετικών.....	- 96 -
Εικόνα 93 Πιθανή (και ταχύτερη) πορεία προς τη δεύτερη και τρίτη εστία έναρξης με χρήση Google Maps.....	- 97 -
Εικόνα 94 Ταχύτητα εξάπλωσης πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και τρεις εστίες.....	- 98 -
Εικόνα 95 Μήκος φλόγας πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και τρεις εστίες..- 98 -	-
Εικόνα 96 Ρυθμός εξάπλωσης πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και τρεις εστίες.....	- 99 -
Εικόνα 97 Ένταση πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και τρεις εστίες.....	- 99 -
Εικόνα 98 Σύγκριση αποτελέσματος προσομοίωσης πυρκαγιάς με τρεις εστίες με την ταξινομημένη καμένη έκταση και υπόβαθρο Google Satellite.....	- 100 -

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1 Ιστορικά και τεχνικά χαρακτηριστικά δορυφόρων Landsat (Φράγκου, 2016, USGS, Landsat 8, 2013, USGS, Landsat 9, 2021)	- 26 -
Πίνακας 2 Οι Μ.Κ.Υ. κατά τον Albini (1976) και τον Kalabokidis (2004)	- 35 -
Πίνακας 3 Μ.Κ.Υ κατά τους Scott & Burgan (2005)	- 36 -
Πίνακας 4 Τα 7 Μ.Κ.Υ κατά τον Dimitrakopoulos (2002)	- 37 -
Πίνακας 5 Οι μεγαλύτερες σε έκταση δασικές πυρκαγιές στην Εύβοια (>10.000 στρ.).	- 47 -
-	
Πίνακας 6 Καμένες Εκτάσεις Ανά Τ.Κ. Δήμου Λίμνης-Μαντουδίου-Αγίας Άννας (ΥΛΗ, 2021).....	- 49 -
Πίνακας 7 Καμένες Εκτάσεις Ανά Τ.Κ. Δήμου Ιστιαίας-Αιδηψού (ΥΛΗ,2021)	- 50 -
Πίνακας 8 Αντιστοίχιση Μ.Κ.Υ με κλάσεις ταξινόμησης κατά αύξοντα αριθμό των κλάσεων	- 80 -
Πίνακας 9 Δείκτες Precision, Recall & F-Score για τις τρεις περιπτώσεις και υπόβαθρο καμένης έκτασης τη ταξινόμηση προηγούμενου κεφαλαίου	- 103 -
Πίνακας 10 Δείκτες Precision, Recall & F-Score για τις τρεις περιπτώσεις και υπόβαθρο καμένης έκτασης της υπηρεσίας Copernicus.....	- 103 -

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα αναπόσπαστο φαινόμενο της εξέλιξης των δασών και των δασικών εκτάσεων, καθώς αυτές αποτελούν μέρος του φυσικού κύκλου διαδοχής ή συντήρησης κάποιων τύπων βλάστησης. Στην περιοχή της Μεσογείου το φαινόμενο αυτό παρατηρείται πολύ πιο συχνά από όσο προβλέπεται από τη φύση των εκτάσεων αυτών. Αποτελούν φυσικές καταστροφές και ευθύνονται κάθε χρόνο για την απώλεια τεράστιων δασικών εκτάσεων, οι οποίες αποτελούν καταφύγιο για χιλιάδες είδη χλωρίδας και πανίδας. Ένα τέτοιο φαινόμενο, αποτελεί ένα ισχυρό ταρακούνημα για το οικοσύστημα μιας περιοχής και έχει άμεσες επιπτώσεις στο βιοτικό επίπεδο όλων. Τα δάση αποτελούν τους πνεύμονες της Γης και όχι μόνο. Είναι μια φυσική προστασία απέναντι στη κρίση της κλιματικής αλλαγής, στις πλημμύρες, στη διάβρωση του εδάφους και την εξαφάνιση ζώων και φυτών. Δυστυχώς, τα τελευταία χρόνια, όπου η κλιματική κρίση εντείνεται, το φαινόμενο των δασικών πυρκαγιών γίνεται πιο συχνό και καταστρεπτικό. Στην Ελλάδα, αυτό συνεπάγεται τεράστιες εκτάσεις φυσικής ομορφιάς να εξαφανίζονται, χερσαία ζώα, πτηνά και φυτά να πλήττονται ανεπανόρθωτα, την εν δυνάμει παρακμή του πρωτογενή τομέα, την απώλεια περιουσιών και υποδομών και τελικά έως και την απώλεια ανθρώπινων ζώων. Η δημιουργία ενός μηχανισμού πρόβλεψης και απότρευσης των πυρκαγιών και των επιπτώσεων τους είναι αναγκαίος, τώρα περισσότερο από ποτέ. Η χρήση τεχνολογικών μέσων όπως drones, δορυφόρων κ.α. και επιστημονικών πεδίων όπως η τηλεπισκόπηση, μπορεί να δημιουργήσουν το πεδίο για την μελέτη του φαινομένου και την εν μέρει πρόληψη του. Ένα ακόμα εργαλείο για την αντιμετώπιση των πυρκαγιών είναι τα μοντέλα και λογισμικά προσομοίωσης δασικών πυρκαγιών, όπως το Farsite, το FlamMap, το BehavePlus κ.α. Τα λογισμικά αυτά χρησιμοποιώντας δεδομένα και μοντέλα τα οποία θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας, προσομοιώνουν δασικές πυρκαγιές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό μοτίβων και πρακτικών που θα περιορίσουν σε μια ελεγχόμενη κατάσταση τις επιπτώσεις των πυρκαγιών.

1.2 Αντικείμενο της Μελέτης

Η εργασία αυτή έχει ως αντικείμενο την μελέτη της πυρκαγιάς της Β. Εύβοιας, που έλαβε χώρα τον Αύγουστο του 2021. Η Εύβοια στο σύνολο της πλήττεται διαχρονικά από το φαινόμενο των δασικών πυρκαγιών και πολλές φορές έχει βρεθεί αντιμέτωπη με τρομερές καταστροφές, όπως η συγκεκριμένη. Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη φύση έναρξης της πυρκαγιάς και τον τρόπο αντιμετώπισης της αλλά και η παραγωγή δεδομένων με σκοπό την λήψη μέτρων απότρευσης τέτοιων

καταστροφών μελλοντικά. Η προσομοίωση έγινε μέσω του λογισμικού FlamMap, ίσως το πιο διαδεδομένο λογισμικό προσομοίωσης παγκοσμίως. Χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες Landsat 8 και αντικειμενοστρεφή ανάλυση για τη ταξινόμηση και χαρτογράφηση της καύσιμης ύλης και τη παραγωγή των απαραίτητων δεδομένων. Επιπλέον, στο λογισμικό έγινε εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων, όπως και στοιχείων της πυρκαγιάς (ώρα και σημείο έναρξης κ.α.). Η μεθοδολογία παραγωγής των δεδομένων και η διαχείριση τους αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο.

1.3 Δομή της Εργασίας

Η εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια.

- ❖ Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στο αντικείμενο και τους στόχους της εργασίας
- ❖ Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, η οποία χρησιμοποιηθήκε σαν θεωρητικό υπόβαθρο για την διεκπεραίωση της εργασίας. Χωρίζεται σε τρεις βασικούς άξονες: Ο ένας αφορά το φαινόμενο των δασικών πυρκαγιών, ο άλλος την επιστήμη της Τηλεπισκόπησης και ο τρίτος τα μοντέλα προσομοίωσης συμπεριφοράς πυρκαγιών. Μέσα στο κεφάλαιο αυτό εμπεριέχονται επιπλέον πληροφορίες για τις δορυφορικές εικόνες και τους δορυφόρους Landsat, τα μοντέλα προσομοίωσης και κυρίως το μοντέλο του Rothermel, το οποίο αποτελεί τη βάση των λογισμικών προσομοίωσης και τον διαχωρισμό της βλάστησης σε Μοντέλα Καύσιμης Ύλης (M.K.Y.).
- ❖ Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση της περιοχής μελέτης και μια περιγραφή κάποιων βασικών στοιχείων της, όπως τα δημογραφικά στοιχεία, η γεωμορφολογία, η χλωρίδα και η πανίδα. Ακόμη παρουσιάζεται ένα ιστορικό πυρκαγιών αλλά και δεδομένα για τη πυρκαγιά μελέτης
- ❖ Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή και διαχείριση των απαραίτητων δεδομένων, θεματικών επιπέδων και χαρτών. Εκτός της δημιουργίας των απαραίτητων δεδομένων αναλύεται με λεπτομέρεια η διαδικασία που ακολουθήθηκε στο λογισμικό προσομοίωσης πυρκαγιάς και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων.
- ❖ Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα και η ακρίβεια τους και μερικά συμπεράσματα γύρω από αυτά.
- ❖ Το έκτο κεφάλαιο αναφέρεται στις προοπτικές και τα εργαλεία που μπορούν να αναπτυχθούν με τη χρήση των μεθόδων που ακολουθήθηκαν.
- ❖ Το έβδομο κεφάλαιο περιέχει την βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε χωρισμένη σε ελληνική, ξενόγλωσση και διαδικτυακή.

Κεφάλαιο 2. Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

2.1 Δασικές Πυρκαγιές

Οι δασικές εκτάσεις είναι ορισμένες σαν σύνολο μέσω του Συντάγματος της Ελλάδας. Συγκεκριμένα με το άρθρο 24:

- ❖ *Το οργανικό σύνολο άγριων φυτών με ξυλώδη κορμό πάνω στην αναγκαία επιφάνεια του εδάφους, τα οποία, μαζί με την εκεί συνυπάρχουσα χλωρίδα και πανίδα, αποτελούν μέσω της αμοιβαίας αλληλεξάρτησης και αλληλοεπίδρασής τους, ιδιαίτερη βιοκοινότητα (δασοβιοκοινότητα) και ιδιαίτερο φυσικό περιβάλλον (δασογενές). Δασική έκταση υπάρχει όταν στο παραπάνω σύνολο η άγρια ξυλώδης βλάστηση, υψηλή ή θαμνώδης, είναι αραιά.*

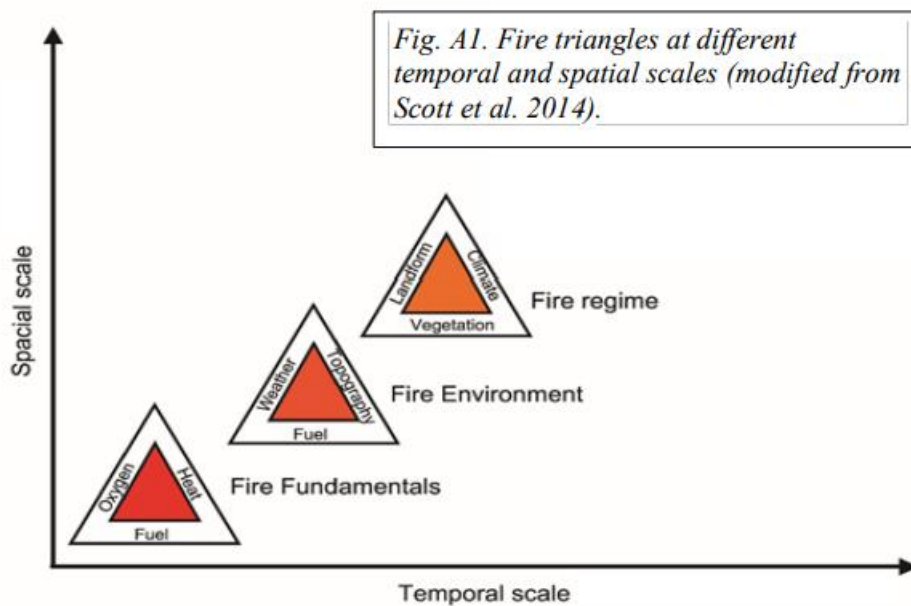
Και με το άρθρο 117:

- ❖ *Δημόσια ή ιδιωτικά δάση και δασικές εκτάσεις που καταστράφηκαν ή καταστρέφονται από πυρκαγιά ή που με άλλο τρόπο αποψιλώθηκαν ή αποψιλώνονται δεν αποβάλλουν για το λόγο αυτό το χαρακτήρα που είχαν πριν καταστραφούν, κηρύσσονται υποχρεωτικά αναδασωτέες και αποκλείεται να διατεθούν για άλλο προορισμό. (Εφημερίδα της Κυβερνήσεως 24/12/2019, Τεύχος Πρώτο, Αρ. Φύλλου 211)*

Κάθε χρόνο τέτοιες εκτάσεις, τόσο παγκοσμίως όσο και στον ελλαδικό χώρο καίγονται με υψηλή συχνότητα. Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα του φυσικού περιβάλλοντος. Οι επιπτώσεις τους είναι καταστροφικές, αφήνοντας πίσω ανθρώπινα και μη θύματα και τεράστια οικονομική και περιβαλλοντική ζημιά. Οι πυρκαγιές ωστόσο, αποτελούν και έναν φυσικό μηχανισμό αναγέννησης των δασών.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη δημιουργία των δασικών πυρκαγιών διακρίνονται σε ανθρώπινους (πυκνότητα οδικού δικτύου και κτισμάτων, απόσταση από πόλεις ή μη δασικές περιοχές κ.α.), βιοτικούς (χρήσεις γης) και αβιοτικούς (πυκνότητα λιμνών, ποταμιών, ρυακιών κ.α.). (Cardille et al 2001)

Για την έναρξη και την εξάπλωση μια πυρκαγιάς, χρειάζονται τρία βασικά στοιχεία στα οποία συνήθως αναφέρονται ως το «τρίγωνο της φωτιάς»: οξυγόνο, πηγή ανάφλεξης και καύσιμο. Σε τοπικό επίπεδο, τα τρία στοιχεία του τριγώνου της φωτιάς είναι πρώτον καιρικές συνθήκες, όπως ο άνεμος, η σχετική υγρασία και η θερμοκρασία του αέρα, η ύπαρξη νεφώσεων και η ηλιοφάνεια. Δεύτερον, η καύσιμη ύλη όπως οι πόες, τα χόρτα, οι μικροί και μεγάλοι θάμνοι και ο ξηροφυλλοτάπητας. Τρίτον οι τοπογραφικές συνθήκες της περιοχής, όπως η κλίση του εδάφους, το υψόμετρο και η έκθεση της πλαγιάς. (Claire M. Belcher et al. 2021)



Εικόνα 1: Το 'τρίγωνο της φωτιάς' σε διαφορετικές χρονικές και χωρικές κλίμακες (Claire M. Belcher et al. 2021)

Για να υπάρξει μια πυρκαγιά θα πρέπει να συνυπάρχουν και οι τρεις παράγοντες του τριγώνου, δηλαδή να υπάρχει καύσιμη ύλη, αρκετό οξυγόνο και θερμότητα.

Συγκεκριμένα, η καύσιμη ύλη στις δασικές πυρκαγιές διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες:

- ❖ Στην υπεδάφια καύσιμη ύλη που περιλαμβάνει την σε αποσύνθεση οργανική ύλη όπως ο χούμος, η τύρφη και οι νεκρές ρίζες.
- ❖ Στην καύσιμη ύλη επί του εδάφους μέχρι ύψους 2 μέτρων από αυτό που περιλαμβάνει τον ξηροτάπητα (πεσμένα φύλλα και βελόνες), την πόωδη βλάστηση (το καλοκαίρι βρίσκεται συνήθως σε ξερή κατάσταση), τους θάμνους, τα πεσμένα δένδρα, τα υπολείμματα των υλοτομιών, τα φρύγανα κλπ.
- ❖ Στην εναέρια καύσιμη ύλη που περιλαμβάνει τα καύσιμα υλικά που βρίσκονται πάνω από τα 2 μέτρα από το έδαφος όπως το φύλλωμα και τα λεπτά κλαδιά των δένδρων (κύρια των κωνοφόρων), οι λειχήνες, τα αναρριχόμενα φυτά, τα όρθια νεκρά δένδρα κλπ.

Το οξυγόνο υπάρχει στον ατμοσφαιρικό αέρα και μάλιστα σε αναλογία 21% κατ' όγκο ή 23% κατά βάρος.

Η θερμότητα που απαιτείται για την έναρξη της πυρκαγιάς (ανάφλεξη). Η θερμότητα αυτή μπορεί να αποδοθεί με πολλούς τρόπους που αποτελούν και τις αιτίες έναρξης των δασικών πυρκαγιών, οι οποίες είναι:

- ❖ *Πυρκαγιές από κεραυνούς.* Αυτές αποτελούν ένα πολύ μικρό ποσοστό των πυρκαγιών των δασών. Συνήθως δεν εξαπλώνονται, γιατί στις περισσότερες περιπτώσεις ακολουθεί βροχή η οποία σβήνει την πυρκαγιά. Εάν όμως δεν ακολουθήσει βροχή, προκαλούν καταστροφικές πυρκαγιές, γιατί οι κεραυνοί πέφτουν κυρίως σε ανώμαλες ή απόκρημνες περιοχές που είναι απρόσιτες ή τόσο δύσβατες, ώστε να μεσολαβεί πολύς χρόνος από την έναρξη της πυρκαγιάς μέχρι την έναρξη της καταστολής.
- ❖ *Πυρκαγιές από εμπρησμούς από αμέλεια.* Εδώ θα μπορούσαμε να κατατάξουμε την απόρριψη αναμμένου τσιγάρου, την καύση των καλαμιών των αγρών ή το κάψιμο ξερών χόρτων, κλαδιών κλπ., τις βολές του πυροβολικού και των λοιπών όπλων των Ενόπλων Δυνάμεων, από τις εξατμίσεις των αυτοκινήτων, τα καλώδια μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος, το κάψιμο των σκουπιδιών, τις σπίθες που πετάνε οι σιδηροδρομικές γραμμές κ.α.
- ❖ *Πυρκαγιές από εμπρησμούς από πρόθεση.* Με πολλούς τρόπους και επινοήσεις για την δημιουργία βοσκοτόπων ή χωραφιών, ή το χειρότερο για οικοπεδοποίηση (σε περιοχές που η αξία της γης είναι μεγάλη). Στην κατηγορία αυτή οφείλονται πολλές από τις πιο καταστροφικές πυρκαγιές γιατί συνήθως οι εμπρηστές λαμβάνουν μέτρα και επιλέγουν ημέρες που ευνοούν την γρήγορη και μεγάλη εξάπλωσή τους. (Πύραρχος Διονύσιος Βορίσης, 2010)



Εικόνα 2 Πυρκαγιά από κερανό



Εικόνα 3 Φωτιά από τσιγάρο



Εικόνα 4 Φωτιά από καύση απορριμμάτων



Εικόνα 5 Φωτιά από εμπρησμό



Εικόνα 6 Φωτιά από σιδηρόδρομο



Εικόνα 7 Φωτιά κατασκηνωτών



Εικόνα 8 Φωτιά από βλάβη ηλεκτρικού δικτύου



Εικόνα 9 Αυτανάφλεξη σε σκουπιδότοπο

Το μεγαλύτερο ποσοστό των δασικών πυρκαγιών συμβαίνει κυρίως τους καλοκαιρινούς και πρώτους φθινοπωρινούς μήνες, δηλαδή από αρχές Ιουνίου μέχρι και το τέλος του Οκτωβρίου. Το υπόλοιπο διάστημα του χρόνου θεωρείται σπάνιο φαινόμενο. Συχνότερες ώρες έναρξης έχουμε από τις 08:00 το πρωί έως και τις 23:00 το βράδυ, με μεγαλύτερη έμφαση στις μεσημεριανές ώρες, κυρίως 14:00 και 15:00. Ελάχιστες ενδείξεις για έναρξη πυρκαγιάς υπάρχουν τις πρώτες πρωινές ώρες ή και το βράδυ. Στο παράδειγμα του ελληνικού χώρου, αυτό είναι απολύτως λογικό, αφού οι καλοκαιρινές κυρίως, μεσημεριανές ώρες ενδείκνυνται λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, των ριπών ανέμων και της χαμηλής υγρασίας. Αντιθέτως, οι βραδινές και πρώτες πρωινές ώρες, χαρακτηρίζονται συνήθως από χαμηλότερες θερμοκρασίες, ακόμα και το καλοκαίρι, και άπνοια.

2.1.1 Ανατομία Πυρκαγιάς

Σε ορισμένες περιπτώσεις οι πυρκαγιές εξαπλώνονται προς τα έξω με τον ίδιο ρυθμό προς όλες τις κατευθύνσεις και παίρνουν κυκλική μορφή, αλλά επειδή τις περισσότερες φορές επηρεάζονται από τον άνεμο και τις αλλαγές στην τοπογραφία ή τα καύσιμα και γίνονται ακανόνιστες ή επιμηκύνονται, είναι χρήσιμο να δίνονται ονόματα στα διάφορα μέρη και στους διάφορους τομείς.

Η ζώνη στην οποία η φωτιά έχει τη μεγαλύτερη εξέλιξη περιγράφεται ως η κεφαλή ή ως η κυρίως κεφαλή αλλά αν υπάρχει σημαντική δράση σε αρκετά σημεία ταυτόχρονα μπορεί να ειπωθεί ότι μια φωτιά έχει αρκετές κεφαλές ή «δακτύλους» ή ότι σχηματίζει δακτύλους

και θύλακες. Η «ουρά», πίσω ή ραχιαία φωτιά είναι το κομμάτι εκείνο που καίει πίσω αργά, συνήθως αντίθετα προς τη φορά του ανέμου, αλλά μερικές φορές και κατηφορικά ή περιέχει λιγότερο εύφλεκτες καύσιμες ύλες. Οι πλευρικές ή πλάγιες φωτιές κινούνται προς τις δεξιές γωνίες στην κατεύθυνση της κεφαλής της φωτιάς, αλλά με πιο αργούς ρυθμούς από την κεφαλή. Διασώσεις είναι εκτάσεις μέσα στην περίμετρο της πυρκαγιάς οι οποίες δεν κάηκαν. Ψευδομέτωπα (σημειακές φωτιές) είναι οι πυρκαγιές που προκαλούνται μπροστά από το κυρίως μέτωπο της πυρκαγιάς εξαιτίας του φαινομένου της κηλίδωσης (Rothermel 1983, Alexander 2000).



Εικόνα 10 Ανατομία μιας δασικής πυρκαγιάς (Alexander, 2000)

2.1.2 Εξάπλωση Πυρκαγιάς

Οι πυρκαγιές εμφανίζονται κυρίως στην ύπαιθρο ή σε αγροτικές περιοχές τυχαία και απρόβλεπτα. Ακριβώς επειδή οι επιπτώσεις τους είναι καταστροφικές τόσο σε οικονομικό αλλά και περιβαλλοντικό επίπεδο, ακόμα και με ανθρώπινες απώλειες, τα χαρακτηριστικά τους και η προσπάθεια αποφυγής της εξάπλωσης τους τραβά τη μέγιστη προσοχή της κοινότητας προστασίας από πυρκαγιές. Η ακριβής πρόβλεψη της εξάπλωσης μια πυρκαγιάς μπορεί να είναι βοηθητική στην ανάπτυξη ενός σχεδιασμού ελέγχου της, ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος. Ωστόσο, η πρόβλεψη που βασίζεται σε εμπειρική γνώση εξακολουθεί να παίζει σημαντικό ρόλο στην πρόληψη πυρκαγιών στις μέρες μας, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες. (Chunjie Zhai et al., 2022)

Οι πυρκαγιές εξαπλώνονται μεταφέροντας θερμική ενέργεια με τρεις τρόπους: Ακτινοβολία, Μεταγωγή και Αγωγή. Η ακτινοβολία αναφέρεται στην εκπομπή ενέργειας σε ακτίνες ή κύματα, ενώ η θερμότητα κινείται στο χώρο ως ενεργειακά κύματα. Ταξιδεύει σε ευθείες γραμμές με την ταχύτητα του φωτός και αυτός είναι ο λόγος που όταν αντιμετωπίζεις τη φωτιά ζεσταίνεται μόνο το μπροστινό μέρος. Η γη θερμαίνεται από τον ήλιο μέσω της ακτινοβολίας που αυτός εκπέμπει. Το μεγαλύτερο μέρος της προθέρμανσης των καυσίμων πριν από μια πυρκαγιά γίνεται από την ακτινοβολία θερμότητας από τη

φωτιά. Καθώς το μέτωπο της φωτιάς πλησιάζει, η ποσότητα της λαμβανόμενης ακτινοβολούμενης θερμότητας αυξάνεται.

Μεταγωγή είναι η μεταφορά θερμότητας με τη φυσική κίνηση θερμών μαζών αέρα. Καθώς ο αέρας θερμαίνεται, διαστέλλεται, όπως και όλα τα αντικείμενα. Καθώς διαστέλλεται, γίνεται ελαφρύτερος από τον περιβάλλοντα αέρα και ανεβαίνει. Ο ψυχρότερος αέρας εισέρχεται ορμητικά από τα πλάγια, ο οποίος θερμαίνεται με τη σειρά του και ανεβαίνει και αυτός. Σύντομα σχηματίζεται μια στήλη μεταφοράς πάνω από τη φωτιά, η οποία φαίνεται από τον καπνό που μεταφέρεται ψηλά σε αυτήν. Αυτό το ρεύμα ψυχρότερου αέρα από το πλάι βοηθά στην παροχή πρόσθετου οξυγόνου για τη συνέχιση της διαδικασίας καύσης.

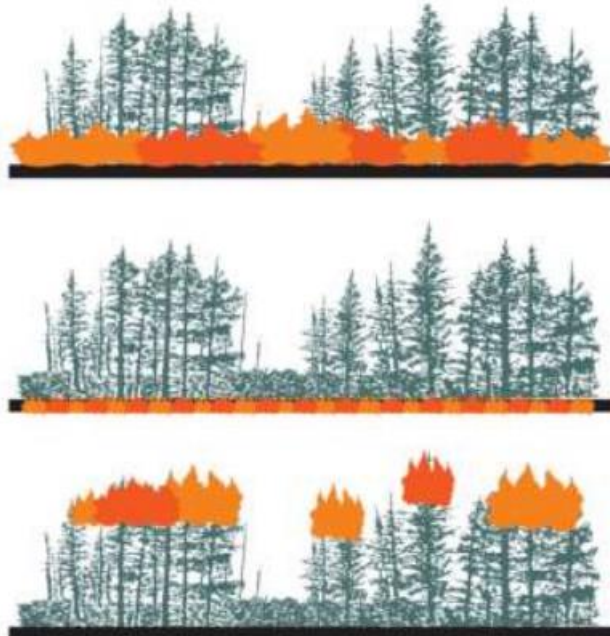
Η αγωγιμότητα είναι η μεταφορά θερμότητας μέσα στο ίδιο το υλικό. Τα περισσότερα μέταλλα είναι καλοί αγωγοί θερμότητας, ενώ το ξύλο είναι πολύ κακός αγωγός, επομένως μεταδίδει τη θερμότητα πολύ αργά. Έτσι προκύπτει πως η αγωγιμότητα δεν είναι σημαντικός παράγοντας για την εξάπλωση των δασικών πυρκαγιών. (Auburn University, Radiation Exchanges Between Surfaces, 2022)

2.1.3 Είδη Δασικών Πυρκαγιών

Τα είδη των δασικών πυρκαγιών χωρίζονται ανάλογα με τη κατηγορία της καύσιμης ύλης. Αυτά είναι:

- ❖ *Πυρκαγιές Εδάφους.* Σε αυτές καίγεται η οργανική ύλη κάτω από την επιφάνεια του φυλλοστρώματος του δάσους. Έχουν σαν κύριο χαρακτηριστικό η βραδεία καύση και είναι δυνατόν να μην έχουμε παραγωγή καπνού, οπότε γίνονται πολύ δύσκολα αντιληπτές, συνήθως ὄμως αργά ή γρήγορα προκαλούν την επόμενη κατηγορία των επιφανειακών πυρκαγιών, γιατί εφ' όσον υπάρχει βλάστηση η φωτιά μεταδίδεται σ' αυτή. Οι πυρκαγιές αυτές μπορεί να διεισδύουν σε βάθος έως και 2 μέτρα εξαπλώνονται αργά και είναι από τις πιο δύσκολες στην κατάσβεση. Ευτυχώς οι πυρκαγιές αυτού του είδους είναι σπάνιες στην Ελλάδα και συναντώνται κύρια στα επιφανειακά κοιτάσματα τύρφης.
- ❖ *Πυρκαγιές Επιφάνειας ή Έρπουσες.* Σ' αυτές καίγεται ο ξηροτάπητας, η χαμηλή βλάστηση κλπ. Αποτελούν το συνηθέστερο είδος δασικής πυρκαγιάς και από αυτές προέρχεται το επόμενο είδος δασικών πυρκαγιών οι πυρκαγιές κόμης. Χαρακτηριστικά τους είναι η έως μεγάλη ταχύτητα διάδοσης (ιδίως όταν πνέει άνεμος) με φλόγα και θερμότητα. Ο καπνός τους εξαπλώνεται συνήθως μέχρι το ύψος των δένδρων και έχει σχετικά ανοικτό χρώμα.
- ❖ *Πυρκαγιές Κόμης ή Επικόρυφες.* Σ' αυτές καίγεται η κόμη των δένδρων. Είναι από τις πιο καταστροφικές γιατί μπορεί να προκαλέσουν την καταστροφή μεγάλων δασών, συνήθως οι επικόρυφες πυρκαγιές.
- ❖ *Μικτές Πυρκαγιές.* Τα τρία παραπάνω είδη δασικών πυρκαγιών είναι δυνατόν να συνυπάρχουν, γιατί το καθένα καταναλώνει μια διαφορετική κατηγορία

καύσιμης ύλης. Όταν συνυπάρχει επικόρυφη και έρπουσα πυρκαγιά τότε δημιουργείται ένα μέτωπο φλογών που επεκτείνεται από το έδαφος έως μερικά μέτρα πάνω από τις κορυφές των δένδρων που κινείται σαρώνοντας την υπάρχουσα βλάστηση. (Πύραρχος Διονύσιος Βορίσης, 2010)



Εικόνα 11 Πυρκαγιές Επιφάνειας, Εδάφους και Κόμης (Griffith, 2004)

2.1.4 Παράγοντες που επηρεάζουν μια δασική πυρκαγιά

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα σύνθετο φαινόμενο και επηρεάζονται από πληθώρα παραγόντων με τους κυριότερους να είναι η τοπογραφία, η καύσιμη ύλη και τα μετεωρολογικά δεδομένα μιας περιοχής. (Ηλιόπουλος, 2013)

Τοπογραφία

Το υψόμετρο και ο προσανατολισμός (έκθεση) του τοπίου είναι σπουδαίοι παράγοντες για τον κίνδυνο των πυρκαγιών, επειδή και οι δύο αυτοί παράγοντες επιδρούν στην περιεκτικότητα σε υγρασία των ελαφρότερων καυσίμων δασικών υλών. Όσο αυξάνει το υψόμετρο αυξάνει η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και μεταβάλλεται η διαμόρφωση της βλάστησης. Υπάρχουν χαμηλότερες θερμοκρασίες στα μεγαλύτερα υψόμετρα, άρα και μικρότερη απώλεια υγρασίας στην καύσιμη ύλη και μεγαλύτερη βροχόπτωση (Velez 2000). Οι νότιες εκθέσεις είναι ξηρότερες από τις βόρειες. Η δασική ύλη ξεραινεται ταχύτερα στις νότιες, νοτιοδυτικές και δυτικές πλαγιές, παρά σε πλαγιές άλλων εκθέσεων. Όμως οι ξηρές νότιες - δυτικές πλαγιές έχουν γενικά λιγότερη βλάστηση, έτσι ώστε και οι πυρκαγιές εκεί είναι μικρότερες από αυτές των βορείων εκθέσεων (Pyne et al. 1996, Velez 2000).

Η τοπογραφική διαμόρφωση παίζει επίσης σπουδαίο ρόλο στην εξάπλωση των πυρκαγιών, ιδίως σε ορεινές περιοχές όπως είναι η χώρα μας. Η κλίση επιδρά στην ταχύτητα

εξάπλωσης. Όσο πιο απότομη είναι η κλίση και μεγαλύτερο το υψόμετρο, τόσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου. Ο άνεμος, λόγω της εκθετικής σχέσης του με το ύψος, όταν συναντήσει ένα ορεινό εμπόδιο επιταχύνεται στην κορυφή και επιβραδύνεται στους πρόποδες. (Viegas 2006) Όταν ευσταθής αέρας πνέει κάθετα σε έναν ορεινό όγκο, η κυκλοφορία στην υπήνεμη πλευρά είναι στροβιλώδης με αναταράξεις που είναι πιθανό να είναι ισχυρές. Έτσι η ταχύτητα εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς είναι μεγαλύτερη προς τα ανάντη και μικρότερη προς τα κατόντη και ακόμη μικρότερη σε επίπεδα εδάφη. Η ταχύτητα εξάπλωσης είναι μεγαλύτερη προς τα ανάντη γιατί η υπερκείμενη καιγόμενη ύλη βρίσκεται πιο κοντά στις φλόγες και δέχεται μεγαλύτερη ποσότητα ακτινοβολούμενης θερμότητας. (Schroeder and Buck, 1970)

Η τοπογραφία μιας περιοχής είναι δυνατό να επηρεάσει τη διεύθυνση του πνέοντος ανέμου. Σε αυτή την περίπτωση η αλλαγή της διεύθυνση του ανέμου έχει σημασία και σε συνδυασμό με την επίδραση της ταχύτητας του ανέμου με αυτήν της τοπογραφίας είναι δυνατό να δημιουργήσουν εξαιρετικά απρόσμενες συνθήκες. Επιπροσθέτως, οι αλλαγές της διεύθυνσης του ανέμου λόγω της τοπογραφίας είναι δυνατό να μεταβάλλουν την κατεύθυνση του μετώπου μιας πυρκαγιάς αυξάνοντας τους κινδύνους στις δυνάμεις δασοπυρόσβεσης. Ένα σημείο το οποίο πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα είναι το φαινόμενο της «καμινάδας» κατά το οποίο έχουμε μια χαράδρωση με φορά του ανέμου από την είσοδο της προς τις κορυφές. Τυχόν πυρκαγιά που θα ξεσπάσει στην είσοδο της χαράδρας μεταδίδεται με εξαιρετικά μεγάλες ταχύτητες και είναι δυνατόν να εγκλωβίσει το προσωπικό. (Ηλιόπουλος, 2013)

Επίσης, ειδικές τοπογραφικές διαμορφώσεις όπως κορυφογραμμές, κοιλάδες ανάμεσα σε δύο κορυφογραμμές (διάσελα) μπορούν να δημιουργήσουν τοπικά επιτάχυνση της κίνησης του ανέμου κατά ένα ή και περισσότερους βαθμούς της κλίμακας του Beaufort. (Pyne et al. 1996)

Μετεωρολογικοί Παράγοντες

Οι κυριότεροι μετεωρολογικοί παράγοντες που επιδρούν στην έναρξη και εξάπλωση των δασικών πυρκαγιών είναι η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία του αέρα, το ύψος της βροχής και ο άνεμος. Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι κανένας μετεωρολογικός παράγοντας δεν δρα μόνος του, αλλά αποφασιστικής σημασίας είναι ο συνδυασμός τους έτσι ώστε να δημιουργηθεί το κατάλληλο περιβάλλον για την έναρξη και εξάπλωση της πυρκαγιάς.

Η θερμοκρασία του αέρα έχει άμεση επίδραση στις δασικές πυρκαγιές, γιατί συντελεί στην ξήρανση και προθέρμανση της καύσιμης ύλης.

Η σχετική υγρασία του αέρα είναι ο λόγος της μάζας των υπαρχόντων στον αέρα υδρατμών προς την μάζα των υδρατμών που απαιτούνται για να γίνει ο αέρας κορεσμένος στην συγκεκριμένη θερμοκρασία επί εκατό. Όταν η σχετική υγρασία του αέρα είναι

χαμηλή, τότε η βλάστηση ξηραίνεται έντονα, ιδίως με την ταυτόχρονη επίδραση του ανέμου (χαμηλή σχετική υγρασία έχουμε το μεσημέρι). Όταν όμως υπάρχει υψηλή σχετική υγρασία του αέρα, έχουμε σαν επακόλουθο την αύξηση της υγρασίας που περιέχεται στις καύσιμες ύλες (υψηλή σχετική υγρασία έχουμε νωρίς το πρωί). Κατά γενικό κανόνα, όταν η σχετική υγρασία του αέρα είναι 50 – 55 %, ελάχιστες πυρκαγιές συμβαίνουν και αυτές που ανάβουν δεν επεκτείνονται, ιδιαίτερα όταν έχουμε μικρή ταχύτητα ανέμου.

Το ύψος των βροχοπτώσεων επιδρά άμεσα στην περιεχόμενη στα καύσιμα υλικά υγρασία. Μεγάλη σημασία έχει το χρονικό διάστημα που έχουμε βροχόπτωση. Δυστυχώς στη χώρα μας το καλοκαίρι και μεγάλο μέρος του φθινοπώρου είναι χωρίς βροχές, με αποτέλεσμα την έντονη ξήρανση της βλάστησης.

Ο άνεμος ασκεί σοβαρή επίδραση στις δασικές πυρκαγιές, γιατί αφ' ενός προσδιορίζει τη διεύθυνση διάδοσης της φωτιάς και αφ' ετέρου την ταχύτητα εξάπλωσής της. Ο άνεμος όταν είναι ξηρός συντελεί στην ξήρανση της καύσιμης ύλης. Το κύριο χαρακτηριστικό των ανέμων που πνέουν το καλοκαίρι είναι ότι συνήθως τη νύχτα και ιδιαίτερα τις πρωινές ώρες καταπαύουν ή πάντως η σφοδρότητά τους ελαττώνεται με αποτέλεσμα να είναι ευκολότερη η κατάσβεση των πυρκαγιών. Επίσης ο άνεμος σε συνδυασμό με τα ανοδικά ρεύματα που δημιουργούνται από την πυρκαγιά, προκαλεί την εμφάνιση του φαινομένου της «κηλίδωσης». «Κηλίδωση» είναι η μεταφορά αναμμένων τεμαχίων καύσιμης ύλης σε αποστάσεις συνήθως μέχρι 100 μέτρα και σε σπάνιες περιπτώσεις μέχρι 800 μέτρα περίπου με αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων εστιών μπροστά από το κύριο μέτωπο της πυρκαγιάς. (Πύραρχος Διονύσιος Βορίσης, 2010)

Καύσιμη Ύλη

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η καύσιμη ύλη χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες. Την υπεδάφια καύσιμη ύλη, την καύσιμη ύλη επί εδάφους και την εναέρια καύσιμη ύλη. Οι βασικές καύσιμες ύλες οι οποίες είναι σημαντικές, διότι αποτελούν καύσιμη ύλη στο πέρασμα της πυρκαγιάς, είναι τα φύλλα, τα κλαδιά, ο φλοιός δέντρων, μικρά κλαριά πεσμένα στο δάσος και τα φυσικά καύσιμα που βρίσκονται στους βοσκότοπους. Αυτό συμβαίνει διότι η λεπτότερη καύσιμη ύλη κατά κανόνα ελέγχει τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς. (Pyne et al. 1996) Η συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς επηρεάζεται επίσης από την ποσότητα και την ποιότητα της βλάστησης. (Pyne et al. 1996)

Θα πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι όλη η δασική βιομάζα δεν αποτελεί καύσιμη ύλη στο πέρασμα της φωτιάς, και περιοχές με τα ίδια είδη βλάστησης μπορούν να έχουν διαφορετική συμπεριφορά πυρκαγιάς διότι είναι δυνατό να παρουσιάζουν διαφορές στη περιεχόμενη υγρασία, στη χημική σύσταση, στη ποσότητα, στο μέγεθος, στο σχήμα, στη συνέχεια και στη πυκνότητα της βλάστησης. (Ηλιόπουλος, 2013)

Στα δάση γενικά η ποσότητα της καύσιμης ύλης μεταβάλλεται με το χρόνο. Όσο πιο ομοιόμορφη και συνεχόμενη (κλιμακωτή) κατανομή της καύσιμης ύλης υπάρχει τόσο

μεγαλύτερη και γρηγορότερη ανάφλεξη και πλήρης καύση αναμένεται, ενώ τα πολλά διάκενα στη βλάστηση διαφοροποιούν την ταχύτητα εξάπλωσης και την ένταση μιας πυρκαγιάς. Επίσης σε ένα πολύ συμπαγές πεδίο καύσιμης ύλης η κακή κυκλοφορία του αέρα δυσκολεύει την ανάφλεξη και δεν ευνοεί την καύση. (Σταμπουλίδης, 2017)

Στην προσπάθεια κατηγοριοποίησης των φυσικοχημικών ιδιοτήτων της καύσιμης ύλης όπως αυτές αντιδρούν στην πυρκαγιά δημιουργήθηκαν τα μοντέλα καύσιμης ύλης, τα οποία είναι αποδεκτά από τα μοντέλα προσομοίωσης της συμπεριφοράς της φωτιάς. Μοντέλο καύσιμης ύλης είναι οι μέσες τιμές που αντιπροσωπεύουν τις φυσικοχημικές παραμέτρους της βλάστησης, με τέτοιο τρόπο που δύνανται να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα στα μαθηματικά και υπολογιστικά μοντέλα διάδοσης της πυρκαγιάς (π.χ. FARSITE, BehavePlus, FlamMap). Ένα μοντέλο καύσιμης ύλης αντιπροσωπεύει την καύσιμη ύλη και όχι τον τύπο βλάστησης. Έτσι, πολλοί τύποι βλάστησης που ως καύσιμη ύλη έχουν παρόμοια ή ισοδύναμα χαρακτηριστικά αντιπροσωπεύονται από το ίδιο μοντέλο. (Ηλιόπουλος, 2013)

2.2 Τηλεπισκόπηση

Τηλεπισκόπηση είναι η επιστήμη και τεχνική που εξετάζει τις αρχές, μεθόδους, όργανα και συστήματα με τα οποία επιτυγχάνεται η εκ του μακρόθεν συλλογή, επεξεργασία, ανάλυση και ερμηνεία πληροφοριών που σχετίζονται με συγκεκριμένες ιδιότητες αντικειμένων ή φαινομένων. (Αργιαλάς, 1999)

Στην πράξη χρησιμοποιούμε τα επιτεύγματα της τηλεπισκόπησης τόσο στην καθημερινή μας ζωή όσο και σε πολύ εξειδικευμένα πεδία επιστημών. Το Κτηματολόγιο υλοποιείται με τις πληροφορίες που λαμβάνονται από αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες, η καθημερινή πρόγνωση του καιρού γίνεται αξιοποιώντας δεδομένα από μετεωρολογικούς δορυφόρους, η παγκόσμια κλιματική αλλαγή τεκμηριώνεται με τη χρήση δορυφόρων που παρακολουθούν τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του πλανήτη, το βαρυτικό πεδίο της Γης χαρτογραφείται με εξειδικευμένα δορυφορικά ζεύγη κ.ά. Η παρατήρηση της επιφάνειας της Γης είναι δυνατή με τη χρήση ψηφιακών σαρωτών (τηλεπισκοπικών ανιχνευτών) που ανιχνεύουν την ανάκλαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας της γήινης επιφάνειας και την αποδίδουν ως ψηφιακή εικόνα. Οι σαρωτές μπορεί να είναι εγκατεστημένοι σε τεχνητούς δορυφόρους που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη ή να βρίσκονται σε αερομεταφερόμενα μέσα (αεροσκάφη, ελικόπτερα). Ένα διαστημικό όχημα μπορεί να μεταφέρει περισσότερους από ένα ανιχνευτές, έτσι πολλές φορές προκαλείται σύγχυση μεταξύ οχήματος και σαρωτή. (Wikipedia, 2023)

Στο αντικείμενο των δασικών πυρκαγιών η Τηλεπισκόπηση αξιοποιείται με τη δημιουργία χρήσιμων χαρτών καθώς πέρα από τη δυνατότητα χαρτογράφησης με μεγάλη ακρίβεια της έκτασης των καμένων δασικών εκτάσεων, παρέχει δυνατότητες όπως αξιοποίηση των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής ενδιαφέροντος, πληροφορίες για τη

βλάστηση στη περιοχή όπως περιεχόμενη υγρασία, καλύψεις και χρήσεις γης κλπ. Επιπλέον, τις πληροφορίες αυτές μας παρέχει η τηλεπισκόπηση είτε σε τωρινό χρόνο ή σε επιλεγμένες παρελθούσες στιγμές, γεγονός που μας δίνει τη δυνατότητα αφενός να δημιουργούμε πιο ακριβείς αποτυπώσεις της φυσικής και κοινωνικοοικονομικής πραγματικότητας και αφετέρου να καταγράφουμε με ακρίβεια τις μεταβολές διαμέσου του χρόνου. (Ντίνης, 2022)

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, η τηλεπισκόπηση είναι αναπόσπαστο κομμάτι. Μέσω της αντικειμενοστρεφούς ανάλυσης και ταξινόμησης δορυφορικών εικόνων δημιουργούνται οι χάρτες καύσιμης ύλης, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την προσομοίωση της πυρκαγιάς που μελετάται.

2.2.1 Δορυφορικές εικόνες

Για τις ανάγκες αυτής της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες Landsat 8. Η χρήση των εικόνων αυτών έγινε για τη φωτοερμηνευτική μελέτη της περιοχής και τη ταξινόμηση της βλάστησης της. Ακόμη, χρησιμοποιήθηκαν ώστε να εξαχθούν γεωμορφολογικές πληροφορίες όπως η κλίση. Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους και κόπηκαν στη περιοχή μελέτης για ευκολία στη χρήση τους.

Δορυφόροι Landsat

Στα μέσα της δεκαετίας του 1960 η NASA ανέλαβε τη πρωτοβουλία για τη δημιουργία και την εκτόξευση του πρώτου δορυφόρου παρακολούθησης της Γης σύμφωνα με τις ανάγκες των επιστημόνων. Η Γεωγραφική Υπηρεσία των Η.Π.Α (U.S.G.S) ξεκίνησε τη συνεργασία της με τη NASA στις αρχές της δεκαετίας του 1970 ώστε να αναλάβουν την ευθύνη για την αρχειοθέτηση δεδομένων και την διανομή τους. Στις 23/7/1972 η πρώτη σειρά δορυφόρων, σχεδιασμένοι να αποδίδουν συνεχόμενη παγκόσμια κάλυψη, εκτοξεύτηκε στο διάστημα. Το όνομα τους τότε ήταν “Earth Resources Technology Satellite-A” (“ERTS-A”). (USGS, A Brief History of Landsat Data, 1997)

Ο πρώτος ERTS δορυφόρος ονομάστηκε Landsat-1 και από το 1972 μέχρι και σήμερα έχουν εκτοξευθεί άλλοι 8 δορυφόροι Landsat με τον Landsat- 9 να είναι ο τελευταίος (Σεπτέμβριος 2021).

Οι τηλεπισκοπικοί δείκτες των δορυφόρων Landsat διαχρονικά είναι:

- ❖ Return Beam Vidicom (RBV) – Landsat 1, 2, 3
- ❖ Multi Spectral Scanner (MSS) – Landsat 1, 2, 3, 4, 5
- ❖ Thematic Mapper (TM) – Landsat 4, 5
- ❖ Enhanced Thematic Mapper (ETM) – Landsat 6, 7
- ❖ Operational Land Imager (OLI) – Landsat 8
- ❖ Thermal Infrared Sensor (TIRS) – Landsat 8
- ❖ Operational Land Imager 2 (OLI-2) – Landsat 9
- ❖ Thermal Infrared Sensor 2 (TIRS-2) – Landsat 9

Πίνακας 1 Ιστορικά και τεχνικά χαρακτηριστικά δορυφόρων Landsat (Φράγκου, 2016, USGS, Landsat 8, 2013, USGS, Landsat 9, 2021)

Δορυφόρος	Ημερομηνία Εκτόξευσης	Τέλος Αποστολής	Ύψος Πτήσης (Km)	Γωνία (°)	Κύκλος Τροχιάς (Ημέρες)	Τηλεπισκοπικοί Δείκτες
Landsat 1	23/07/1972	06/01/1978	907	99,2	18	RBV, MSS
Landsat 2	22/01/1975	05/06/1982	908	99,2	18	RBV, MSS
Landsat 3	05/03/1978	07/01/1983	915	99,2	18	RBV, MSS
Landsat 4	16/07/1982	Τέλη 1993	705	98,2	16	MSS, TM
Landsat 5	01/03/1984	05/06/2013	705	98,2	16	MSS, TM
Landsat 6	05/10/1993	Απέτυχε	-	-	-	-
Landsat 7	15/04/1999	Σήμερα	705	98,2	16	ETM+
Landsat 8	11/02/2013	Σήμερα	701	98,2	16	OLI, TIRS
Landsat 9	27/09/2021	Σήμερα	705	98,2	16	OLI-2, TIRS-2

Όπως γίνεται κατανοητό η εκτόξευση του Landsat 9 έγινε μετά το πέρας της πυρκαγιάς, οπότε ο δορυφόρος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο Landsat 8. Οι δείκτες που χρησιμοποιεί ο δορυφόρος αυτός όργανα καταγραφής είναι ο Operational Land Imager (OLI) και ο Thermal Infrared Sensor (TIRS).

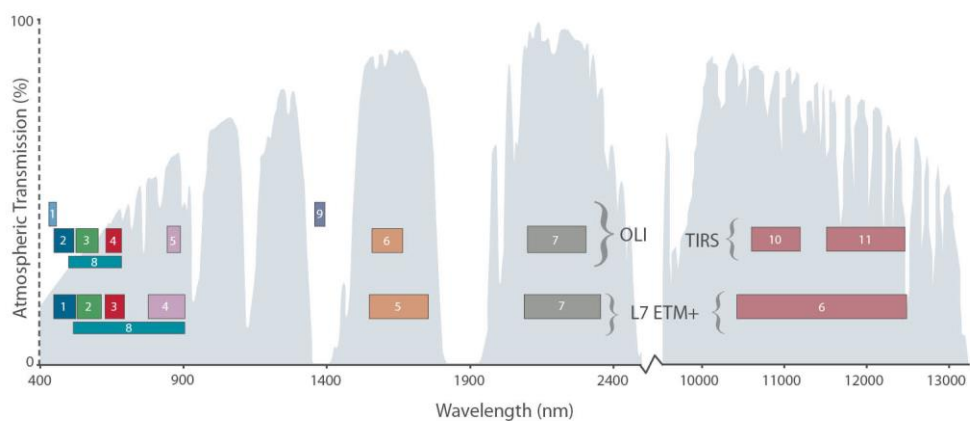
Αυτοί οι δύο αισθητήρες παρέχουν εποχιακή κάλυψη της παγκόσμιας ξηράς σε χωρική ανάλυση 30 μέτρων για τα κανάλια που βρίσκονται στο ορατό, κοντινό υπέρυθρο και μέσο υπέρυθρο, 100 μέτρων για τα θερμικά κανάλια και 15 μέτρων για το παγχρωματικό κανάλι. Ο αισθητήρας OLI συλλέγει δεδομένα στο ορατό κοντινό υπέρυθρο, μικροκυματικό υπέρυθρο, καθώς και στο παγχρωματικό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Τέλος, ο αισθητήρας OLI παρέχει δύο νέες φασματικές ζώνες, μία προσαρμοσμένη ειδικά για την ανίχνευση νεφών (Κανάλι 9) και μια για την παρατήρηση της παράκτιας ζώνης (Κανάλι 1). Όσον αφορά τον αισθητήρα TIRS, συλλέγει δεδομένα σε 2 φασματικά κανάλια στο τμήμα του θερμικού υπέρυθρου, σε αντίθεση με τους προηγούμενους δορυφόρους του προγράμματος Landsat στους οποίους υπήρχε μόνο 1 φασματικό κανάλι στο συγκεκριμένο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. (Φράγκου, 2016)

Η ραδιομετρική ανάλυση σχετίζεται με το πόσες πληροφορίες γίνονται αντιληπτές από τον αισθητήρα ενός δορυφόρου. Ενώ το ανθρώπινο μάτι ανιχνεύει το χρώμα, οι αισθητήρες Landsat μετρούν την ενέργεια που αντανακλάται ή εκπέμπεται από τη γη και μεταδίδουν αυτές τις πληροφορίες ως εικόνα στους χρήστες σε διάφορους βαθμούς της κλίμακας του γκρι. Όσο υψηλότερη είναι η ραδιομετρική ανάλυση, τόσο περισσότερες αποχρώσεις του γκρι βλέπει ο χρήστης. (USGS, Radiometric Resolution) Στον Landsat 8, ο δείκτης OLI συλλέγει δεδομένα με βελτιωμένη ραδιομετρική ανάλυση με δυναμικό εύρος 12 bit, κάτι το οποίο βελτιώνει τη συνολική αναλογία σήματος προς θόρυβο στην εικόνα. Αυτό μεταφράζεται σε 4096 πιθανά επίπεδα του γκρι σε σχέση με τα 256 που χαρακτήριζαν τα όργανα των Landsat 1-7 (8-bit). Η καλύτερη απόδοση σήματος

προς θόρυβο επιτρέπει τον βελτιωμένο χαρακτηρισμό της κάλυψης γης και της κατάστασης της. (USGS, Landsat 8)

Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Band 1 - Coastal aerosol	0.43-0.45	30
Band 2 - Blue	0.45-0.51	30
Band 3 - Green	0.53-0.59	30
Band 4 - Red	0.64-0.67	30
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85-0.88	30
Band 6 - Shortwave Infrared (SWIR) 1	1.57-1.65	30
Band 7 - Shortwave Infrared (SWIR) 2	2.11-2.29	30
Band 8 - Panchromatic	0.50-0.68	15
Band 9 - Cirrus	1.36-1.38	30
Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.6-11.19	100
Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50-12.51	100

Εικόνα 12 Φασματικά κανάλια των δορυφόρων Landsat 8, 9 και τα κύρια χαρακτηριστικά τους (USGS, 2021)



Εικόνα 13 Διάγραμμα ατμοσφαιρικής μετάδοσης (%) προς το μήκος κύματος (nm) των πολυφασματικών καναλιών των Landsat 7 και 8 (NASA, Landsat Science)



Εικόνα 14 Ο δορυφόρος Landsat 8 (Satellite Imaging Corporation)

Ανά τα χρόνια οι Landsat δορυφόροι έχουν χρησιμοποιηθεί για τον ίδιο σκοπό, δηλαδή τη χαρτογράφηση της καύσιμης ύλης παγκοσμίως. Τα χαρακτηριστικά του Landsat αποτελούν τη χρυσή τομή μεταξύ της φασματικής και χρονικής ανάλυσης και έχουν επαρκή χωρική κάλυψη για τις ανάγκες της χαρτογράφησης. (Riano et al, 2002) Ωστόσο, αδυνατούν να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το ύψος της βλάστησης, το οποίο ειδικά στις δασικές περιοχές, αποτελεί πολύ σημαντική πληροφορία για την διάκριση της βλάστησης. Επίσης, σε δασικές περιοχές με πυκνή κάλυψη βλάστησης, δεν είναι δυνατόν να καταγραφούν πληροφορίες για τον δασικό υπόροφο. Αυτό σημαίνει πως δεν υπάρχουν δεδομένα για τα επιφανειακά καύσιμα.

2.2.2 Αντικειμενοστρεφής ανάλυση – eCognition

Ένα κυρίαρχο ζήτημα της ψηφιακής τηλεπισκόπησης ήταν για πολλά χρόνια η δημιουργία ενός προγράμματος το οποίο προσφέρει την δυνατότητα «μίμησης» της ανθρώπινης σκέψης. Ο κοντινότερος προς την ανθρώπινη σκέψη τρόπος για να επιτευχθεί η ανάλυση μιας εικόνας και στη συνέχεια η ταξινόμηση της, δεν είναι η ανάλυση η οποία έχει ως στοιχειώδη μονάδα τα εικονοστοιχεία και εφαρμοζόταν για χρόνια, αλλά μια νέα μέθοδος, αυτή της αντικειμενοστρεφούς ανάλυσης (*Object oriented image analysis*). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αντίληψη ότι σε κάθε εικόνα υπάρχουν μέρη, κυρίως γειτονικά, που παρουσιάζουν ομοιογένεια. Σχετίζεται, γενικότερα, με τον τρόπο αντίληψης του ανθρώπινου εγκεφάλου, ο οποίος δεν αναγνωρίζει μόνο σημεία στο οπτικό του πεδίο, αλλά τα συσχετίζει με ένα επίπεδο σκέψης και δημιουργεί διαφορετικές σημασίες, και συνάμα σημασιολογικά αντικείμενα.

Ο ανθρώπινος εγκέφαλος μπορεί εύκολα να κατηγοριοποιήσει μια εικόνα σε περιοχές ενδιαφέροντος. Οι άνθρωποι με την βοήθεια της όρασης τους, για να παρατηρήσουν μια εικόνα κινούν μια σειρά από νοητικές διεργασίες. Οι διεργασίες αυτές προσφέρουν στον

παρατηρητή την ικανότητα να κατανοήσει μια εικόνα, να την επεξεργαστεί και τελικά να την ερμηνεύσει. Μέσα από την παρατήρηση της, ο ανθρώπινος εγκέφαλος την κατηγοριοποιεί σε ποικίλες περιοχές. Πιο συγκεκριμένα, τμήματα των περιοχών αυτών καταγράφονται ανάλογα με το σχήμα, το χρώμα, το μέγεθος. (Κολοπτάς, 2013)

Για πολλά χρόνια, η μέθοδος ταξινόμησης με βάση την φασματική υπογραφή και τα εικονοστοιχεία, κυριαρχούσε λόγω της έλλειψης τεχνολογικών προδιαγραφών. Για τη χρήση της αντικειμενοστρεφούς ανάλυσης απαιτούνταν ηλεκτρονική υπολογιστές μεγάλης ισχύς, ώστε να αποδώσουν με ταχύτητα και ακρίβεια. Με τα χρόνια αυτό, ξεπεράστηκε μιας και τα τελευταία 30 χρόνια η τεχνολογική ανάπτυξη και αναβάθμιση των υπολογιστικών συστημάτων και των λογισμικών, είναι ραγδαία. Όλα τα παραπάνω σε συνδυασμό με τις ατέλειες που παρουσιάζονταν κατά την εφαρμογή της μεθόδου της αναγνώρισης του πολυφασματικού προτύπου σε εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης, οδήγησε τους μελετητές στην αναζήτηση τρόπων και στην παραγωγή-δόμηση προγραμμάτων τα οποία θα μπορούσαν να εφαρμόσουν και να υλοποιήσουν την θεώρηση της αντικειμενοστρεφούς ανάλυσης. (Κολοπτάς, 2013)

Το σκεπτικό πάνω στο οποίο στηρίζονταν η εφαρμογή της αντικειμενοστρεφούς ανάλυσης, δηλαδή η «μίμηση» της ανθρώπινης σκέψης, σε συνδυασμό με την υπομονή και την πίστη των ερευνητών ότι η φιλοσοφία της μεθόδου αυτής μπορεί να οδηγήσει σε αξιόπιστα αποτελέσματα έφερε την ραγδαία εξάπλωση της αντικειμενοστρεφούς ανάλυσης μετά το 2000. Η αντικειμενοστρεφής ανάλυση ήταν η πρώτη μεθοδολογία η οποία άρχισε να χρησιμοποιεί ως στοιχειώδη μονάδα τα αντικείμενα. Ως αντικείμενα θεωρούνται γειτονικά εικονοστοιχεία τα οποία ομαδοποιούνται βάσει κριτηρίων, που ορίζονται από το χρήστη. Η ανάλυση της εικόνας εξαρτάται από τα αντικείμενα αυτά τα οποία συνιστούν και τα πρωτογενή δεδομένα της. Κάθε ένα από αυτά τα αντικείμενα, περιλαμβάνει πληροφορίες οι οποίες σχετίζονται με το σχήμα, του γείτονες του συγκεκριμένου αντικειμένου, τα φασματικά χαρακτηριστικά και τις σχέσεις με το περιβάλλον. (Κολοπτάς, 2013)

Το λογισμικό eCognition χρησιμοποιείται για την αυτοματοποίηση της ανάλυσης γεωχωρικών δεδομένων. Οι χρήστες μπορούν να σχεδιάσουν λύσεις εξαγωγής χαρακτηριστικών για τη μετατροπή των γεωδεδομένων σε γεωπληροφορίες. Το eCognition ξεφεύγει από τις συμβατικές προσεγγίσεις στην ανάλυση δεδομένων λόγω της ικανότητάς του να μιμείται τις γνωστικές δυνάμεις του ανθρώπινου μυαλού και να συγχωνεύει γεωχωρικά δεδομένα εισόδου. Χρησιμοποιώντας διαδικασίες πολυεπίπεδης κατάτμησης και ταξινόμησης, έχει αναπτυχθεί μια ισχυρή μέθοδος απόδοσης γνώσης σε ένα σημασιολογικό δίκτυο. Η τεχνολογία εξετάζει τα pixel/σημεία όχι μεμονωμένα, αλλά σε πλαίσιο. Δημιουργεί μια εικόνα επαναληπτικά, αναγνωρίζοντας ομάδες pixel ως αντικείμενα. Ακριβώς όπως το ανθρώπινο μυαλό, χρησιμοποιεί το χρώμα, το σχήμα, την υφή και το μέγεθος των αντικειμένων, καθώς και το πλαίσιο και τις σχέσεις τους για να βγάλει τα ίδια συμπεράσματα με έναν έμπειρο αναλυτή, προσθέτοντας όμως τα πλεονεκτήματα του αυτοματισμού και της τυποποίησης. (Trimble Geospatial, What Is eCognition?)

2.3 Μοντέλα πρόβλεψης δασικών πυρκαγιών

Η ανάγκη για την μελέτη, την πρόβλεψη αλλά και την σε πραγματικό χρόνο αντιμετώπιση των δασικών πυρκαγιών οδήγησε στη κατασκευή διαφόρων μοντέλων και μετέπειτα λογισμικών πρόβλεψης της συμπεριφοράς τους. Αρχικά δημιουργήθηκαν μοντέλα πρόβλεψης τα οποία χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- ❖ Φυσικά
- ❖ Εμπειρικά ή Ημι-εμπειρικά μοντέλα (Alexander & Cruz, 2013)

Φυσικά μοντέλα

Τα φυσικά μοντέλα έχουν κυρίως αναπτυχθεί με θεωρητικούς σκοπούς που έχουν στόχο την καλύτερη κατανόηση των φυσικών και χημικών διεργασιών που αφορούν τη διάδοση μιας πυρκαγιάς. (Alexander & Cruz, 2013)

Αυτό γίνεται με τη εξισώσεων και αλγορίθμων, όπου απαιτούνται πολύ καλές γνώσεις μαθηματικών. Το πραγματικό όφελος από τη χρήση αυτών των μοντέλων, έγκειται στο να παραχθούν ορισμένες βασικές αρχές, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό των άλλων μοντέλων. (Van Wagner, 1985)

Εμπειρικά μοντέλα

Τα εμπειρικά (ή στατιστικά) μοντέλα βασίζονται στη στατιστική ανάλυση της συμπεριφοράς πειραματικών ή πραγματικών τεκμηριωμένων πυρκαγιών. Δημιουργούνται μέσω στατιστικών συσχετίσεων και προσπαθούν να περιγράψουν και να ποσοτικοποιήσουν τα βασικά χαρακτηριστικά που περιγράφουν τη συμπεριφορά της φωτιάς. Στο σύνολο των εμπειρικών μοντέλων, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι για τον προσδιορισμό του ρυθμού εξάπλωσης της φωτιάς (Rate Of Spread) που συχνά αναφέρεται ως ROS στη διεθνή βιβλιογραφία. Άλλες βασικές παράμετροι είναι το ύψος και το μήκος της φλόγας, η ένταση και η χωρική απόδοση του σχήματος της πυρκαγιάς. Αξιοποιούνται επιχειρησιακά, λόγω της απλότητας, της πρακτικής τους φύσης και της άμεσης σύνδεσής τους με τη συμπεριφορά των πραγματικών δασικών πυρκαγιών. Καλύπτουν ανάγκες που προκύπτουν κατά το σχεδιασμό της καταστολής, στοχεύοντας στην περιγραφή της εξάπλωσης των δασικών πυρκαγιών, σε πραγματικές συνθήκες. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα δασοπυροσβεστικά πληρώματα πολλές φορές εργάζονται υπό συνθήκες ισχυρών ανέμων, όπου η ανάγκη ταχείας αναπροσαρμογής των τακτικών είναι δεδομένη, τα περισσότερα εμπειρικά μοντέλα είναι μονοδιάστατα και επικεντρώνονται στην πρόβλεψη του ROS της κεφαλής της πυρκαγιάς (downwind ή head ROS). (Αθανασίου, 2015)

Ημι-Εμπειρικά μοντέλα

Τα ημι-εμπειρικά μοντέλα αναπτύσσονται με βάση τα δεδομένα τα οποία συλλέγονται κατά τη διάρκεια πυρκαγιών που τελούνται σε εργαστήρια για παρακολούθηση και

αναλύονται με βάση τους φυσικούς νόμους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Έτσι αναζητούν σχέσεις ή απουσία αυτών μεταξύ διαφόρων παραμέτρων. Η μοντελοποίηση καθίσταται δύσκολη, λόγω της διαφοράς κλίμακας που προκύπτει μεταξύ εργαστηριακών πειραμάτων και πραγματικών δασικών πυρκαγιών. Τα εργαστηριακά πειράματα δεν μπορούν να αναπαραστήσουν τις ροές ενέργειας και μάζας και τις σχετικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, όπως για παράδειγμα την επίδραση της επαγωγής και της ακτινοβολίας σε σχέση με τα επίπεδα έντασης της πυρκαγιάς αλλά και την επίδραση της οριζόντιας συνιστώσας του ανέμου και της κατακόρυφης επαγωγής. (Van Wagner, 1985)

Μοντέλο του Rothermel

Το μοντέλο του Rothermel (1972) είναι το πιο δημοφιλές ημι-εμπειρικό μοντέλο. Αξιοποίησε δεδομένα από: α) εργαστηριακά πειράματα σε αεροδυναμική σήραγγα, σ' ένα μεγάλο εύρος χαρακτηριστικών της καύσης και β) μελέτες πεδίου που είχαν γίνει στην Αυστραλία με ποικιλία συνθηκών ανέμου. Η ευρεία δυνατότητα χρήσης του, οδήγησε στη δημιουργία πολλών συστημάτων πρόβλεψης της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών και της χωρικής προσομοίωσης της εξάπλωσής τους που βασίζονται σ' αυτό.

Το μαθηματικό αυτό μοντέλο έχει διαπιστωθεί πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη πρόβλεψη της συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών με οποιονδήποτε τύπο δασικής βλάστησης, ύψους έως 2 μέτρων. Η μόνη προϋπόθεση είναι ο τύπος βλάστησης να περιγράφεται με τη μορφή αντιπροσωπευτικού μοντέλου καύσιμης ύλης. (Rothermel, 1972, Ξανθόπουλος, 1990, Αθανασίου & Ξανθόπουλος 2009, Σταμπουλίδης 2017)

BehavePlus

Το σύστημα μοντελοποίησης πυρκαγιάς είναι ένα λογισμικό το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε εφαρμογή πυρκαγιάς που περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς της και ορισμένων επιπτώσεων της. Αποτελείται από μια συλλογή μαθηματικών μοντέλων που περιγράφουν τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς και το περιβάλλον της. Το πρόγραμμα προσομοιώνει το ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς, την απόσταση εντοπισμού, το ύψος καύσης, τη θνησιμότητα των δέντρων, την υγρασία καυσίμου, τον συντελεστή ρύθμισης του ανέμου, καθώς και άλλες μεταβλητές. (BehavePlus Fire Modeling System)

Αρχικά είχε ως πυρήνα το μοντέλο του Rothermel που αναλύθηκε παραπάνω. Αποτελείται από δύο υποσυστήματα: α) το FUEL για την περιγραφή των δασικών καυσίμων ώστε να είναι εφικτή η χρήση τους στο μοντέλο πρόβλεψης της συμπεριφοράς της φωτιάς, και β) το BURN για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της φωτιάς. (Burgan & Rothermel, 1984, Andrews, 1986, Andrews & Chase, 1989)

Το σημερινό λογισμικό, έπειτα από σταδιακή ανάπτυξη, έχει ενσωματώσει πολλά διαφορετικά μοντέλα και σύνολα μαθηματικών εξισώσεων, για την πρόβλεψη συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς. (Andrews et al, 2005, Andrews, 2009)

Παρά την χρήση του παγκοσμίως σε πολλές περιπτώσεις και περιοχές (ΗΠΑ, Ευρώπη, Ασία), στη συγκεκριμένη διπλωματική χρησιμοποιήθηκε μόνο για τον υπολογισμό μιας μεταβλητής. Η μεταβλητή είναι η υγρασία των καυσίμων με χρονική υστέρηση 1-10-100 ωρών. Ο υπολογισμός αυτής θα αναλυθεί παρακάτω στο κεφαλαίο της μεθοδολογίας.

Farsite

Το Farsite είναι ένα πρόγραμμα το οποίο, σε δύο διαστάσεις, προσομοιώνει χωρικά την εξάπλωση και τη συμπεριφορά πυρκαγιών κάτω από ετερογενείς συνθήκες. Συνδυάζοντας ήδη υπάρχοντα μοντέλα πρόβλεψης συμπεριφοράς πυρκαγιάς όπως αυτό του Rothermel (1972) και τις προσαρμογές του Albini (1976) σε αυτό, το μοντέλο πυρκαγιάς κόμης του Van Wagner (1977), το μοντέλο επιτάχυνσης πυρκαγιάς, το μοντέλο κηλίδωσης και αυτό της υγρασίας καυσίμου (Finney, 2004)

Επιδεικνύει τους δεσμούς μεταξύ των διαφόρων μοντέλων αλλά και τις συνέπειες τους στα χωρικά πρότυπα ανάπτυξης και συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Αυτό μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο διερεύνησης των επιπτώσεων των υποθέσεων των μοντέλων, στην ανάπτυξη και τη συμπεριφορά πυρκαγιάς αλλά και εντοπισμού στοιχείων που λείπουν μεταξύ των μοντέλων. (Finney, 2004)

Τα δεδομένα εισόδου του λογισμικού αφορούν τη τοπογραφία της περιοχής μελέτης (κλίση, προσανατολισμός, υψόμετρο), τις καιρικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου), τις μονάδες καύσιμης ύλης που απαρτίζουν τη περιοχή, την περιεχόμενη υγρασία της καύσιμης ύλης, τα σημεία έναρξης της πυρκαγιάς και τα εμπόδια της (φυσικά εμπόδια, σημεία πυρόσβεσης).

Τα δεδομένα εξόδου (αποτελέσματα) των προσομοιώσεων, είναι είτε πίνακες (π.χ. καμένη έκταση ανά χρονικό βήμα) είτε διανυσματικά αρχεία (shapefiles) (περίμετρος της φωτιάς ανά χρονικό βήμα) είτε πλεγματικά αρχεία (με τιμές του ρυθμού εξάπλωσης, του μήκους φλόγας, κ.α.) (Πηγή: Finney, 2004).

FlamMap

Το σύστημα ανάλυσης και χαρτογράφησης πυρκαγιών FlamMap (Finney, 2006) περιγράφει πιθανές συμπεριφορές μιας πυρκαγιάς για σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες, δηλαδή τις καιρικές συνθήκες και την υγρασία των καυσίμων. Η συμπεριφορά της πυρκαγιάς υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε εικονοστοιχεία εντός του αρχείου που συνδυάζει στο λογισμικό, ανεξάρτητα. Οι υπολογισμοί των πιθανών συμπεριφορών μιας πυρκαγιάς περιλαμβάνουν την εξάπλωση της επιφανειακής πυρκαγιάς, το μήκος της φλόγας, την έναρξη πυρκαγιάς κόμης και την εξάπλωση της. Η κατάσταση και η υγρασία της καύσιμης ύλης σε κάθε εικονοστοιχεία βασίζεται στη κλίση, τη σκίαση, το υψόμετρο, τον προσανατολισμό και τις καιρικές συνθήκες. Με τη συμπερίληψη του FARSITE, το

FlamMap έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει την ανάπτυξη και τη συμπεριφορά πυρκαγιών χρησιμοποιώντας λεπτομερείς ακολουθίες καιρικών συνθηκών. Στο FlamMap ενσωματώνονται τα ακόλουθα μοντέλα συμπεριφοράς:

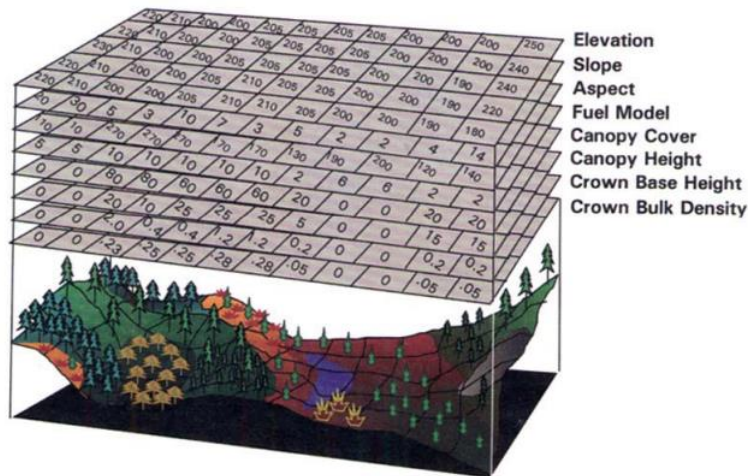
- ❖ Το μοντέλο εξάπλωσης επιφανειακής πυρκαγιάς του Rothermel (1972)
- ❖ Το μοντέλο έναρξης πυρκαγιάς κόμης του Van Wagner (1977)
- ❖ Το μοντέλο εξάπλωσης πυρκαγιάς κόμης του Rothermel (1991)
- ❖ Το μοντέλο κηλίδωσης (spotting) του Albini (1979)
- ❖ Τις μεθόδους υπολογισμού πυρκαγιάς κόμης του Finney (1998) ή των Scott & Reinhardt (2001)
- ❖ Το μοντέλο υγρασίας καύσιμης ύλης του Nelson (2000) (Firelab)

Τα δεδομένα εισόδου και εξόδου είναι ίδια με του Farsite, με μόνες αλλαγές στους αλγορίθμους που τα διαχειρίζονται.

Ο αλγόριθμος Minimum Time Travel (MTT) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ανάπτυξης της πυρκαγιάς στις γωνίες των εικονοστοιχείων, χρησιμοποιώντας αυθαίρετη ανάλυση. Αυτή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας παραδοχές όπως η διατήρηση όλων των περιβαλλοντικών συνθηκών σταθερών στο χρόνο. Έτσι, οι υπολογισμοί μέσω αυτού του αλγορίθμου μπορούν να δημιουργήσουν την ανάπτυξη μια πυρκαγιάς βγάζοντας, για παράδειγμα εκτός τη χρονική μεταβλητότητα των ανέμων ή της περιεκτικότητας σε υγρασία. Αυτό επιτρέπει να γίνει η ανάλυση μόνο των χωρικών προτύπων των καυσίμων και της τοπογραφίας.

Ο αλγόριθμος Treatment Optimization Model (TOM) απαιτεί από τον χρήστη να παρέχει σετ δεδομένων εισόδου, εκτός των στοχευμένων καιρικών συνθηκών, όπως είναι τα σημεία εκκίνησης της πυρκαγιάς αλλά και το συνολικό αρχείο που περιέχει τα τοπογραφικά στοιχεία και τα στοιχεία καύσιμης ύλης της περιοχής. Ο αλγόριθμος διαιρεί το τοπίο σε λωρίδες και έπειτα με τη χρήση του αλγορίθμου MTT εντοπίζει τις κύριες διαδρομές της πυρκαγιάς αλλά και τις διασταυρώσεις με περιοχές του τοπίου όπου η συμπεριφορά της αλλάζει.

Το FlamMap είναι χρήσιμο στην επαλήθευση των χωρικών δεδομένων. Τα αποτελέσματα σχετικά με τη συμπεριφορά μια πυρκαγιάς μπορούν εύκολα να συγκριθούν με αναμενόμενες συμπεριφορές, για συγκεκριμένο περιβάλλον κάθε φορά. Η απεικόνιση των δεδομένων εξόδου σε δύο και τρεις διαστάσεις είναι επίσης βοηθητική για την αξιολόγηση των τελικών αποτελεσμάτων. (Finney, 2006)



Εικόνα 15 Δεδομένα εισόδου για την κατασκευή του αρχείου Τοπίου (Landscape) στο FlamMap/FARSITE (Finney, 2006)

2.3.1 Επιλογή Λογισμικού προσομοίωσης

Η επιλογή του κατάλληλου λογισμικού έγινε μετά από μελέτη αντίστοιχων εργασιών, οι οποίες καταπιάνονται με το ίδιο αντικείμενο μελέτης τους και της συνολικότερης βιβλιογραφίας. Τα λογισμικά BehavePlus και Farsite/FlamMap αποτελούν τα πιο διαδεδομένα στη μελέτη συμπεριφοράς πυρκαγιών. Η αξιολόγηση έγινε με βάση την οικειότητα με το περιβάλλον εργασίας τους και το πόσο φιλικό είναι αυτό προς τον χρήστη, τις απαιτήσεις σε δεδομένα αλλά και την ποιότητα των αποτελεσμάτων τους. Το BehavePlus αποκλείστηκε για δύο βασικούς λόγους. Αρχικά, δεν προσφέρει γραφική απεικόνιση της πυρκαγιάς, κάτι που αποτελεί βασική προϋπόθεση στη παρούσα διπλωματική εργασία. Ακόμα, το περιβάλλον εργασίας του δημιουργεί δυσκολίες στον χρήστη λόγω της δυσχρηστίας του και κυρίως λόγω της έλλειψης επεξήγησης των διαφόρων μεταβλητών/ενεργειών/εντολών που απαιτούνται/χρησιμοποιούνται στο λογισμικό. Η έλλειψη βιβλιογραφίας, ειδικά στην Ελλάδα, δυσχεραίνει την προσπάθεια κατανόησης των επιμέρους λειτουργιών του λογισμικού, με αποτέλεσμα να μην έγιναν περισσότερες προσπάθειες κατανόησης του. Το λογισμικό που επιλέχθηκε είναι το FlamMap, το οποίο αποτελεί την τελευταία έκδοση του μοντέλου FARSITE. Τα αποτελέσματα που παρέχει το λογισμικό αυτό, ανταποκρίνονται ακριβώς στις ανάγκες της εργασίας και τα δεδομένα εισόδου τα οποία απαιτούνται με κάποιες εξαιρέσεις (περιεχόμενη υγρασία σε χρονική υστέρηση), είναι εύκολο να βρεθούν/κατασκευαστούν με τις υπάρχουσες γνώσεις.

2.4 Μοντέλα Καύσιμης Ύλης

Τα μοντέλα καύσιμης ύλης (M.K.Y) αποτελούν την κατηγοριοποίηση της βλάστησης, η οποία χρησιμοποιείται στα μοντέλα προσομοίωσης που αναλύθηκαν παραπάνω. Ένα μοντέλο καυσίμου είναι ένα σύνολο αριθμητικών τιμών που περιγράφει έναν τύπο καυσίμου για το μαθηματικό μοντέλο που προβλέπει το ρυθμό και την ένταση διασποράς. Η ανάγκη αυτή, για κατηγοριοποίηση προέκυψε επειδή η επιτόπια δειγματοληψία όλων των παραμέτρων της βλάστησης αποτελούσε μια δαπανηρή, χρονοβόρα και κουραστική διαδικασία. (Rothermel, 1972)

Διαχρονικά, έχουν γίνει τρεις μεγάλες κατηγοριοποιήσεις, που χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση. Η πρώτη κατηγοριοποίηση έγινε από τον Rothermel (1972) δημιουργώντας 11 μοντέλα καύσιμης ύλης. Μετέπειτα ο Albini (1976) πρόσθεσε 2 κατηγορίες στις ήδη υπάρχουσες, φτάνοντας στις 13 συνολικά. Τη κατηγοριοποίηση του Rothermel με τις προσαρμογές του Albini χρησιμοποίησε και ο Andrews (1986) για το μοντέλο προσομοίωσης συμπεριφοράς πυρκαγιάς BehavePlus, η οποία προσαρμόστηκε σε δεύτερο χρόνο από τον Kalabokidis (2004) στη περίπτωση της μεσογειακής βλάστησης.

Πίνακας 2 Οι M.K.Y. κατά τον Albini (1976) και τον Kalabokidis (2004)

M.K.Y	Περιγραφή	
1	Short Grasses (30cm)	Ποολίβαδα
2	Timber (Grass and Understory)	Δασολίβαδα
3	Tall Grass (76cm)	Λιβάδια (Υψηλή βλάστηση)
4	Chaparral (18cm)	Θαμνώδεις (αείφυλλα/σκληρόφυλλα)
5	Brush (61cm)	Θαμνολίβαδα (φυλλοβόλα)
6	Dormant Brush, Hardwood Slash	Θαμνότοποι (ξηροφυτικοί)
7	Southern Rough	Θαμνότοποι (μερικώς δασκοσκεπείς)
8	Closed Timber Litter	Κλειστά δάση (ξηροτάπητας)
9	Hardwood Litter	Φυλλοβόλα δάση (ξηροτάπητας)
10	Timber (Litter and Understory)	Σύμπυκνα δάση (ξηροτάπητας και υπόροφος)
11	Light Logging Slash	Υπολείμματα υλοτομιών (μίκρη ποσότητα)
12	Medium Logging Slash	Υπόλειμματα υλοτομιών (μέτρια ποσότητα)
13	Heavy Logging Slash	Υπολείμματα υλοτομιών (μεγάλη ποσότητα)

Αυτά τα μοντέλα έχουν αποδειχθεί ικανά στην πρόβλεψη του ρυθμού εξάπλωσης και έντασης των πυρκαγιών, στην αιχμή της περιόδου πυρκαγιών, εν μέρει επειδή οι σχετικές συνθήκες ξηρασίας οδηγούν σε ένα πιο ομοιόμορφο σύμπλεγμα καυσίμων, υπόθεση πολύ σημαντική για το μοντέλο εξάπλωσης του Rothermel (1972). Παρουσιάζουν ελλείψεις σε άλλους σκοπούς, όπως για παράδειγμα στη μελέτη συμπεριφοράς ελεγχόμενων πυρκαγιών, στις πυρκαγιές άγριων εκτάσεων, της προσομοίωσης των επιπτώσεων της επέμβασης στα χαρακτηριστικά των καυσίμων σε πιθανές συμπεριφορές πυρκαγιάς και της προσομοίωσης της μετάβασης σε πυρκαγιά κόμης χρησιμοποιώντας μοντέλα έναρξης πυρκαγιάς κόμης. (Scott & Burgan, 2005)

Με βάση αυτές τις παραπάνω ελλείψεις, οι Scott & Burgan (2005) δημιούργησαν μια νέα κατηγοριοποίηση της καύσιμης ύλης. Στο μοντέλο αυτό υπάρχουν και κατηγορίες μη καύσιμης ύλης, όπως το γυμνό έδαφος, οι βραχώδεις εκτάσεις, το νερό κ.α., τα οποία δεν συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς αλλά βοηθούν στην συνολικότερη χαρτογράφηση περιοχών που πλήττονται από πυρκαγιές.

Πίνακας 3 Μ.Κ.Υ κατά τους Scott & Burgan (2005)

Μ.Κ.Υ	Περιγραφή		Αριθμός Μ.Κ.Υ
NB1, NB2, NB3, NB8, NB9	Insufficient wildland fuel (non-burnable)	Υλικά που δεν επιδέχονται καύση	91,92,93,98,99
GR1, GR2, GR3, GR4, GR5, GR6, GR7, GR8, GR9	Nearly Pure Grass/Or Forb Type (Grass)	Ποολίβαδα	101,102,103,104, 105,106,107,108, 109
GS1, GS2, GS3, GS4	Mixture of grass and shrub up to 50% shrub coverage (Grass-Shrub)	Θαμνολίβαδα (τουλάχιστον 50% κάλυψη θάμνων)	121,122,123,124
SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9	Shrub cover at least 50% shrub coverage (Shrub)	Θαμνότοποι	141,142,143,144, 145,146,147,148, 149
TU1, TU2, TU3, TU4, TU5	Grass or shrubs mixed with litter from forest canopy (Timber- understory)	Σύμπυκνα δάση (ξηροτάπητας και υπόροφος)	161,162,163,164, 165
TL1, TL2, TL3, TL4, TL5, TL6 TL7, TL8, TL9	Dead and down woody fuel (litter) beneath a forest canopy (Timber-Litter)	Κλειστά δάση (ξηροτάπητας)	181,182,183,184, 185,186,187,188, 189
SB1, SB2, SB3, SB4	Activity fuels (slash) or debris from wind damage (Slash – Blowdown)	Υπολείμματα υλοτομιών	201,202,203,204

Το κενό στην αριθμητική ακολουθία στην κατηγορία των υλικών που δεν επιδέχονται κάυση είναι για να διατηρηθούν οι αριθμοί 98 ως νερό και 99 ως βράχος (γυμνό έδαφος), όπως συμβαίνει στο FARSITE. (Scott & Burgan, 2005)

Η δημιουργία ενός νέου συνόλου μοντέλων καυσίμου δεν δημιουργεί δυσκολίες στο μοντέλο εξάπλωσης πυρκαγιάς του Rothermel. Όπως η αρχική κατηγοριοποίηση των 13 μοντέλων, έτσι και αυτή είναι εφαρμόσιμη σε μοντέλα προσομοίωσης συμπεριφοράς πυρκαγιών, τα οποία χρησιμοποιούν το μοντέλο εξάπλωσης του Rothermel. (Scott & Burgan, 2005)

Συγκεκριμένα, για τον Μεσογειακό χώρο και ειδικά για την Ελλάδα, έχει δημιουργηθεί κατηγοριοποίηση μοντέλων καυσίμου από τον Dimitrakopoulos (2002). Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται τόσο στη πράξη και συγκεκριμένα στη παρούσα διπλωματική εργασία, είναι πως δεν μπορεί να ανταποκριθεί στα λογισμικά προσομοίωσης όπως το FlamMap, το οποίο χρησιμοποιείται εδώ, αλλά σε ένα λογισμικό όπως το BehavePlus.

Πίνακας 4 Τα 7 Μ.Κ.Υ κατά τον Dimitrakopoulos (2002)

Μ.Κ.Υ	Περιγραφή
1	Evergreen sclerophyllous shrublands (up to 1,5 m) / Αειθαλές-σκληρόφυλλο θαμνώδεις εκτάσεις (μακί) (έως 1,5μ)
2	Evergreen sclerophyllous shrublands (1,5-3m) / Αειθαλές-σκληρόφυλλο θαμνώδεις εκτάσεις (μακί) (1,5 έως 3μ)
3	Kermes oak shrublands (up to 2m) / Πρίνωνες (έως 2μ)
4	Phrygana I / Φρύγανα I
5	Phrygana II / Φρύγανα II
6	Mediterranean Grasslands / Μεσογειακά Χορτολίβαδα
7	Forest litter layer of Mediterranean pine species / Βελονοτάπητας σε Μεσογειακά Δάση Πεύκης

Κεφάλαιο 3. Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης αποτελεί ένα μεγάλο κομμάτι του βορείου τμήματος της Περιφερειακής Ενότητας Ευβοίας, η οποία υπάγεται στη Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας. Συγκεκριμένα, οι δύο δήμοι που απαρτίζουν την συνολική περιοχή μελέτης είναι οι Δήμοι Ιστιαίας-Αιδηψού και Μαντουδίου-Λίμνης-Αγίας Άννας.

3.1 Δήμος Ιστιαίας-Αιδηψού

Ο Δήμος Ιστιαίας-Αιδηψού βρίσκεται στην Βόρεια Εύβοια και αποτελείται από τις δημοτικές ενότητες Ιστιαίας, Αιδηψού, Αρτεμισίου και Ωρεών και Λιχάδας. Αποτελεί το βορειότερο κομμάτι του νησιού και βρέχεται ανατολικά από το Αιγαίο Πέλαγος, δυτικά από τον Ευβοϊκό Κόλπο ενώ βόρεια βρίσκεται το Στενό Αρτεμισίου και το Στενό Ωρεών-Τρικεριού. Η έκταση του Δήμου είναι 499,32 km², ενώ ο πληθυσμός του 19.396 κάτοικοι με βάση την απογραφή του 2021. Έδρα του δήμου έχει οριστεί η Ιστιαία. Τα όρια του δήμου αντιστοιχούν στα όρια της παλαιότερης Επαρχίας Ιστιαίας η οποία καταργήθηκε το 1999 με το σχέδιο Καποδίστριας. Στα νότια του, συνορεύει με τον Δήμο Μαντουδίου-Λίμνης-Αγίας Άννας. (Δήμος Ιστιαίας-Αιδηψού, 2023) Η μετακίνηση στον δήμο μπορεί να γίνει είτε με ΚΤΕΛ Ευβοίας από τη Χαλκίδα, είτε με ferry boat από την Περιφερειακή Ενότητα Φθιώτιδας. Συγκεκριμένα τα δρομολόγια του ferry boat είναι Γλύφα-Αγιόκαμπος και Αρκίτσα-Αιδηψός. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από χαμηλού υψομέτρου βουνά, όπως το όρος Τελέθριο (υψ. 970 μέτρων), ανάμεσα στην Ιστιαία και την Αιδηψό (Wonder Greece, N. Ευβοίας, 2013) και το όρος Ξηρό το οποίο είναι στο σύνορο με τον δήμο Μαντουδίου-Λίμνης-Αγίας Άννας το οποίο συνεπάγεται πλούσια χλωρίδα και πανίδα, ενώ παρουσιάζει και αρκετά σημεία φυσικής ομορφιάς όπως οι καταρράκτες του Δρυμώνα στις όχθες του ποταμού Σηπιά.



Εικόνα 16 Όρος Ξηρό (Wonder Greece, N. Ευβοίας, 2013)



Εικόνα 17 Καταράκτες Δρυμόνα (Πηγή: Wonder Greece, Ν. Ευβοίας, 2013)



Εικόνα 18 Δήμος Ιστιαίας Αιδηψού (Wikipedia, 2023)

3483	ΔΗΜΟΣ ΙΣΤΙΑΙΑΣ - ΑΙΔΗΨΟΥ (Έδρα: Ιστιαία,η)	19.396
3484	ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΙΣΤΙΑΙΑΣ	6.457
3485	Δημοτική Κοινότητα Ιστιαίας	5.107
3486	Δημοτική Κοινότητα Αβγαριάς	88
3487	Δημοτική Κοινότητα Βουτά	258
3488	Δημοτική Κοινότητα Γαλατσάδων	125
3489	Δημοτική Κοινότητα Γαλατσώνας	72
3490	Δημοτική Κοινότητα Καμαρίων	352
3491	Δημοτική Κοινότητα Κοκκινομηλέας	61
3492	Δημοτική Κοινότητα Κρουνερίτη	142
3493	Δημοτική Κοινότητα Μηλεών	123
3494	Δημοτική Κοινότητα Μονοκαρυάς	129
3495	ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΑΙΔΗΨΟΥ	5.766
3496	Δημοτική Κοινότητα Λουτρών Αιδηψού	4.123
3497	Δημοτική Κοινότητα Αγίου	1.101
3498	Δημοτική Κοινότητα Γιάλτρων	542
3499	ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΑΡΤΕΜΙΣΙΟΥ	3.410
3500	Δημοτική Κοινότητα Αρτεμισίου	871
3501	Δημοτική Κοινότητα Αγδινών	147
3502	Δημοτική Κοινότητα Αγριοβοτάνου	177
3503	Δημοτική Κοινότητα Ασμηγίου	672
3504	Δημοτική Κοινότητα Βασιλικών	631
3505	Δημοτική Κοινότητα Γερακιούς	106
3506	Δημοτική Κοινότητα Γουβών	447
3507	Δημοτική Κοινότητα Ελληνικών	359
3508	ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΛΙΧΑΔΟΣ	936
3509	Δημοτική Κοινότητα Λιχάδος	936
3510	ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΩΡΕΩΝ	2.827
3511	Δημοτική Κοινότητα Ωρεών	1.136
3512	Δημοτική Κοινότητα Καστανιωτίσης	214
3513	Δημοτική Κοινότητα Νέου Πύργου	783
3514	Δημοτική Κοινότητα Ταξιάρχου	694

Εικόνα 19 Κάτοικοι ανά δημοτική ενότητα και κοινότητα με βάση την απογραφή του 2021 (ΕΛΣΤΑΤ, 2021)

3.2 Δήμος Μαντουδίου-Λίμνης-Αγίας Άννας

Ο Δήμος Μαντουδίου-Λίμνης-Αγίας Άννας βρίσκεται στη βορειοκεντρική Εύβοια και έχει έδρα την Λίμνη. Αποτελείται από τις Δημοτικές Ενότητες Ελυμνίων, Νηλέως και Κηρέως. Συνορεύει βόρεια με το Δήμο Ιστιαίας - Αιδηψού, νότια με το Δήμο Διρφύων - Μεσσαπίων, δυτικά 'βρέχεται' από το βόρειο Ευβοϊκό κόλπο και ανατολικά από το Αιγαίο Πέλαγος. (Δήμος Μαντουδίου-Λίμνης-Αγίας Άννας, 2023)

Η έκταση του δήμου είναι 585,39 km² και ο πληθυσμός του 15.327 κάτοικοι με βάση την απογραφή του 2021. Ο Δήμος συνδέεται οδικώς με τη Χαλκίδα μέσω Μαντουδίου, με τα Λουτρά Αιδηψού μέσω Λίμνης και με την Ιστιαία μέσω Αγίας Άννας. Επίσης συνδέεται ακτοποικικά με τη Σκιάθο, τη Σκόπελο και την Αλόνησο μέσω του Λιμανιού Μαντουδίου στο Κυμάσι. (Wikipedia, 2023)

Στον δήμο βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του, όπως αναφέρθηκε και για τον δήμο Ιστιαίας-Αιδηψού, το όρος Ξηρό, το οποίο βρίσκεται στο σύνορο των δύο δήμων. Στη Λίμνη βρίσκεται το όρος Καντήλι (υψ. 1.225 μέτρων), στο οποίο υπήρχε ένα μεγάλο πευκόδασος, φυλλοβόλα και κωνοφόρα δέντρα, διάφορα είδη πουλιών και αρπακτικά πτηνά. Από το όρος Ξηρό πηγάζει ο ποταμός Νηλέας, στον οποίο μπορεί κανείς να βρει μικρούς καταρράκτες, το ομώνυμο φαράγγι του Νηλέα, καθώς και πλούσια χλωρίδα και πανίδα.

Κοντά στην Αγία Άννα βρίσκεται ο δεύτερος ποταμός του δήμου, ο ποταμός Κηρέας, ο οποίος αν και μικρός σε έκταση, αποτελεί ένα από τα ομορφότερα μέρη του νησιού. Γύρω του υπάρχει πλατανόδασος, και τα απομεινάρια του διάσημου Γεροπλάτανου, το γηραιότερο και μεγαλύτερο σε μέγεθος δέντρο της Βαλκανικής Χερσονήσου (Wonder Greece, N. Εύβοιας, 2013)



Εικόνα 20 Όρος Καντήλι (Wonder Greece, N. Ευβοίας, 2013)



Εικόνα 21 Ποταμός Νηλέας (Wonder Greece, N. Ευβοίας, 2013)



Εικόνα 22 Ποταμός Κηρέας (Wonder Greece, Ν. Ευβοίας, 2013)



Εικόνα 23 Ο Γεροπλάτανος του Ποταμού Κηρέα (Wonder Greece, Ν. Ευβοίας, 2013)



Εικόνα 24 Δήμος Μαντουδίου-Λίμνης-Αγίας Άννας (Wikipedia, 2023)

3595	ΔΗΜΟΣ ΜΑΝΤΟΥΔΙΟΥ - ΛΙΜΝΗΣ - ΑΓΙΑΣ ΑΝΝΑΣ (Έδρα: Λίμνη,η)	12.235
3596	ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΕΛΥΜΝΙΩΝ	4.129
3597	Δημοτική Κοινότητα Λίμνης	1.961
3598	Δημοτική Κοινότητα Κεχριών	603
3599	Δημοτική Κοινότητα Κουρκουλών	302
3600	Δημοτική Κοινότητα Ροβίων	1.103
3601	Δημοτική Κοινότητα Σκεπαστής	160
3602	ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΚΗΡΕΩΣ	5.845
3603	Δημοτική Κοινότητα Μαντουδίου	2.245
3604	Δημοτική Κοινότητα Βλαχιάς	152
3605	Δημοτική Κοινότητα Δαφνούσης	54
3606	Δημοτική Κοινότητα Κηρίνου	725
3607	Δημοτική Κοινότητα Μετοχίου Κηρέως	177
3608	Δημοτική Κοινότητα Πηλίου	646
3609	Δημοτική Κοινότητα Προκοπίου	949
3610	Δημοτική Κοινότητα Σπαθαρίου	317
3611	Δημοτική Κοινότητα Στροφυλιάς	440
3612	Δημοτική Κοινότητα Φαράκλας	140
3613	ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΝΗΛΕΩΣ	2.261
3614	Δημοτική Κοινότητα Αγίας Άννης	1.062
3615	Δημοτική Κοινότητα Αμελάντων	57
3616	Δημοτική Κοινότητα Αχλαδίου	356
3617	Δημοτική Κοινότητα Κεραμείας	94
3618	Δημοτική Κοινότητα Κερασεάς	334
3619	Δημοτική Κοινότητα Κοτσικιάς	167
3620	Δημοτική Κοινότητα Παππάδων	191

Εικόνα 25 Κάτοικοι ανά δημοτική ενότητα και κοινότητα με βάση την απογραφή του 2021 (ΕΛΣΤΑΤ, 2021)

3.3 Γεωμορφολογία

Η Β. Εύβοια έχει ένα πολυσχιδές ανάγλυφο χαμηλού υψομέτρου που υψώνεται σταδιακά από τα ανατολικά προς τα δυτικά, για να κορυφωθεί στον άξονα του Βόρειου Ευβοϊκού Κόλπου με τα βουνά Τελέθριο, Καβαλλάρης και Ξηρό. Οι δύο μεγάλες χαραδρώσεις των ποταμών Νηλέας και Σηπιάς, που πηγάζουν από το όρος Ξηρό, δημιουργούν την μορφολογική τομή που σηματοδοτεί το νότιο όριο της περιοχής και την ανύψωση των όγκων της Κεντρικής Εύβοιας, με κυρίαρχο στοιχείο το όρος Καντήλι. (TopoGuide, Βόρεια Εύβοια, 2014) Τα μορφολογικά δεδομένα της περιοχής μπορούν να αποτυπωθούν ως εξής: Το ελάχιστο υψόμετρο είναι τα 0 μ. (θάλασσα), μέγιστο στα 989 μ. και το Μέσο Υψόμετρο 303 μ.. Η μέση κλίση της περιοχής είναι 32,8% ενώ η μέση κλίση των δασικών εκτάσεων είναι 38,5%.



Εικόνα 26 Χάρτης Υψομέτρων Περιοχής Μελέτης

3.4 Χλωρίδα και Πανίδα περιοχής

Η χλωρίδα και η πανίδα του νομού Ευβοίας είναι αξιοσημείωτη και γνωστή από τα αρχαιότερα χρόνια. Ιδιαίτερα στα ορεινά σημεία της, στα οποία συναντάει κανείς 1.190 στρέμματα δασικής έκτασης με έλατα, οξιές, καστανιές, πεύκα και όχι μόνο. (Visitevoia.com)

Συγκεκριμένα στην Βόρεια Εύβοια, πέρα από τις τεράστιες εκτάσεις δάσους Χαλέπιου Πεύκης, Ελάτης, Καστανιών κ.α. μπορεί κανείς να συναντήσει και σπάνια είδη φυτών όπως τα:

- ❖ Ευβοϊκή άλυσος (*Alyssum euboicum*).
- ❖ Κενταύρια η εβενοειδής (*Centaurea ebenoides*).
- ❖ Καμπανούλα (*Campanula incurva*).
- ❖ Έβενος του Σίμπθορπ (*Ebenus sibthorpii*).
- ❖ Ευβοϊκό ηράνθεμο (*Fritillariaeuboica*) Είδος υπό εξαφάνιση
- ❖ Ευβοϊκό Όνοσμο (*Onosmaeuboica*)
- ❖ Αναρριχώμενη Σκορτσονέρα (*Scorzoneraserpentinica*) (Visitevoia.com)

Στα δάση αυτά εκτός της πλούσιας χλωρίδας υπάρχει και ένα μεγάλο εύρος μικρών και μεγάλων ζώων. Η παρουσία ρυακιών και ποταμιών και συνάμα καταρρακτών δημιουργεί ένα ιδανικό κλίμα για μικρά ζώα, ψάρια γλυκού νερού, ερπετών, αμφιβίων και πτηνών (αποδημητικών και μη). Κάποια από τα σπάνια είδη ζώων και πτηνών που εμφανίζονται στη περιοχή είναι:

- ❖ Τυφλοπόντικας (*Talpa caeca*)
- ❖ Ακανθόχοιρος (*Erinaceus concolor drozdorskii*)
- ❖ Η Ευβοϊκή μπριάνα (*Barbus plebejus euboicus*) – Επικίνδυνα υπό εξαφάνιση
- ❖ Η Τρανορινόλοφος Νυχτερίδα (*Rhinolophus ferrumequinum*)
- ❖ Σπιζαετός (*Hieraaetus fasciatus*)
- ❖ Μαυροπετρίτης (*Falco eleonorae*)
- ❖ Χρυσαιτός (*Aquila chrysaetos*)
- ❖ Σαΐνι (*Accipiter brevipes*)
- ❖ Μπούφος (*Bubo bubo*) (Visitevoia.com)



Εικόνα 27 Ακανθόχοιρος (Μουσείο Φυσικής Ιστορίας Κρήτης)



Εικόνα 28 Τρανορινόλοφος Νυχτερίδα (lifegrecabat.eu)



Εικόνα 29 Έβενος του Σίμπλορπ (Greekflora.gr)



Εικόνα 30 Ευβοϊκό Όνοσμο (Greekflora.gr)



Εικόνα 31 Μπούφος (Wikipedia)



Εικόνα 32 Χρυσαιετός (Wikipedia)

3.5 Ιστορικό Πυρκαγιών

Η Περιφερειακή Ενότητα Εύβοιας έχει στο ιστορικό της τις πιο καταστροφικές δασικές πυρκαγιές στη χώρα. Συγκεκριμένα, από το 1980 μέχρι το 2020 στη Π.Ε Εύβοιας έχουν παρατηρηθεί 11 συνολικά καταστρεπτικές δασικές πυρκαγιές και συνολικά καμένες εκτάσεις εξ αιτίας αυτών που ανέρχονται στα 757.106 στρέμματα. (Γκουρμπάτσης, 2021)

Μερικές από τις μεγαλύτερες πυρκαγιές ήταν αυτή του Ιουλίου του 1998, η οποία κράτησε 6 ημέρες και άφησε πίσω της 87.940 στρ. καμένων εκτάσεων εκ των οποίων τα 70.308 ήταν δασικά, η πυρκαγιά του καλοκαιριού του 2007, όπου κάηκαν 247.504 στρέμματα και υπήρξαν 6 νεκροί και φυσικά η πυρκαγιά του Αυγούστου του 2021 που μελετάται εδώ με 512.031 στρέμματα καμένων εκτάσεων.

Πίνακας 5 Οι μεγαλύτερες σε έκταση δασικές πυρκαγιές στην Εύβοια (>10.000 στρ.)

Έτος	Περιοχή	Καμένες εκτάσεις (στρ.)	Αίτια
1977	Λίμνη	99.697	Κακόβουλος Εμπρησμός
1990	Γιάλτρα	10.300	Άγνωστη
1998	-	87.940	Άγνωστη
1999	Κύμη/Αλιβέρι	63.759	Άγνωστη
2007	Κονίστρες, Αλιβέρι, Μίστρο, Θεολόγος, Στύρα	247.204	Ύποπτη Εμπρησμού
2009	Κάρυστος	58.150	Άγνωστη
2012	Κύμη	37.240	Άγνωστη
2016	Κάρυστος	15.150	Άγνωστη
2016	Λίμνη-Αγία Άννα	26.220	Άγνωστη
2019	Μακρυμάλλη	23.506	Ύποπτη Εμπρησμού
2021	Βόρεια Εύβοια (Λίμνη έως Αγριοβότανο)	512.032	Άγνωστη

Η πυρκαγιά στην περιοχή ξεκίνησε στις 3 Αυγούστου και διήρκεσε για 8 ολόκληρες μέρες έως τις 11 Αυγούστου και ήταν η πιο καταστροφική πυρκαγιά που έχει πλήξει τη περιοχή. Η επίσημη εστία έναρξης της πυρκαγιάς βρίσκεται κοντά στον οικισμό Μυρτιά, 5 χιλιόμετρα βορειοανατολικά της Λίμνης.

Η φωτιά τις 8 μέρες που μαινόταν ακολούθησε μια ανεξέλεγκτη πορεία και παρότι οι άνεμοι ήταν κυρίως νοτιοδυτικοί, έφτασε μέχρι το χωριό Αγριοβότανο, στην βορειοανατολική γωνία του νησιού.

Η συνολική καμένη έκταση έφτασε τα 512.031 στρέμματα ενώ τα 379.393 στρ. (74,1% της συνολικής έκτασης) αποτελούσαν δασικές εκτάσεις σύμφωνα με τον *Δασικό Χάρτη της Π.Ε. Ευβοίας*. Από τα 379.393 στρέμματα τα 150.025 έχουν κηρυχτεί στο παρελθόν αναδασωτέα, δηλαδή το 39,5% των καμένων δασών έχει ξανακαεί στο παρελθόν.

Σύμφωνα με τον *Χάρτη Βλάστησης της Ελλάδας της Γενικής Διεύθυνσης Δασών και Δασικού Περιβάλλοντος (Γ.Δ.Δ.Δ.Π.)* οι καμένες δασικές εκτάσεις αγγίζουν τα 335.166 στρ.(65,16% της συνολικής έκτασης) και είναι το άθροισμα εκτάσεων Χαλέπιου Πεύκης, Μαύρης Πεύκης, Ελάτης, Δρυός, θάμνων, παραποτάμιας βλάστησης και λιβαδιών. Το 60% των καμένων δασικών εκτάσεων καλύπτονταν από Χαλέπιο Πεύκη.

Οι διαφορές που εντοπίζονται σε σχέση με τους δασικούς χάρτες οφείλονται στην έλλειψη ακρίβειας και την παλαιότητα των δεδομένων του χάρτη Βλάστησης. Ωστόσο έχουμε μια πρώτη εικόνα για το είδος της βλάστησης σε θεωρητικό επίπεδο.

Με βάση το *Corine Land Cover 2018* δάση και δασικές εκτάσεις ανέρχονται στα 337.945 στρέμματα (66% των συνολικών καμένων εκτάσεων). Οι εκτάσεις αυτές είναι άθροισμα δάσους κωνοφόρων, μικτού δάσους, μεταβατικών δασικών και θαμνωδών εκτάσεων, δάσους πλατύφυλλων και εκτάσεων με αραιή βλάστηση.

Η διαφορά σε σχέση με τον Δασικό Χάρτη είναι η έλλειψη ακρίβειας των δεδομένων του Corine Land Cover αλλά και τη μεθοδολογία που έχει ακολουθηθεί για την παραγωγή δεδομένων.



Εικόνα 33 Καμένο Πενκόδασος στους Παπάδες

Πίνακας 6 Καμένες Εκτάσεις Ανά Τ.Κ. Δήμος Λίμνης-Μαντουδίου-Αγίας Άννας (ΥΛΗ, 2021)

Α/Α	Τοπική Κοινότητα	Συνολική έκταση(στρ.)	Καμένη έκταση(στρ.)	Ποσοστό καμένης επί συνολικής έκτασης
1	ΛΙΜΝΗΣ	46.166,31	31.628,42	68,51%
2	ΑΓΙΑΣ ΑΝΝΑΣ	27.100,04	26.334,37	97,17%
3	ΑΜΕΛΑΝΤΩΝ	18.600,73	18.600,73	100,00%
4	ΑΧΛΑΔΙΟΥ	19.136,09	18.772,78	98,10%
5	ΔΑΦΝΟΥΣΣΗΣ	39.601,71	2.287,89	5,78%
6	ΚΕΡΑΜΕΙΑΣ	5.342,83	5.342,83	100,00%
7	ΚΕΡΑΣΕΑΣ	21.574,79	21.574,79	100,00%
8	ΚΕΧΡΙΩΝ	16.327,79	13.244,92	81,12%
9	ΚΗΡΙΝΘΟΥ	16.838,59	7.571,24	44,96%
10	ΚΟΤΣΙΚΙΑΣ	9.912,95	9.431,80	95,15%
11	ΚΟΥΡΚΟΥΛΩΝ	34.244,71	34.244,71	100,00%
12	ΜΕΤΟΧΙΟΥ ΚΗΡΕΩΣ	9.693,14	987,73	10,19%
13	ΠΑΠΠΑΔΩΝ	26.811,33	26.416,61	98,53%
14	ΡΟΒΙΩΝ	57.663,11	54.842,70	95,11%
15	ΣΚΕΠΑΣΤΗΣ	7.021,74	6.955,99	99,06%
16	ΣΠΑΘΑΡΙΟΥ	40.981,38	25.294,90	61,72%
17	ΣΤΡΟΦΥΛΙΑΣ	12.276,41	11.510,76	93,76%
18	ΦΑΡΑΚΛΑΣ	8.533,31	7.145,75	83,74%
	ΣΥΝΟΛΟ	417.826,95	322.188,92	77,11%



Εικόνα 34 Καμένη Έκταση στη Στροφυλιά

Πίνακας 7 Καμένες Εκτάσεις Ανά Τ.Κ. Δήμου Ιστιαίας-Αιδηψού (ΥΛΗ,2021)

A/A	Τ.Κ.	Σύνολο δασών (στρ.)	Καμένα δάση (στρ.)	Ποσοστό καμένων δασών (%)
1	ΙΣΤΙΑΙΑΣ	3.098,02	6,52	0,21%
2	ΑΒΓΑΡΙΑΣ	3.582,21	641,35	17,90%
3	ΑΓΔΙΝΩΝ	7.365,74	7.365,74	100,00%
4	ΑΓΡΙΟΒΟΤΑΝΟΥ	10.352,21	10.019,44	96,79%
5	ΑΡΤΕΜΙΣΙΟΥ	2.059,75	1.804,11	87,59%
6	ΑΣΜΗΝΙΟΥ	5.640,48	4.460,57	79,08%
7	ΒΑΣΙΛΙΚΩΝ	22.364,02	21.075,47	94,23%
8	ΒΟΥΤΑ	31.870,70	24.170,68	75,84%
9	ΓΑΛΑΤΣΑΔΩΝ	13.173,01	2.804,63	21,29%
10	ΓΑΛΑΤΣΩΝΑΣ	8.000,84	7.920,76	99,00%
11	ΓΕΡΑΚΙΟΥΣ	8.834,56	8.773,16	99,30%
12	ΓΟΥΒΩΝ	9.010,51	8.810,77	97,78%
13	ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ	15.906,02	10.107,88	63,54%
14	ΚΑΜΑΡΙΩΝ	2.641,00	5,94	0,23%
15	ΚΟΚΚΙΝΟΜΗΛΕΑΣ	16.281,33	16.281,33	100,00%
16	ΚΡΥΟΝΕΡΙΤΗ	10.806,06	10.801,68	99,96%
17	ΜΗΛΕΩΝ	5.346,00	5.318,28	99,48%
18	ΜΟΝΟΚΑΡΥΑΣ	8.037,51	6.126,73	76,23%
	ΣΥΝΟΛΟ	184.370,00	146.495,05	79,46%



Εικόνα 35 Καμένη Έκταση στα Βασιλικά

Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογική Προσέγγιση

4.1 Δεδομένα που συλλέχθηκαν

- ❖ Δορυφορικές εικόνες Landsat-8 τριών περιόδων. Μια τον Οκτώβριο του 2020 (10 μήνες πριν την πυρκαγιά), μια τον Ιούνιο του 2021 (αμέσως πριν) και μια τον Αύγουστο του 2021 (αμέσως μετά)
- ❖ Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM), χωρικής ανάλυσης 25μ. από την υπηρεσία Copernicus.Eu
- ❖ Χάρτης Αγροτεμαχίων για τη περιοχή της Βόρειας Εύβοιας από τον ΟΠΕΚΕΠΕ
- ❖ Όρια Καποδιστριακών Δήμων από το geodata.gov.gr
- ❖ Χάρτης χρήσεων γης του Corine Land Cover
- ❖ Χάρτης απολογισμού της πυρκαγιάς από το Emergency Management Service – Mapping του Copernicus
- ❖ Μετεωρολογικά στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού Βάτερη (Λίμνη Ευβοίας) από 3/8/2021 έως 11/8/2021, από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών
- ❖ Θέση του σημείου έναρξης της πυρκαγιάς από τη Πυροσβεστική Υπηρεσία

4.2 Παραγωγή θεματικών επιπέδων

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς θα γίνει στο λογισμικό FlamMap. Για τη συγκεκριμένη διαδικασία απαιτούνται κάποια δεδομένα εισόδου, τα οποία αφορούν τη τοπογραφία της περιοχής, τη βλάστηση της, τις καιρικές συνθήκες και τις συνθήκες έναρξης της πυρκαγιάς.

Κάποια από αυτά τα δεδομένα αποτελούν θεματικά επίπεδα τα οποία πρέπει να δημιουργηθούν χρησιμοποιώντας άλλα λογισμικά όπως το QGIS και το eCognition.

Συγκεκριμένα δημιουργήθηκαν για τη περιοχή μελέτης:

- ❖ Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM)
- ❖ Χάρτης Κλίσεων πρανών (Slope)
- ❖ Χάρτης Προσανατολισμού πρανών (Aspect)
- ❖ Χάρτης βλάστησης (αντικειμενοστρεφής ταξινόμηση)
- ❖ Χάρτης Βαθμού Συγκόμωσης

Η διαδικασία αυτή αποτελεί το πρωταρχικό στάδιο της μελέτης και ξεκινάει με την οριοθέτηση της περιοχής η οποία θα μελετηθεί. Οι δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν προφανώς καλύπτουν μια μεγαλύτερη επιφάνεια και όχι μόνο τη περιοχή που κάηκε. Η περιοχή λοιπόν που επιλέχθηκε, δεν αποτελούταν μόνο από την τις εκτάσεις που καήκαν, αλλά από το σύνολο της Β. Εύβοιας, αφού η μελέτη δεν επικεντρώνεται μόνο στις συγκεκριμένες εκτάσεις αλλά στο πως θα μπορούσε να συμπεριφερθεί η πυρκαγιά με τα δεδομένα που έχουμε για την ευρύτερη περιοχή.



Εικόνα 36 Περιοχή μελέτης πριν την πυρκαγιά (Ιούνιος 2021)



Εικόνα 37 Περιοχή μελέτης μετά τη πυρκαγιά (Αύγουστος 2021)

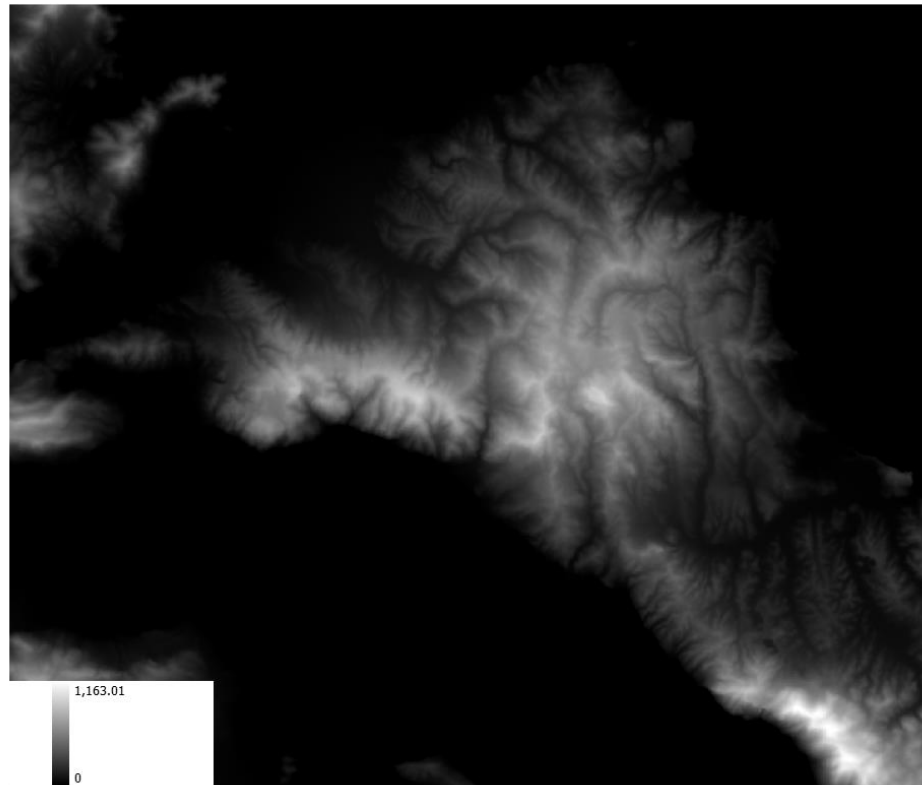
Χρησιμοποιήθηκε το έγχρωμο σύνθετο 5-4-3, το οποίο προσδίδει μια ικανοποιητική εικόνα της βλάστησης της περιοχής και των διαφοροποιήσεων της. Το έγχρωμο σύνθετο αυτό παρατηρεί ευρεία χρήση στην επιστήμη της φωτοερμηνείας γενικότερα, διότι όπως είναι αποδεδειγμένο η βλάστηση και συγκεκριμένα η χλωροφύλλη που εμπεριέχεται στο φύλλωμα της, αντανακλά στο ερυθρό κανάλι. Αυτό βοηθάει στο να ξεχωρίσει η βλάστηση από διάφορες άλλες καλύψεις, όπως οι ανθρωπογενείς κατασκευές, το γυμνό έδαφος κ.α. αλλά και στο να είναι εφικτή μια διαφοροποίηση της βλάστησης σε είδη, μέσω των φασματικών της υπογραφών. Για παράδειγμα, σε ένα αρχικό επίπεδο θα μπορούσε να γίνει διαχωρισμός των εκτάσεων πλατύφυλλων, τα οποία απεικονίζονται με ανοιχτό κόκκινο, με αυτές των κωνοφόρων που απεικονίζονται με πιο σκούρο κόκκινο χρώμα. Σε δεύτερο επίπεδο, θαμνώδεις εκτάσεις, αραιές δασικές εκτάσεις μπορούν με τη σειρά τους να ξεχωρίσουν με το μωβ ανοιχτό χρώμα τους. Τέλος, το έγχρωμο σύνθετο αυτό, είναι ένα πολύ καλό υπόβαθρο ώστε να οριοθετηθεί η καμένη έκταση, η οποία απεικονίζεται με τόνους του γαλάζιου και του γκρι.

4.2.1 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

Το Ψ.Μ.Ε πάρθηκε από την υπηρεσία Copernicus.eu (eu.Dem_v11). Το αρχικό αρχείο περιείχε το Ψ.Μ.Ε σχεδόν όλης της Ελλάδας και ένα μέρος της γειτονικής Τουρκίας, οπότε το αρχείο κόπηκε στα όρια της ορισμένης περιοχής μελέτης. Ταυτόχρονα, από το αρχείο

του Ψ.Μ.Ε, αφαιρέθηκε η μεταβλητή No Data, κάτι που θα χρησιμοποιηθεί και σε επόμενα θεματικά επίπεδα, μιας και είναι αναγκαία συνθήκη ώστε να γίνουν κάποιες μετέπειτα κινήσεις.

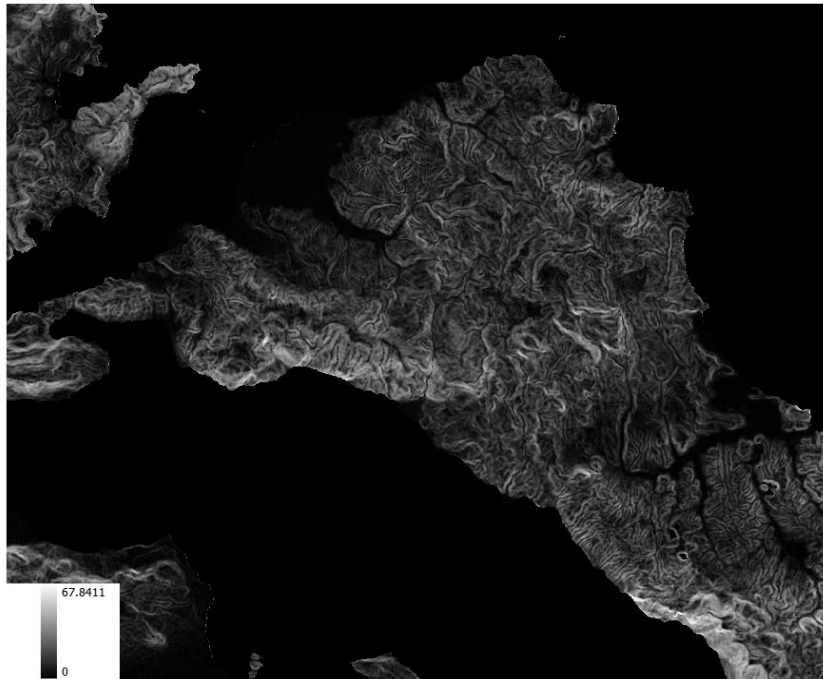
Οι τιμές του ορίζονται από το 0 έως τα 1.163m και αναφέρονται στο υψόμετρο της περιοχής.



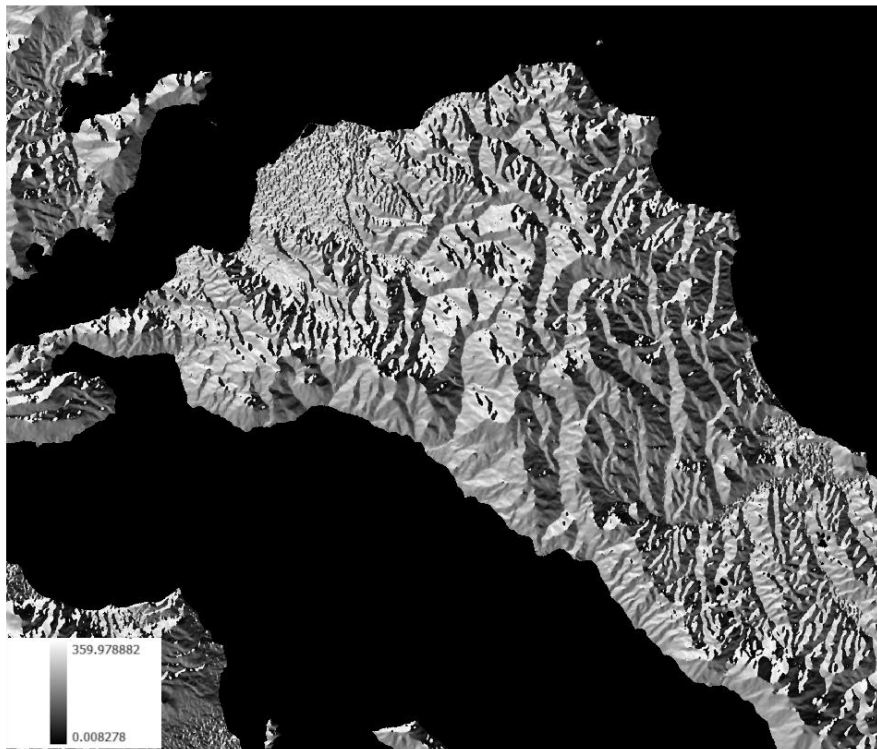
Εικόνα 38 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

4.2.2 Χάρτης Κλίσεων Πρανών (Slope) και Χάρτης Προσανατολισμού Πρανών (Aspect)

Οι δύο χάρτες δημιουργούνται στο λογισμικό QGIS, με τη χρήση της ομώνυμης εντολής (Raster → Analysis → Slope) και (Raster → Analysis → Aspect) . Σαν δεδομένο εισόδου χρησιμοποιείται το αρχείο του Ψ.Μ.Ε. Οι τιμές που παίρνει ο χάρτης κλίσεων ξεκινάνε από το 0 και φτάνουν τις 67,8 μοίρες ενώ ο χάρτης προσανατολισμού από το 0 έως τις 359,97 μοίρες.



Εικόνα 39 Χάρτης Κλίσεων Πρατών (Slope)



Εικόνα 40 Χάρτης Προσανατολισμού Πρατών (Aspect)

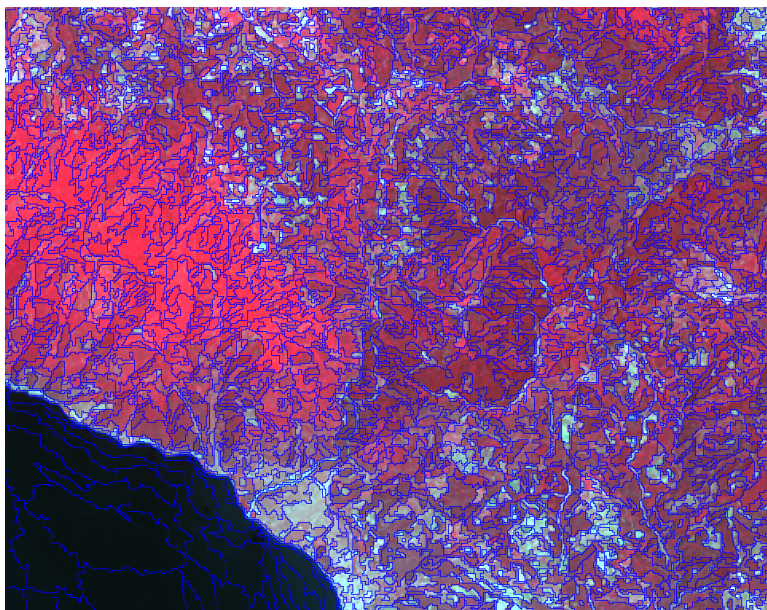
4.2.3 Χάρτης Καλύψεων Γης

Ο χάρτης βλάστησης είναι το αποτέλεσμα της ταξινόμησης που έγινε στην περιοχή μελέτης. Η ταξινόμηση αυτή έλαβε χώρα στο λογισμικό eCognition και πέρασε από διαφορετικά στάδια μέχρι να καταλήξει σε ένα τελικό θεμιτό αποτέλεσμα. Στην συγκεκριμένη ενότητα, θα αναλυθεί όλη η διαδικασία και τα στάδια που τελέστηκαν έως ότου να υπάρχει μια ικανοποιητική ταξινόμηση της περιοχής.

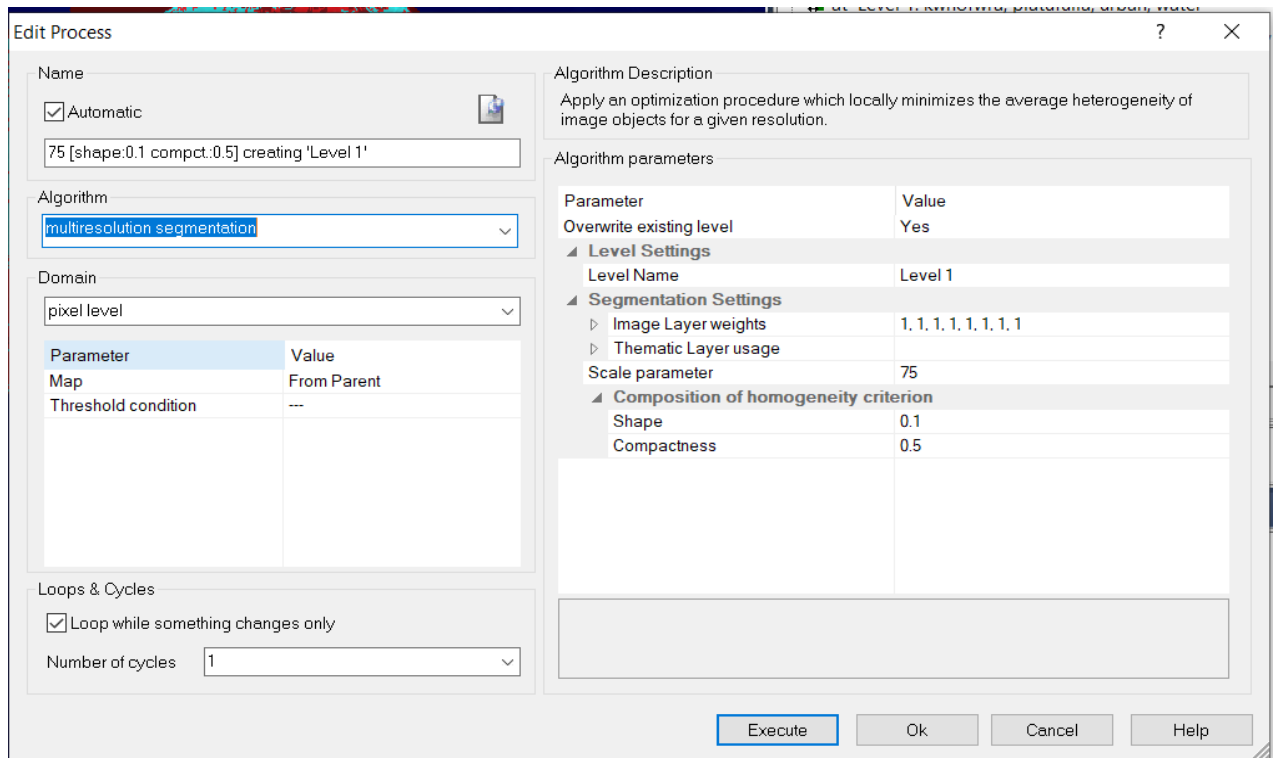
Αρχικά δημιουργήθηκαν δύο ξεχωριστά project. Το ένα αφορούσε τις χρονικές περιόδους πριν την πυρκαγιά στο οποίο εισήχθησαν οι δύο δορυφορικές εικόνες του Ιουνίου και του Οκτωβρίου και το αρχείο του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους. Το άλλο αφορούσε τη περίοδο της πυρκαγιάς και είχε ως εισόδους την εικόνα του Ιουνίου και του Αυγούστου και το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους. Το δεύτερο project αποσκοπούσε στην επιμέρους μελέτη της καμένης έκτασης και τη διερεύνηση στη βλάστηση της.

4.2.3.1 Δημιουργία Χάρτη Καλύψεων γης πριν την πυρκαγιά

Το αρχικό project ξεκινάει με την εισαγωγή των δεδομένων και την επιλογή των καναλιών ή των έγχρωμων σύνθετων με τα οποία θα απεικονίζονται οι εικόνες. Πρώτα επιλέχθηκε το έγχρωμο σύνθετο 5-4-3 για την εικόνα του Ιουνίου, ώστε να μελετηθεί ξεχωριστά. Επόμενο βήμα είναι η κατάτμηση της εικόνας (segmentation), ώστε να δημιουργηθούν πολύγωνα τόσα όσα και τα χρώματα και σχήματα της εικόνας. Τα πολύγωνα αυτά θα αποτελέσουν και τα δείγματα τα οποία θα επιλεχθούν για κάθε κατηγορία ταξινόμησης που θα δημιουργηθεί. Ως μέγεθος των πολυγώνων επιλέχθηκε το 75. Ως παράγοντες ομοιογένειας (homogeneity criterion) για σχήμα και συμπαγότητα επιλέχθηκαν το 0.1 και 0.5 αντίστοιχα, έπειτα από μερικές δοκιμές.



Εικόνα 41 Παράδειγμα κατάτμησης σε σημείο της εικόνας



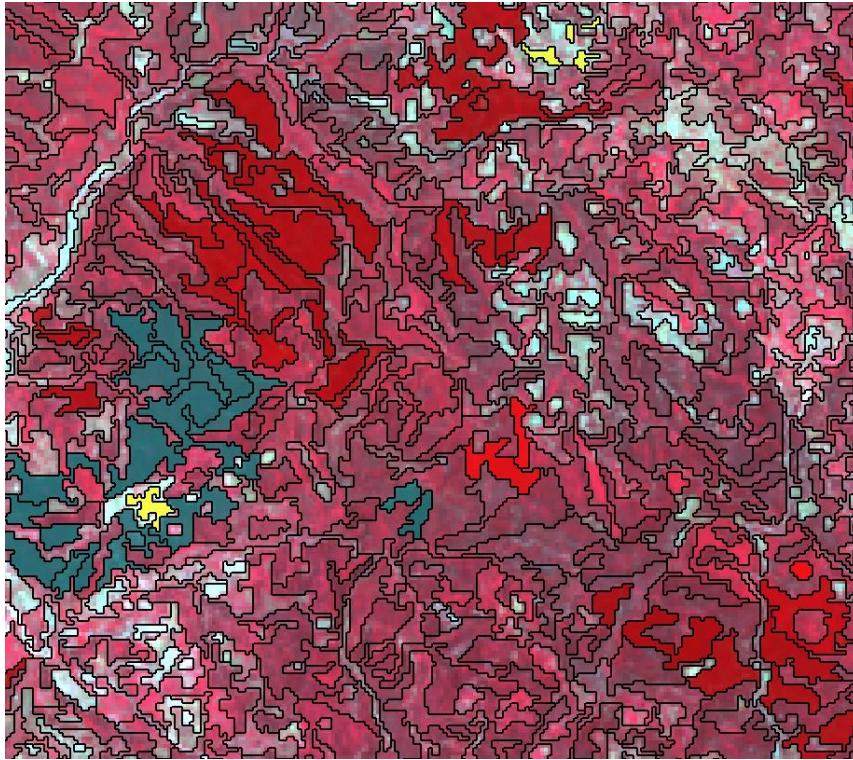
Εικόνα 42 Κατάτμηση (multiresolution segmentation) στο περιβάλλον του eCognition

Επόμενο βήμα, ήταν να οριστούν οι κλάσεις στις οποίες θα ταξινομηθεί η εικόνα. Οι πρώτες οι οποίες ορίστηκαν ήταν οι εξής:

- ❖ Κωνοφόρα
- ❖ Πλατύφυλλα
- ❖ Ελαιώνες
- ❖ Λοιπές Καλλιέργειες
- ❖ Θαμνώδεις περιοχές
- ❖ Νερό
- ❖ Γυμνό Έδαφος
- ❖ Αστικός Ιστός

Αμέσως ξεκίνησε ο ορισμός των δειγμάτων ανά κλάση. Τα δείγματα αυτών, επιλέχθηκαν με τη χρήση των πολυγώνων που δημιουργήθηκαν μετά τη κατάτμηση, με βάση τρία κριτήρια.

- ❖ Φωτοερμηνευτική μελέτη της περιοχής
- ❖ Εμπειρική γνώση της περιοχή
- ❖ Χρήση του Google Satellite για επαλήθευση



Εικόνα 43 Παράδειγμα δειγμάτων ταξινόμησης

Η επιλογή δειγμάτων σε μια τόσο μεγάλη περιοχή αποτελεί σίγουρα μια χρονοβόρα και κουραστική διαδικασία. Ειδικά όταν αποτελείται από ένα συνονθύλευμα χρήσεων και καλύψεων γης, με φασματικές υπογραφές οι οποίες δεν απέχουν σε μεγάλο βαθμό. Η επιλογή δειγμάτων μεταξύ των δασών κωνοφόρων, των θαμνωδών περιοχών και των ελαιώνων αποτέλεσε ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα της διαδικασίας. Πολλές φορές οι θαμνώδεις περιοχές, ταυτίζονταν με περιοχές αραιών κωνοφόρων ή και περιοχές καλλιέργειών και ελαιώνων. Στην επιλογή δειγμάτων, αυτό μπορούσε να λυθεί χρησιμοποιώντας το Google Satellite σαν υπόβαθρο στο QGIS, κάνοντας έτσι επαλήθευση των δειγμάτων κυρίως σε θαμνώδεις και δασικές περιοχές.

Οι καλλιέργειες και οι ελαιώνες δεν μπορούν να επαληθευτούν χρησιμοποιώντας την ίδια μέθοδο, διότι είναι δύο δυναμικές καλύψεις γης, οι οποίες αλλάζουν τακτικά. Υπάρχουν καλλιέργειες που μπορεί να έχουν ερημωθεί ή το αντίθετο, νέες καλλιέργειες σε σημεία γυμνού εδάφους ή θαμνωδών περιοχών. Επίσης, οι φασματικές υπογραφές των εν λόγω καλύψεων γης, ποικίλουν ανάλογα με την χρονική περίοδο των δορυφορικών εικόνων. Αλλιώς ανακλά μια περιοχή καλλιέργειών το φθινόπωρο και αλλιώς τη καλοκαιρινή περίοδο. Αυτό βέβαια εξαρτάται και από το είδος της καλλιέργειας, το κλίμα της περιοχής κ.α. Στοιχεία σαν αυτά είναι πρακτικά πολύ δύσκολο να διερευνηθούν με φωτοερμηνεία σε μια εικόνα με ένα απλό έγχρωμο σύνθετο.

Ακριβώς για τους παραπάνω λόγους, χρησιμοποιήθηκε και μια δορυφορική εικόνα από τον Οκτώβριο του 2020, δηλαδή μια εικόνα της κοντινότερης φθινοπωρινής περιόδου πριν την πυρκαγιά. Χρησιμοποιώντας τις δύο εικόνες, οι οποίες χρονικά είναι πριν την πυρκαγιά και δίνοντας βάση στις διαφορές τις οποίες αυτές οι δύο παρουσιάζουν στις

φασματικές υπογραφές τους, θα μπορούμε να έχουμε μια πιο ακριβή εικόνα της κατάστασης των καλλιεργειών.

Δείκτες NDVI

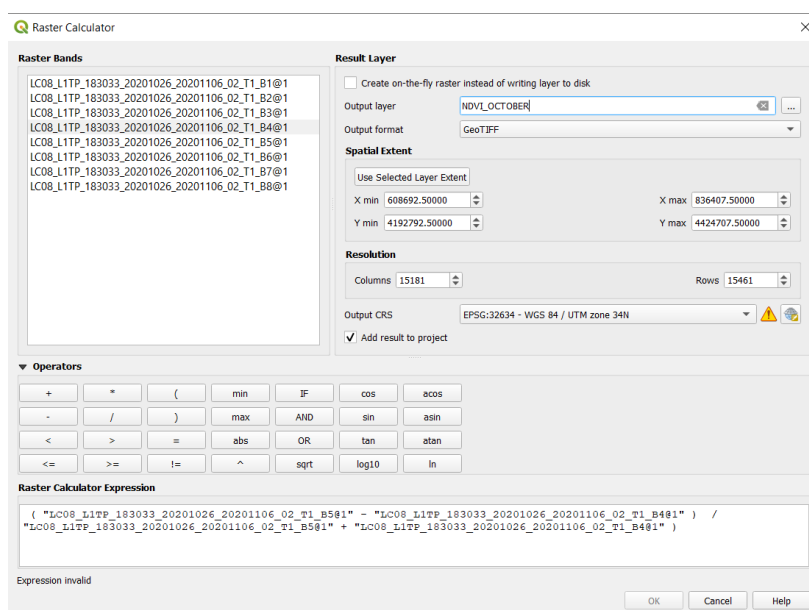
Για την διαδικασία αυτή δημιουργήθηκαν οι δείκτες βλάστησης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Η βλάστηση μπορεί εύκολα να ξεχωρίσει από τις υπόλοιπες καλύψεις γης με τη χρήση των σωστών συνδυασμών ή πράξεων καναλιών. Ο δείκτης NDVI ποσοτικοποιεί τη βλάστηση μετρώντας τη διαφορά μεταξύ του εγγύς-υπέρυθρου καναλιού (όπου η βλάστηση αντανακλά έντονα) και του κόκκινου καναλιού (στο οποίο η βλάστηση απορροφά). (GISGeography, 2022)

Οι τιμές που παίρνει είναι από το -1 έως το 1. Όσο πιο κοντά η τιμή του δείκτη βρίσκεται στο 1, τόσο πιο μεγάλη η πιθανότητα να κάνουμε λόγο για πυκνή βλάστηση. Όταν παίρνει αρνητικές τιμές, το πιο πιθανό είναι να μιλάμε για υδάτινο σώμα, ενώ όταν είναι κοντά στο 0, κάνουμε λόγο για αστικό ιστό και γυμνό έδαφος. Ο υπολογισμός του γίνεται με τον εξής τύπο:

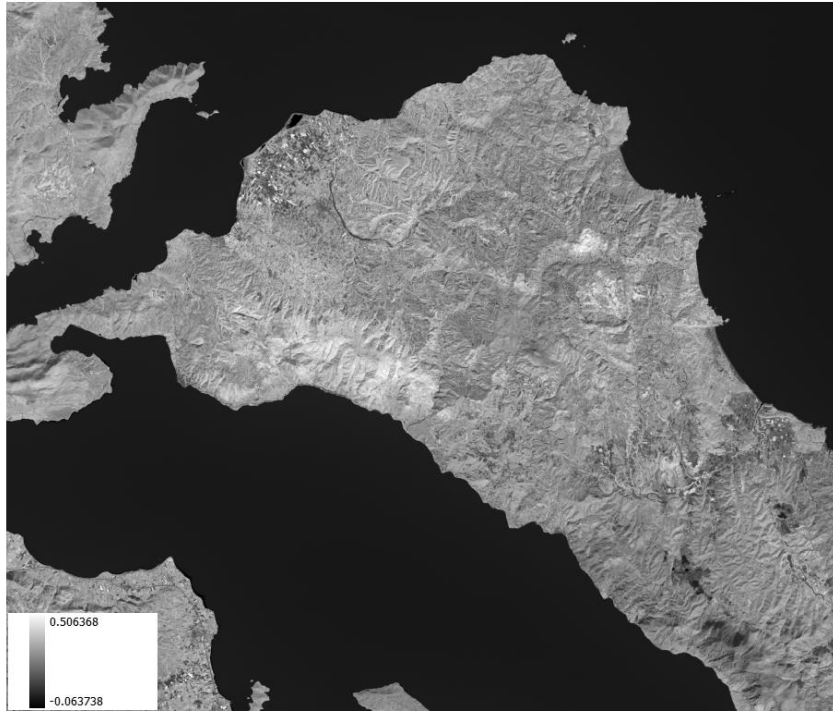
Εξίσωση 1 Υπολογισμός δείκτη NDVI

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

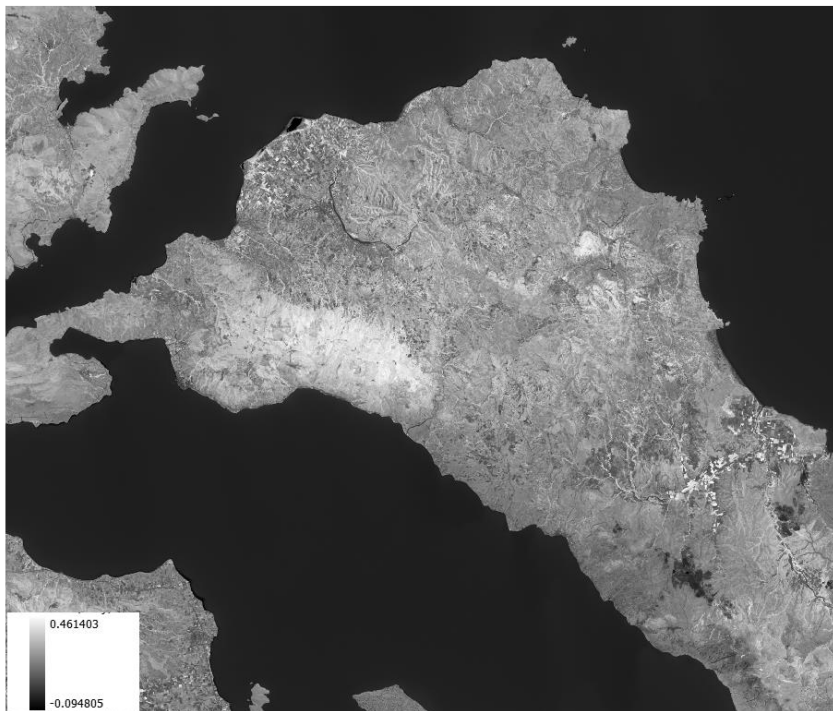
Ο υπολογισμός των δύο δεικτών NDVI (για κάθε εικόνα ξεχωριστά), έγινε στο λογισμικό QGIS, με τη χρήση του Raster Calculator, χρησιμοποιώντας τα εν λόγω κανάλια για τον Landsat 8, δηλαδή τα κανάλια 5 (NIR) και 4 (RED).



Εικόνα 44 Υπολογισμός δείκτη NDVI στο Raster Calculator του QGIS.

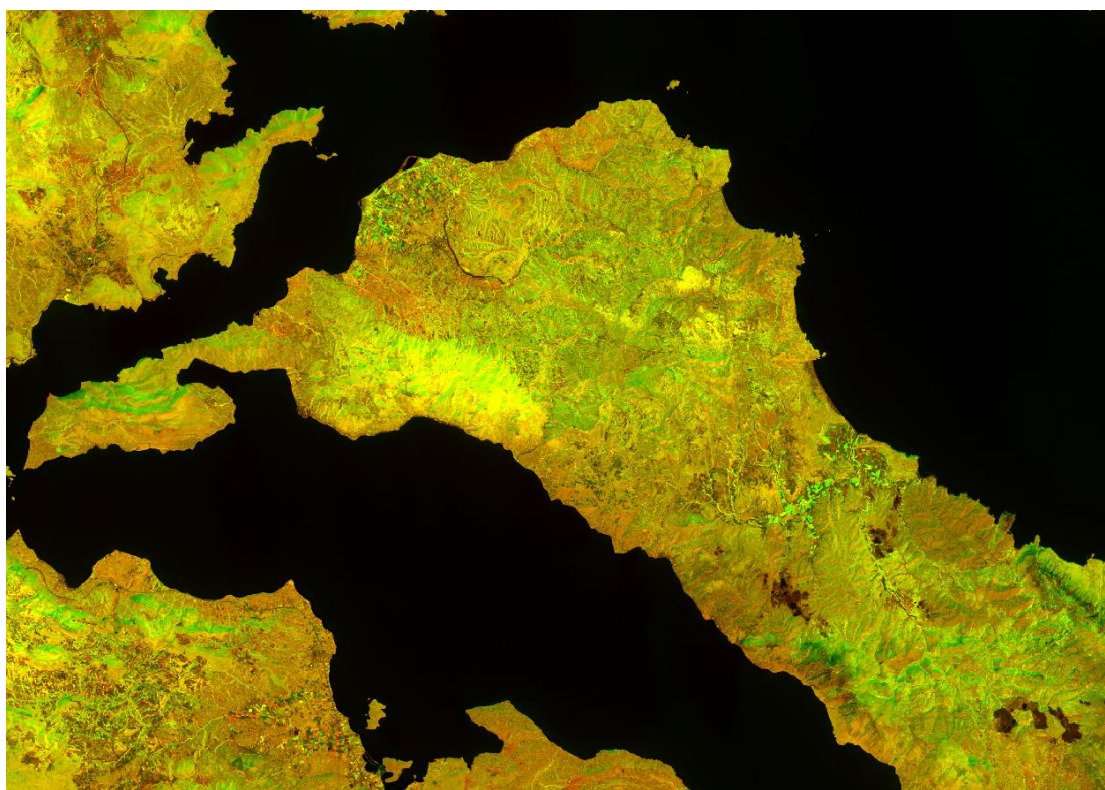


Εικόνα 45 Δείκτης NDVI Ιουνίου

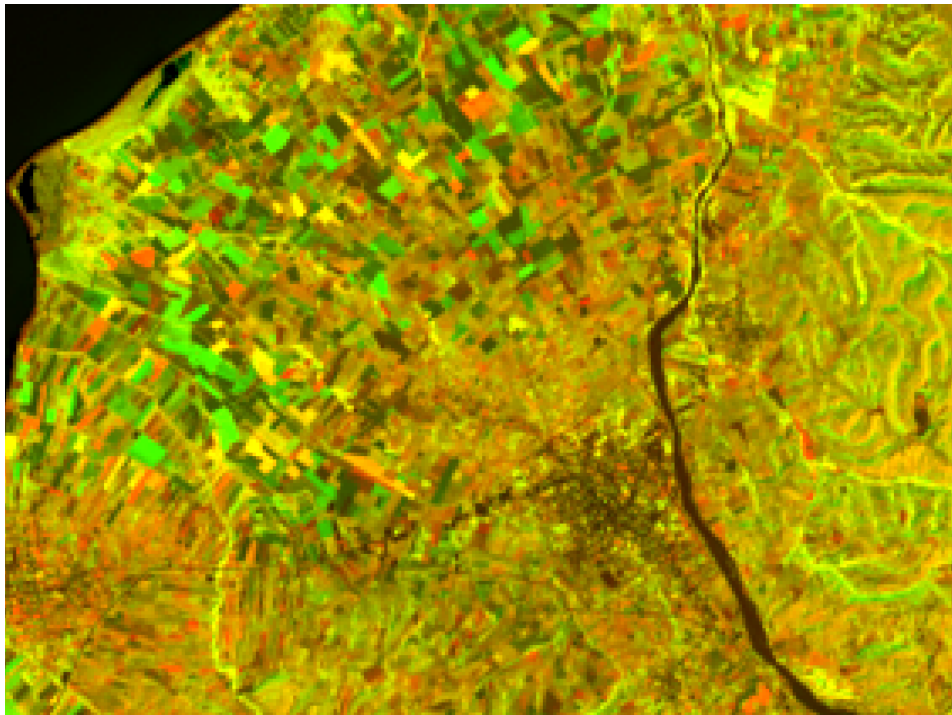


Εικόνα 46 Δείκτης NDVI Οκτωβρίου

Οι δύο αυτοί δείκτες έπειτα εισήχθησαν στο λογισμικό eCognition. Αφού έγινε η εισαγωγή, σειρά είχε η χρήση τους ως θεματικά επίπεδα. Στο εν λόγω λογισμικό μπορούν να χρησιμοποιηθούν, εκτός των κύριων καναλιών μιας εικόνας, δείκτες, εικόνες με υψομετρικά στοιχεία και λοιπά raster αρχεία ως κανάλια, τα οποία θέτονται σε ένα από τα κύρια χρώματα (RGB). Έτσι το αποτέλεσμα θέασης μπορεί να πάρει πολλές μορφές, ανάλογα με τις ανάγκες και τις χρήσεις. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, οι δύο δείκτες NDVI τέθηκαν ο ένας στο χρώμα κόκκινο (RED) και ο άλλος στο χρώμα πράσινο (GREEN). Το αποτέλεσμα αυτού μπορεί να γενικευθεί στις εξής αποτιμήσεις. Όπου ο χρήστης βλέπει πράσινο και κόκκινο χρώμα, τότε υπάρχει αλλαγή στη κάλυψη γης και συγκεκριμένα στη βλάστηση. Όπου ο χρήστης βλέπει κόκκινο χρώμα τότε σημαίνει πως υπάρχει υψηλή τιμή του δείκτη NDVI του μήνα Οκτωβρίου και χαμηλή τιμή στον δείκτη του Ιουνίου. Αυτό, μαρτυρά αλλαγή στη βλάστηση της περιοχής, δηλαδή πως τον Οκτώβριο η περιοχή καλυπτόταν με βλάστηση, ενώ τον Ιούνιο όχι. Το δεδομένο αυτό, μαζί με τη γνώση πως οι δασικές περιοχές παρουσιάζουν μικρές διαφορές, ειδικά σε τόσο μικρές χρονικές περιόδους, αφήνει ελεύθερο το πεδίο στο να θεωρηθεί πως οι περιοχές αυτές αποτελούν περιοχές καλλιεργειών. Ισχύει και το αντίθετο, για τις δύο χρονικές περιόδους. Όπου ο χρήστης βλέπει συνδυασμό των δύο χρωμάτων δηλαδή κίτρινο και αποχρώσεις του σημαίνει πως δεν υπάρχει κάποια αλλαγή ή αυτή είναι μικρής κλίμακας. Να ειπωθεί εδώ πως παρουσιάζονται κάποια σφάλματα σε περιοχές που στη πραγματικότητα δεν παρουσιάζουν κάποια αλλαγή στη κάλυψη γης τους, αλλά λόγω της σκίασης που χαρακτηρίζει τη μια εικόνα (Οκτώβριος 2020).



Εικόνα 47 Οι δύο δείκτες NDVI στο λογισμικό eCognition



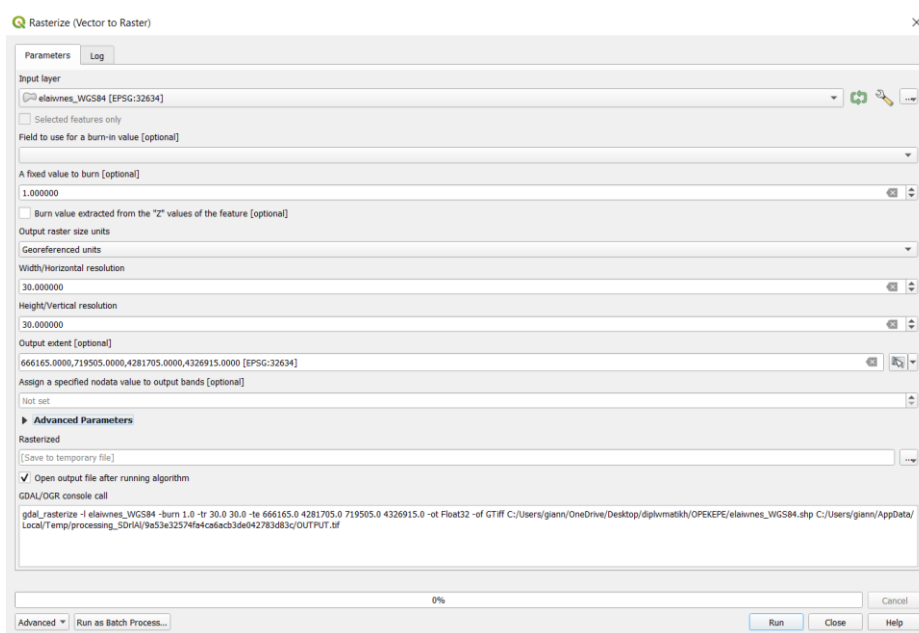
Εικόνα 48 Λεπτομέρεια 2 NDVI με έμφαση στις αλλαγές

Η μέθοδος αυτή μπορεί να βοηθήσει στην εύρεση των καλλιεργειών, αλλά σε μια περιοχή μελέτης τόσο μεγάλη και με τέτοια επικάλυψη στις τιμές των φασματικών υπογραφών μεταξύ των κατηγοριών βλάστησης, αυτό καθίσταται αρκετά δύσκολο. Ακόμα και με μια πολύ προσεκτική και ικανοποιητική σε αριθμό, δειγματοληψία, τα αποτελέσματα πάλι θα παρουσιάζουν αποκλίσεις.

Με βάση αυτό το εμπόδιο, δημιουργήθηκε η ανάγκη να συγκεντρωθούν οι καλλιέργειες ως θεματικό επίπεδο από κάποιον επίσημο φορέα. Ο Χάρτης Αγροτεμαχίων του ΟΠΕΚΕΠΕ (Οργανισμός Πληρωμών και Ελέγχου Κοινοτικών Ενισχύσεων Προσανατολισμού και Εγγυήσεων) παρείχε λεπτομερώς τα αγροτεμάχια της περιοχής μελέτης. Στη συνέχεια, ο χάρτης αυτός επεξεργάστηκε με βάση τις ανάγκες της μελέτης και τα αγροτεμάχια χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες: Ελαιώνες και Λοιπές Καλλιέργειες. Ο διαχωρισμός αυτός προκύπτει από το ότι ένα μεγάλο μέρος της αγροτικής ενασχόλησης στη περιοχή, χαρακτηρίζεται από τη καλλιέργεια ελιάς, οπότε αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό κάλυψης αγροτεμαχίων. Οι υπόλοιπες καλλιέργειες εισήχθησαν σε μια κατηγορία.

Τα στοιχεία αυτά του θεματικού επιπέδου του χάρτη αγροτεμαχίων, μετατράπηκαν σε

Raster αρχείο με τη χρήση της εντολής Rasterize (Raster→ Conversion→ Rasterize (Raster to Vector)).



Εικόνα 49 Χρήση του αλγορίθμου Rasterize στο QGIS

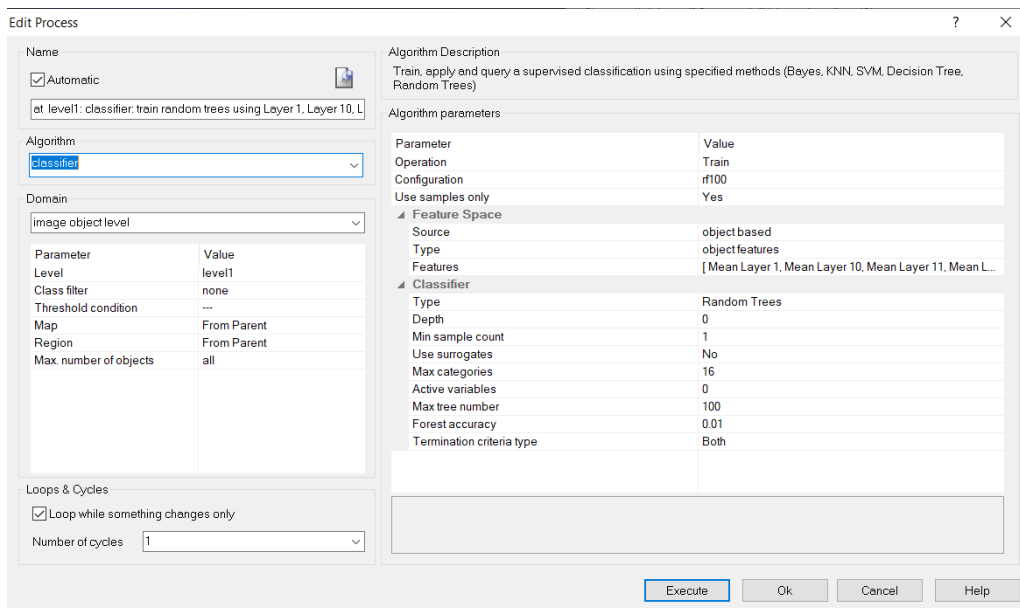
Σκοπός αυτής της διαδικασίας αυτής ήταν να αποφευχθεί η εισαγωγή των δύο αυτών κλάσεων στη διαδικασία της ταξινόμησης. Επομένως, η ταξινόμηση θα γίνει με 7 κλάσεις αντί για 9 και αυτές των ελαιώνων και καλλιεργειών θα εισαχθεί σε δεύτερο χρόνο στο αποτέλεσμα με τη χρήση συγκεκριμένων εντολών. Οι κλάσεις λοιπόν που απαρτίζουν τη διαδικασία της ταξινόμησης είναι πλέον οι:

- ❖ Πεύκη (Χαλέπιος και Μαύρη)
- ❖ Πλατύφυλλα
- ❖ Αστικός Ιστός
- ❖ Υδάτινα Σώματα
- ❖ Γυμνό Έδαφος
- ❖ Θαμνώδεις Περιοχές
- ❖ Φρύγανα

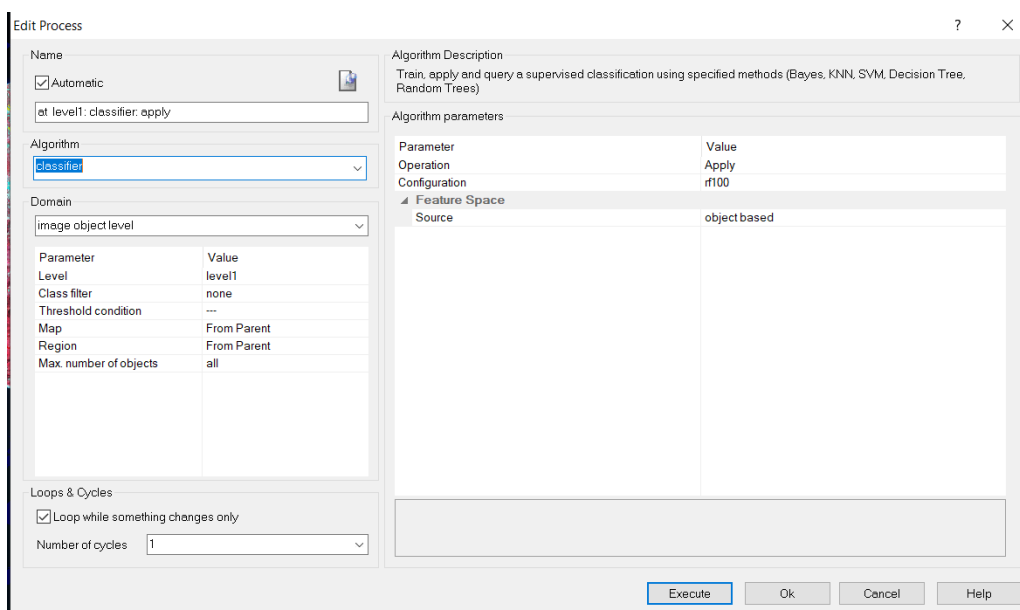
Ο αλγόριθμος ταξινόμησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο αλγόριθμος Random Forest. Ο αλγόριθμος αυτός, αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό μεμονωμένων δέντρων απόφασης (Decision Trees) που λειτουργούν ως σύνολο. Κάθε τυχαίο δέντρο απόφασης στον αλγόριθμο βγάζει μια πρόβλεψη κλάσης (κατηγορίας ταξινόμησης) και αυτή με τις περισσότερες 'ψήφους' γίνεται η πρόβλεψη του μοντέλου. (Towards Data Science, 2019)

Η επιλογή του συγκεκριμένου αλγορίθμου έγινε διότι μετά από δοκιμές με άλλους αλγορίθμους, όπως η ιεραρχική ταξινόμηση ή ο αλγόριθμος Decision Trees, έδινε το πιο ακριβές αποτέλεσμα στη συγκεκριμένη περίπτωση. Αυτό ήταν επακόλουθο της έλλειψης κανόνων ασαφούς λογικής που χαρακτήριζε τη συγκεκριμένη περίπτωση. Σε αντίθεση με

την ταξινόμηση της καμένης έκτασης, η οποία θα αναλυθεί στο επόμενο υποκεφάλαιο, δεν χρησιμοποιήθηκαν κανόνες ασαφούς λογικής. Οι μόνοι κανόνες που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στη συγκεκριμένη ταξινόμηση θα ήταν ένας κανόνας για την ταξινόμηση του νερού με βάση τον δείκτη NDWI και ένας ο οποίος θα χώριζε την κλάση Πεύκη σε δύο υποκατηγορίες: τη Μαύρη Πεύκη και την Χαλέπιο Πεύκη. Ο πρώτος κανόνας χρησιμοποιήθηκε στην επόμενη ταξινόμηση, μόνο για ακαδημαϊκούς σκοπούς, αφού η δειγματοληψία του νερού γίνεται με μεγάλη ευκολία και δεν υπάρχει περίπτωση να συγχυστεί με αντικείμενο άλλης κλάσης, ενώ ο δεύτερος κανόνας έπειτα από χρήση του, βγήκε το συμπέρασμα πως δεν είναι αναγκαίος αφού τα αποτελέσματα του είχαν ασήμαντες διαφοροποιήσεις, λόγω του χαμηλού προς μεσαίου μεγέθους υψόμετρο που χαρακτηρίζει τη περιοχή.

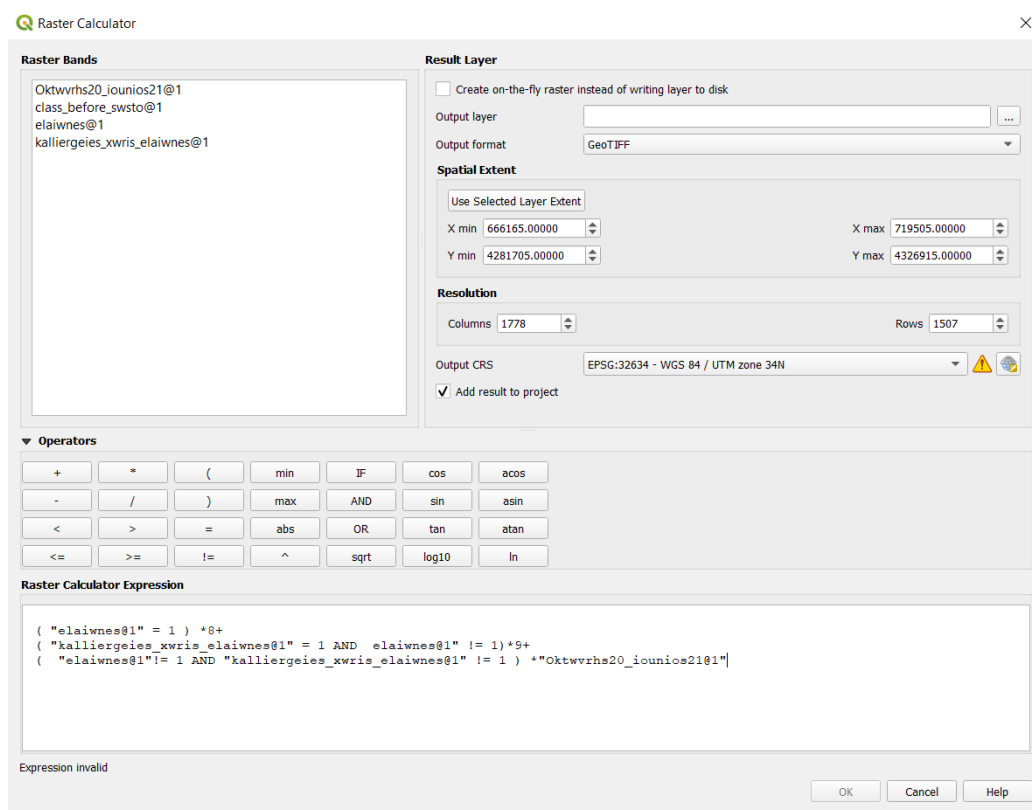


Εικόνα 50 Εκπαίδευση του αλγορίθμου Random Forest



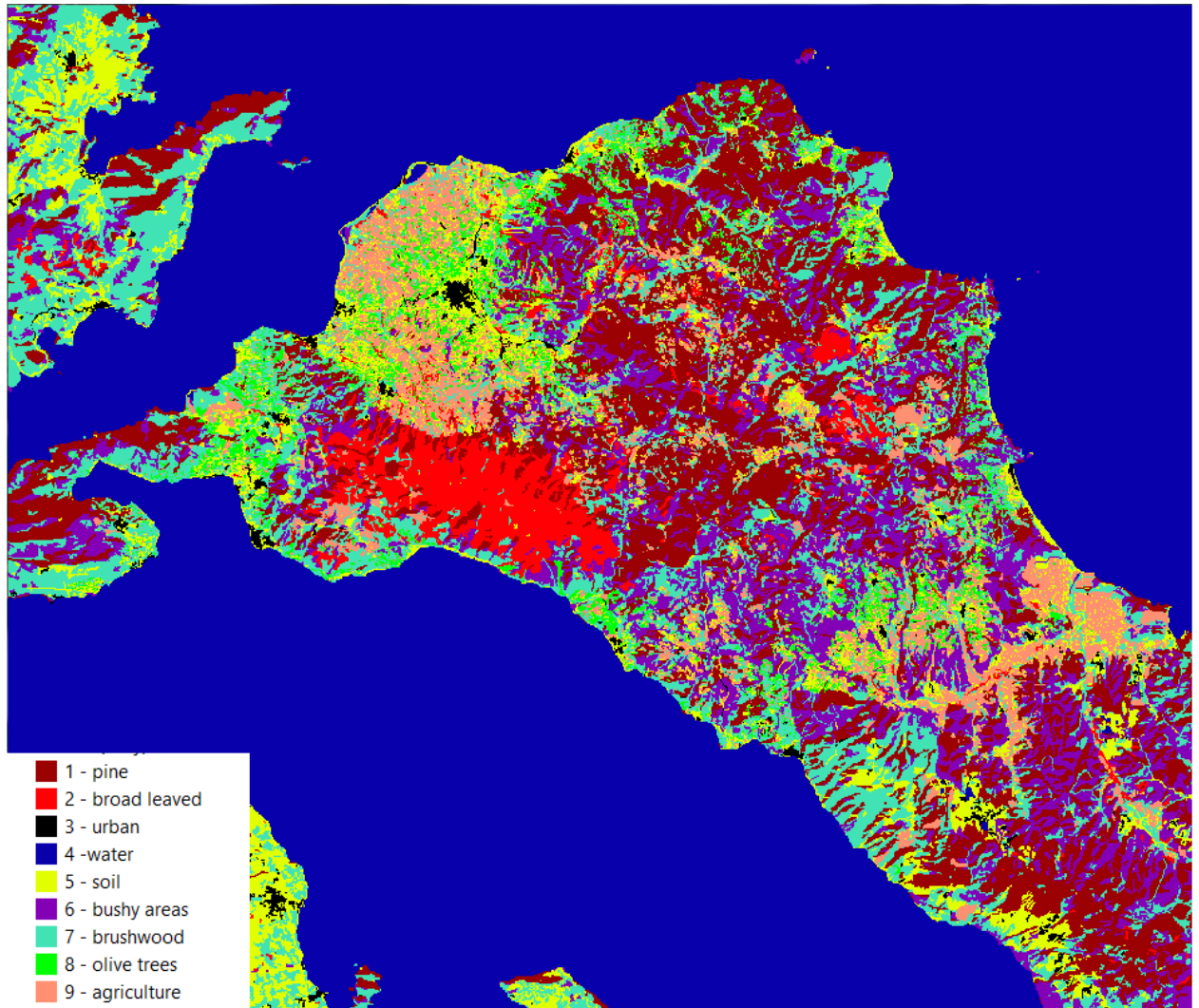
Εικόνα 51 Εκτέλεση του αλγορίθμου Random Forest.

Έπειτα, χρησιμοποιώντας το αποτέλεσμα της ταξινόμησης Random Forest και με τη χρήση του Raster Calculator στο QGIS, έγινε εισαγωγή των άλλων δύο κλάσεων. Οι κλάσεις μέχρι στιγμής είναι επτά οπότε οι πράξεις που έγιναν μεταξύ των τριών Raster αρχείων έχουν ως εξής:



Εικόνα 52 Πράξεις στο Raster Calculator για την εισαγωγή των κλάσεων "Καλλιέργειες" και "Ελαιώνες"

Η συγκεκριμένη πράξη έχει ως βασική λειτουργία την δημιουργία ενός νέου Raster αρχείου, το οποίο θα περιέχει τιμές και από τα τρία αρχεία που λαμβάνουν μέρος εντός της πράξης. Αρχικά, τα εικονοστοιχεία που αντιστοιχούν στην κλάση των ελαιώνων, παίρνουν την τιμή 8, δηλαδή την 8^η κλάση της ταξινόμησης, ενώ αυτά των λοιπών καλλιεργειών παίρνουν την τιμή 9, δηλαδή την 9^η κλάση. Τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία μένουν ως έχει και αντιστοιχούν στις υπόλοιπες κλάσεις όπως αυτές προσδιορίστηκαν από την ταξινόμηση Random Forest στο eCognition.



Εικόνα 53 Ταξινομημένη περιοχή μελέτης πριν την πυρκαγιά

Αυτό είναι το τελικό αποτέλεσμα της ταξινόμησης της περιοχής και αυτό που θα χρησιμοποιηθεί ως υπόβαθρο για το λογισμικό FlamMap. Η αποτύπωση των καλύψεων της περιοχής έχει γίνει με αρκετή ακρίβεια, ειδικά μετά την εισαγωγή των αγροτεμαχίων. Ο διαχωρισμός θαμνωδών περιοχών, περιοχών με φρύγανα και αραιών δασών κωνοφόρων επίσης έχει καταφέρει να αποτυπωθεί με κάποια ακρίβεια.

4.2.3.2 Δημιουργία Χάρτη Καλύψεων Γης Μετά την Πυρκαγιά

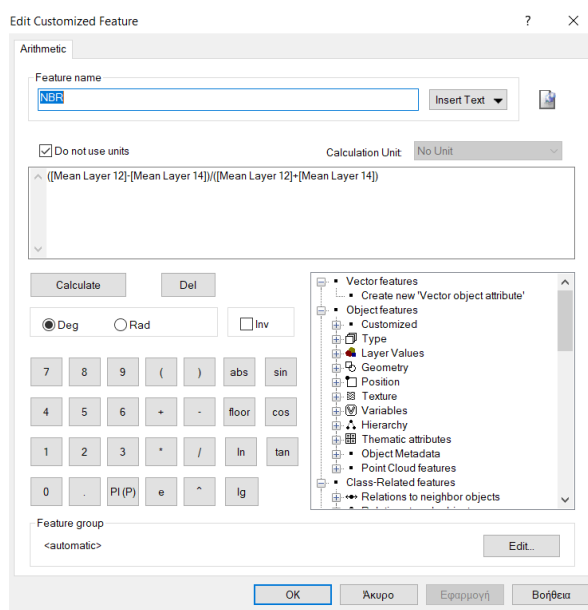
Ο χάρτης αυτός δημιουργήθηκε με σκοπό να χρησιμοποιηθεί σαν υπόβαθρο ελέγχου των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της πυρκαγιάς. Ακόμη ένας λόγος, ήταν η κατ'αποκλειστικότητα μελέτη της καμένης έκτασης ως προς τις καλύψεις γης της.

Για την οριοθέτηση της καμένης έκτασης δημιουργήθηκε ειδικός δείκτης ο οποίος αναδεικνύει την υγιή βλάστηση σε σχέση με την καμένη έκταση. Ο δείκτης αυτός

ονομάζεται Normalized Burn Index (NBR) και αποτελείται από μια πράξη των καναλιών SWIR-2 και NIR. Τα κανάλια αυτά στον Landsat 8 μεταφράζονται ως κανάλια 7 και κανάλι 5.

Εξίσωση 2 Δείκτης NBR

$$NBR = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2}$$



Εικόνα 54 Υπολογισμός Δείκτη NBR

Η δειγματοληψία που έγινε στην προηγούμενη ταξινόμηση μεταφέρθηκε αυτούσια σε αυτό το project με τη χρήση της εντολής Create TTA Mask from Samples (Classification → Samples → Create TTA Mask from Samples). Η εντολή αυτή εξάγει τα δείγματα που επιλέχθηκαν με ενσωματωμένη την πληροφορία για το ποια κλάση αντιπροσωπεύουν, χάρη στο αρχείο .csv το οποίο εξάγεται μαζί με το .tif αρχείο. Έπειτα, το αρχείο εισάγεται στο νέο project και δημιουργούνται οι αντίστοιχες κλάσεις με βάση τα δείγματα και τις κλάσεις στις οποίες αντιστοιχούσαν στη προηγούμενη ταξινόμηση.

Επειδή ακριβώς θέλουμε να διαχωριστεί η έκταση σε 2 κατηγορίες, θα δημιουργηθούν δύο ακόμα κλάσεις, γενικού περιεχομένου. Η μία θα αποτελεί την καμένη έκταση και η άλλη την υπόλοιπη. Μέσα στην καμένη έκταση θα εισαχθούν και όλες οι κλάσεις ταξινόμησης.

Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης ταξινόμησης δημιουργήθηκαν κανόνες ασαφούς λογικής, όσον αφορά τη καμένη έκταση και τα υδάτινα σώματα.

Πρώτα δημιουργήθηκε ο δείκτης Normalized Difference Water Index (NDWI). Τα υδάτινα σώματα απορροφούν έντονα το φως στο ορατό προς υπέρυθρο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Ο NDWI χρησιμοποιεί τα κανάλια GREEN και NIR (Πράσινο και Εγγύς Υπέρυθρο) για να τονίσει τα υδάτινα σώματα. (SentinelHub)

Στον Landsat 8 τα κανάλια αυτά μεταφράζονται σε κανάλια 3 (GREEN) και κανάλι 5 (NIR)

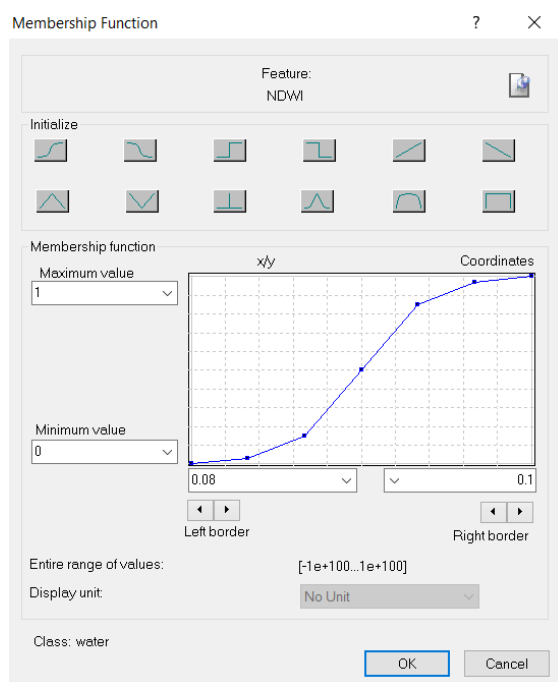
Εξίσωση 3 Δείκτης NDWI

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$



Εικόνα 55 Δείκτης NDWI

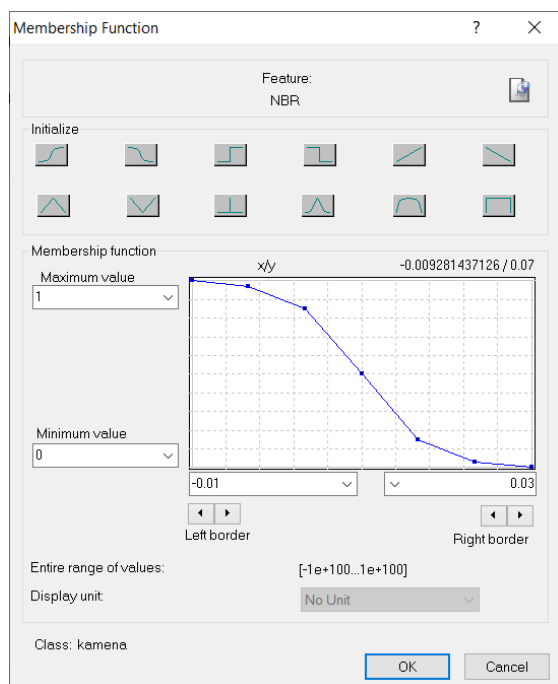
Έπειτα από μελέτη των τιμών του δείκτη στη περιοχή, ο τελικός κανόνας που χρησιμοποιήθηκε για να εξασφαλίσει τον διαχωρισμό των υδάτινων σωμάτων από τις υπόλοιπες καλύψεις γης είναι ο παρακάτω.



Εικόνα 56 Κανόνας Ασαφούς Λογικής NDWI

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται πως τα πολύγωνα που θα ταξινομηθούν ως υδάτινα σώματα, θα έχουν ως μέση τιμή το 0,09 και πάνω. Η τιμή αυτή εξασφαλίζει την ταξινόμηση των υδάτινων σωμάτων και μόνο, αφήνοντας εκτός τις περιοχές εδάφους με πολύ υγρασία, οι οποίες μπορεί να “μπερδεύουν” τον δείκτη.

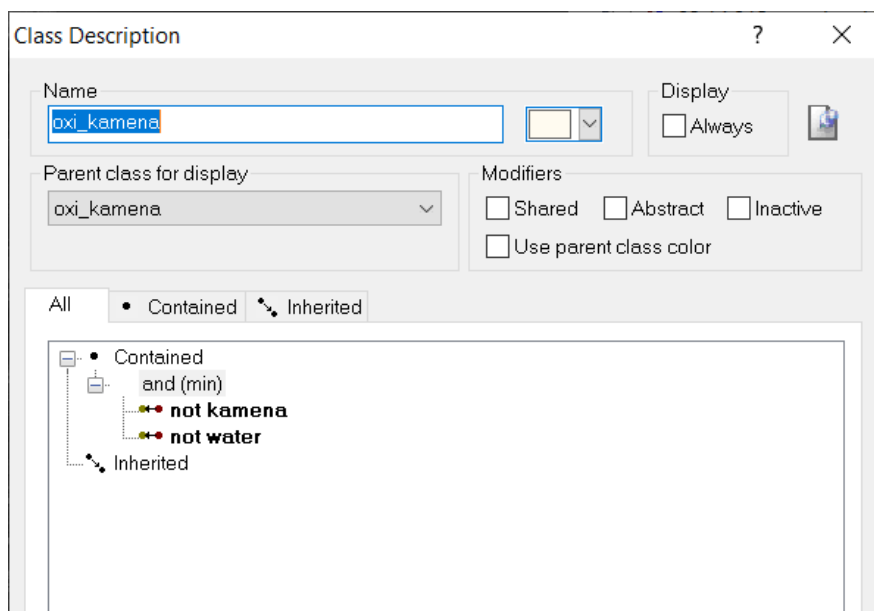
Ο επόμενος κανόνας αφορά την οριοθέτηση της καμένης έκτασης. Εδώ χρησιμοποιείται ο δείκτης NBR, που αναφέρθηκε παραπάνω.



Εικόνα 57 Κανόνας Ασαφούς Λογικής NBR

Σε αυτόν τον κανόνα, φαίνεται πως τα πολύγωνα τα οποία θα ταξινομηθούν ως καμένη έκταση, θα έχουν μέση τιμή 0.015 και κάτω. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε έπειτα από μελέτη των τιμών της καμένης έκτασης, κάτι το οποίο αποτέλεσε μια δύσκολη δουλειά, αφού δεν υπάρχει οριοθετημένη καμένη έκταση με ακρίβεια. Οι περισσότερες προσπάθειες έχουν γίνει με έναν πιο γενικό τρόπο, οριοθετώντας ένα μεγάλο πολύγωνο το οποίο περιέχει χονδρικά όλη την καμένη έκταση και τις περιοχές που έχουν πιθανώς πάθει ζημιά. Σε ένα γενικό πλαίσιο, όλα τα πολύγωνα τα οποία παρουσιάζουν αρνητικές τιμές, αποτελούν την καμένη έκταση. Όμως, δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στην μελέτη των τιμών, ταυτόχρονα με φωτοερμηνεία, γίνεται αντιληπτό πως και κάποια μέρη τα οποία παρουσιάζουν θετικές τιμές, πολύ μικρές σε τάξη μεγέθους, αποτελούν κομμάτι της καμένης έκτασης.

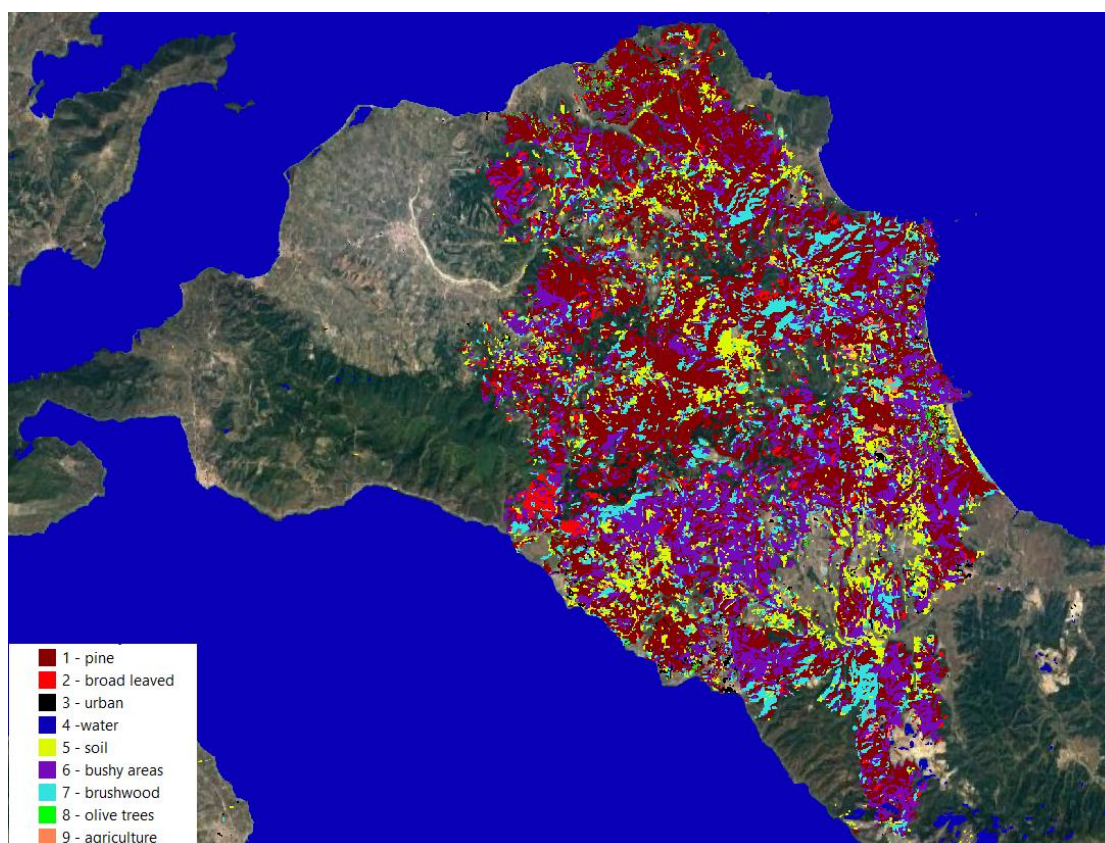
Ο κανόνας αυτός οριοθετεί την καμένη έκταση, μέσα στην οποία εκχωρούνται όλες οι κατηγορίες ταξινόμησης. Ο προσδιορισμός της μη-καμένης έκτασης γίνεται απλώς με την αντιστροφή των παραπάνω δύο κανόνων, αφήνοντας έτσι μόνο τα πολύγωνα τα οποία δεν μπορούν να ταξινομηθούν ούτε ως νερό αλλά ούτε και ως καμένη έκταση, ελεύθερα.



Εικόνα 58 Κανόνας Ασαφούς Λογικής για τις μη-καμένες εκτάσεις

Όπως ειπώθηκε παραπάνω, η ταξινόμηση που χρησιμοποιήθηκε εδώ είναι η ιεραρχική ταξινόμηση. Η ανάγκη αυτή προέκυψε από την ύπαρξη των κανόνων ασαφούς λογικής, κάτι που ο αλγόριθμος Random Forest δεν καλύπτει. Παρατηρούνται κάποιες μικρές διαφορές στα αποτελέσματα των δύο ταξινομήσεων, τα οποία αφορούν κυρίως τις κλάσεις των θαμνωδών εκτάσεων, του γυμνού εδάφους και των φρύγανων. Θεωρείται, πως η ταξινόμηση Random Forest, έδωσε καλύτερα αποτελέσματα, στις περιοχές που προκαλούν σύγχυση λόγω των κοντινών φασματικών υπογραφών τους.

Το τελικό αποτέλεσμα της ταξινόμησης προκύπτει χρησιμοποιώντας την ίδια διαδικασία με την προηγούμενη ταξινόμηση. Δηλαδή, οι κλάσεις των καλλιεργειών και των ελαιώνων θα κοπούν στα όρια της εικόνας της ταξινόμησης και τα τρία μαζί Raster αρχεία, μέσω του Raster Calculator, δημιουργούν το τελικό αποτέλεσμα. Οι κλάσεις που προκύπτουν είναι οι ίδιες, καθώς δεν χρειάζεται να απεικονιστεί η καμένη έκταση, αφού εννοείται η ύπαρξή της.



Εικόνα 59 Αποτέλεσμα ιεραρχικής ταξινόμησης περιοχής μελέτης μετά την πυρκαγιά

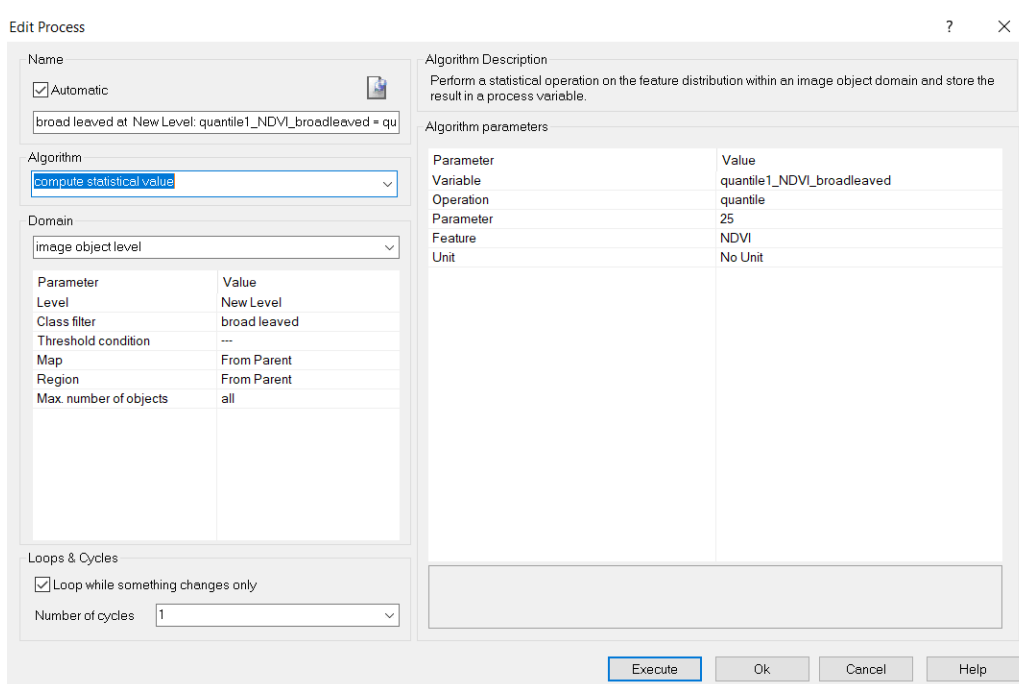
Το αποτέλεσμα αυτής της ταξινόμησης θα χρησιμοποιηθεί σαν υπόβαθρο, για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Φαίνεται πως το μεγαλύτερο μέρος της καμένης έκτασης αποτελείται από δάσος κωνοφόρων, θαμνώδεις εκτάσεις και φρύγανα. Μέσα σε αυτό υπάρχουν καλλιέργειες και κυρίως ελαιώνες, αλλά σε μικρότερο βαθμό σίγουρα από τις υπόλοιπες καλύψεις. Ακόμη, υπάρχει μικρό ποσοστό περιοχών που αποτελούνται από πλατύφυλλα, είτε μόνες τους, είτε ανάμεσα σε περιοχές κωνοφόρων, κάτι που επαληθεύει την ύπαρξη μεικτών δασών στην καμένη έκταση, όπως ήταν ήδη γνωστό.

4.2.4 Δημιουργία Χάρτη Βαθμού Συγκόμωσης

Μετά την ταξινόμηση της περιοχής, σειρά έχει η δημιουργία του χάρτη βαθμού συγκόμωσης της βλάστησης (Canopy Cover). Ο χάρτης αυτός αποτελείται από τις κλάσεις της ταξινόμησης που έχουν τις μεγαλύτερες τιμές στον δείκτη NDVI. Αυτές είναι και οι κλάσεις οι οποίες αποτελούν την κύρια καύσιμη ύλη της περιοχής, δηλαδή η πέυκη, τα πλατύφυλλα και οι θαμνώδεις εκτάσεις.

Αρχικά δημιουργήθηκε ο δείκτης NDVI και με βάση αυτόν και τις κλάσεις που είχαν δημιουργηθεί υπολογίστηκαν τα δεδομένα που χρειάστηκαν για τον χάρτη. Γίνεται η παραδοχή πως ο βαθμός συγκόμωσης της κάθε κλάσης έχει γραμμική σχέση με τον δείκτη NDVI, αφού λόγω των διαφοροποιήσεων τους θα ανακλάνε σε διαφορετικά εύρη τιμών. Η παραδοχή αυτή έχει βάση τη διάκριση των κατηγοριών βλάστησης με βάση το φύλλωμα τους, το οποίο είναι και αυτό που ανακλά έντονα, λόγω της χλωροφύλλης, στο υπέρυθρο κανάλι.

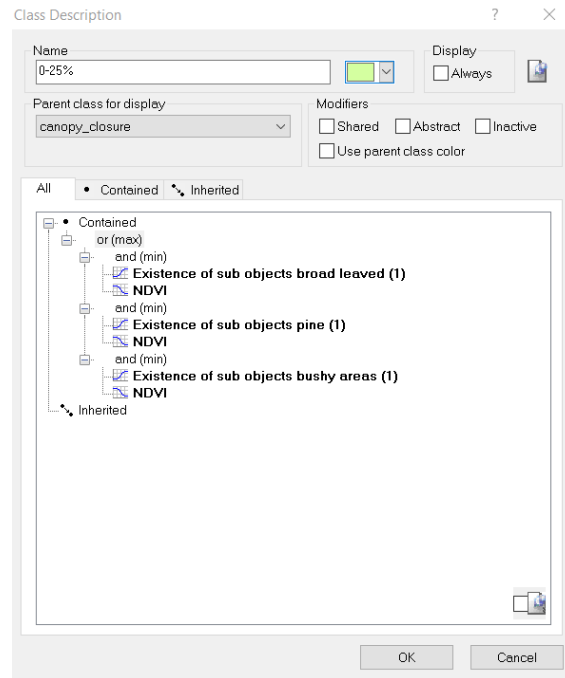
Για την πραγμάτωση αυτών, με τη χρήση της εντολής Compute Statistical Value (Υπολογισμός Στατιστικής Τιμής) και τη στατιστική λειτουργία Quantile (ποσοστό) δημιουργήθηκαν τρεις τιμές για κάθε κλάση. Ο δείκτης NDVI έχει εύρος τιμών από '-1' έως '1'. Τα ποσοστά που δημιουργήθηκαν από την παραπάνω εξίσωση, χώρισαν τις τιμές του δείκτη για κάθε κατηγορία ανάλογα με τη πυκνότητα τους σε 4 'κομμάτια'.



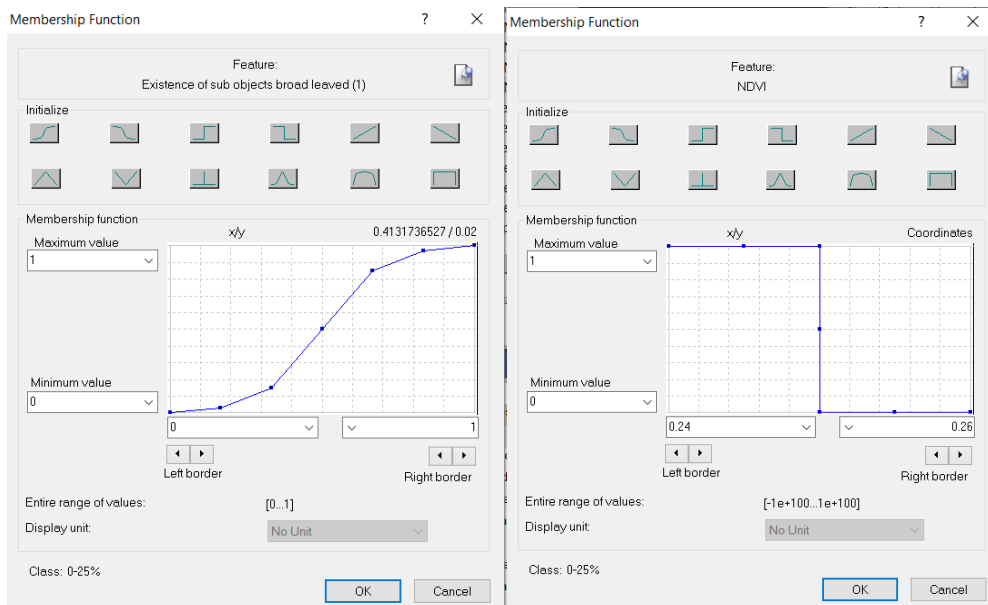
Εικόνα 60 Υπολογισμός της στατιστικής τιμής quantile. Παράδειγμα κλάσης πλατύφυλλων

Έχοντας τώρα για κάθε κλάση τις τιμές των ποσοστών πυκνότητας 25,50,75 (%) στον δείκτη NDVI, μπορούν να δημιουργηθούν οι κατηγορίες την τελική ταξινόμηση τους. Δημιουργείται ένα κλάση με το όνομα canopy_cover, η οποία αποτελείται από τέσσερις

υποκλάσεις: 0-25%, 25-50%, 50-75%,75-100%. Μέσα σε αυτές εκχωρούνται όλες οι κλάσεις βλάστησης που αναφέρθηκαν παραπάνω, με τη χρήση κανόνων ασαφούς λογικής. Οι κανόνες αυτοί έχουν να κάνουν με την εισαγωγή των εκάστοτε κλάσεων αλλά και την οριοθέτησή τους με βάση τις τιμές που υπολογίστηκαν με τη χρήση του αλγορίθμου Compute Statistical Value.



Εικόνα 61 Κανόνες ασαφούς λογικής για τη δημιουργία του Χάρτη Βαθμού Συγκόμωσης



Εικόνα 62 Παράδειγμα κανόνων ασαφούς λογικής εισαγωγής της κλάσης των πλατύφυλλων στην κλάση "0-25%"

Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζει τον βαθμό συγκόμωσης του μεγαλύτερου μέρους της καύσιμης ύλης της περιοχής. Οι κατηγορίες βλάστησης που επιλέχθηκαν, ήταν αυτές που έχουν την μεγαλύτερη επίδραση στη διάδοση μιας πυρκαγιάς. Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 63 Χάρτης Βαθμού Συγκόμωσης

4.3 Προσομοίωση στο λογισμικό FlamMap

Οι προετοιμασίες για την έναρξη της διαδικασίας της προσομοίωσης είναι σχεδόν έτοιμες. Τα δεδομένα που απαιτούνται για τη δημιουργία του αρχείου Landscape έχουν δημιουργηθεί, ωστόσο χρειάζονται ακόμα μια σειρά δεδομένων και αρχείων τα οποία είναι ιδιαίτερης σημασίας για την προσομοίωση και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της.

4.3.1 Αντιστοίχιση κλάσεων με Μοντέλα Καύσιμης Ύλης

Ίσως η πιο σημαντική δουλειά που πρέπει να γίνει για να εξασφαλιστεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, είναι η αντίστοιχη των κλάσεων της ταξινόμησης που επιλέχθηκαν, με τα σωστά M.K.Y. Η αντιστοίχιση έγινε σύμφωνα με την μελέτη των Scott & Burgan, “*Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel’s Surface Fire Spread Model*” (2005). Η μελέτη αυτή των δύο, αποτελεί έναν πολύ αναλυτικό οδηγό για αυτήν τη διαδικασία, αφού στο εσωτερικό της έχει στοιχεία και εικόνες για μια πολύ μεγάλη γκάμα καλύψεων γης και αντίστοιχων M.K.Y. Ταυτόχρονα, αποτελεί και τη μια από τις δύο μεθόδους αντιστοίχισης του λογισμικού (με την άλλη να είναι του Finney (2004)).

Τα μοντέλα θα χωριστούν σε δύο υποκατηγορίες με βάση τις ιδιότητες τους. Αυτές οι υποκατηγορίες απαρτίζονται από τα “άκαυστα” (οικισμοί, γυμνό έδαφος, καλλιέργειες, και υδάτινα σώματα) και τα “καύσιμα” (κωνοφόρα, πλατύφυλλα, θαμνώδεις εκτάσεις, φρύγανα, ελαιώνες). Παρακάτω θα παρουσιαστούν, τα μοντέλα καύσιμης ύλης τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά άξοντα αριθμό.

Η πρώτη κατηγορία που αντιστοιχήθηκε ήταν των άκαυστων μοντέλων και η πρώτη κλάση οι οικισμοί. Αυτοί αντιστοιχήθηκαν με το μοντέλο NB1 (91) Urban/Developed.

NB1 (91)

Urban/Developed



Εικόνα 64 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για τους οικισμούς (Scott & Burgan, 2005)

Επόμενη κλάση ήταν αυτή των καλλιεργειών, η οποία αντιστοιχήθηκε με το μοντέλο NB3 (93) Agricultural. Η επιλογή της αντιστοίχισης των καλλιεργειών ως άκαυστο μοντέλο είναι επακόλουθο της συντήρησης της οποία επιδέχονται κατά της διαχείριση τους. Δηλαδή, αυτές καθαρίζονται συχνά από τη φυσική βλάστηση, η οποία φυτρώνει και κατά δεύτερον δημιουργούνται ζώνες γυμνού εδάφους γύρω τους ως οριοθέτηση, τις περισσότερες φορές. Αυτό δεν σημαίνει πως θα μπορούσαν να αποτελέσουν κομμάτι της

καμένης έκτασης, αν περιτριγυρίζονται από άλλα καύσιμα, τα οποία είναι ‘‘αγωγός’’ της πυρκαγιάς (π.χ. κωνοφόρα δέντρα)

NB3 (93)

Agricultural

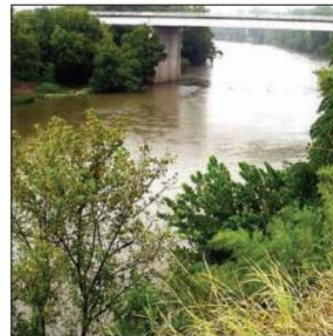
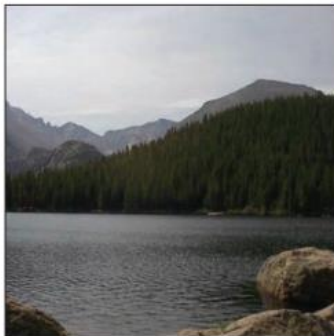


Εικόνα 65 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για τις καλλιέργειες (Scott & Burgan, 2005)

Σειρά έχει η αντιστοίχιση των υδάτινων σωμάτων. Το μοντέλο στο οποίο αντιστοιχήθηκαν είναι το NB8 (98) Open Water.

NB8 (98)

Open Water



Εικόνα 66 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για τα υδάτινα σώματα (Scott & Burgan, 2005)

Τέλος, για τα ‘‘άκαυστα’’ μοντέλα ακολουθεί το γυμνό έδαφος. Αυτό αντιστοιχήθηκε στο NB9 (99) Bare Ground.

NB9 (99)

Bare Ground

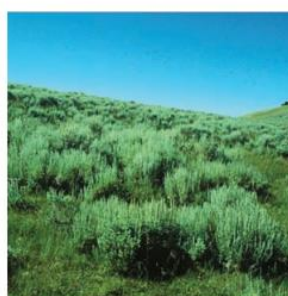
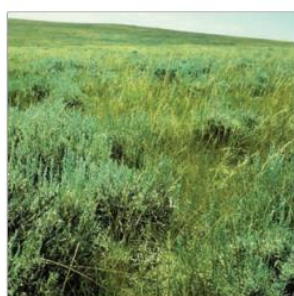


Εικόνα 67 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για το γυμνό έδαφος (Scott & Burgan, 2005)

Συνέχεια έχουν τα ‘‘καύσιμα’’. Εδώ η αντιστοίχιση αποτελεί μια απαιτητική δουλειά, αφού δεν υπάρχει ακριβής ταύτιση των καλύψεων γης, όπως υπήρχε στα ‘‘άκαυστα’’ μοντέλα. Πρώτη κατηγορία ήταν τα φρύγανα. Αυτά αντιστοιχήθηκαν με την κατηγορία GS2 (122) Moderate Load, Dry Climate Grass-Shrub, η οποία χαρακτηρίζεται από γρασίδι και μικρού μεγέθους θάμνους.

GS2 (122)

Moderate Load, Dry Climate Grass-Shrub (Dynamic)



Εικόνα 68 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για τα φρύγανα (Scott & Burgan, 2005)

Επιλέχθηκε αυτή η κατηγορία, διότι περιλαμβάνει και τις χορτολιβαδικές εκτάσεις (παρατημένες και μη) και τις περιοχές αραιών και μικρών θάμνων. Έχει μεσαία προς υψηλή τάση διάδοση της πυρκαγιάς, λόγω του ότι αποτελεί έναν εύφλεκτο συνεχόμενο τάπητα ανάμεσα σε δασικές ή πυκνές θαμνώδεις εκτάσεις.

Επόμενη κλάση προς αντιστοιχίσει είναι οι πυκνές θαμνώδεις εκτάσεις, οι οποίες αντιστοιχήθηκαν στο μοντέλο SH7 (147), Very High Load, Dry Climate Shrub. Το εν λόγω μοντέλο αντιπροσωπεύει τις πυκνές θαμνώδεις περιοχές και αποτελείται από θάμνους μεγάλου μεγέθους (1-2 μέτρα).

SH7 (147)

Very High Load, Dry Climate Shrub



Εικόνα 69 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για τις θαμνώδεις εκτάσεις (Scott & Burgan, 2005)

Το μοντέλο αυτό αποτελείται από τους θάμνους και τον υπόροφο τους, που αποτελείται από χαμηλή βλάστηση. Λόγω της σύστασης αυτής, η τάση διάδοσης είναι υψηλή, ενώ το μήκος της φλόγας παραμένει χαμηλό.

Στη συνέχεια, η κλάση των ελαιώνων αντιστοιχήθηκε με το μοντέλο καύσιμης ύλης TU1 (161) Low Load Dry Climate Timber-Grass-Shrub. Το μοντέλο αυτό είναι το κοντινότερο σε αυτό των ελαιώνων. Χρειαζόταν ένα μοντέλο το οποίο θα διαφοροποιεί τους ελαιώνες από τις άλλες καλλιέργειες, μιας και υπάρχουν δεδομένα πως υπήρχαν καμένες εκτάσεις ελαιώνων. Η ιδιαιτερότητα που παρουσιάζουν σαν κλάση, είναι πως ενώ είναι αρκετά εύφλεκτες σαν δένδρο, λόγω της οριοθετημένης καλλιέργειας τους δεν μπορούν να αποτελέσουν ‘‘απειλή’’ για τη διάδοση μιας πυρκαγιάς. Ωστόσο, είναι επιρρεπείς στη μη-σκόπιμη διάδοση πυρκαγιών, όπως όταν γειτνιάζουν με δάση κωνοφόρων, των οποίων οι καρποί ‘‘ανοίγουν’’ και πετάγονται έως και 100 μέτρα μακριά, με αποτέλεσμα να ξεπερνάει τα εμπόδια, όπως η οριοθέτηση μιας καλλιέργειας ελαιώνων.

TU1 (161)

Low Load Dry Climate Timber-Grass-Shrub (Dynamic)



Εικόνα 70 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για τους ελαιώνες (Scott & Burgan, 2005)

Επιλέχθηκε αυτή η κατηγορία διότι αντικατοπτρίζει ως ένα βαθμό και τα ελαιόδεντρα αλλά και τον τάπητα γύρω από αυτά. Η τάση διάδοσης είναι χαμηλή όπως και το μήκος φλόγας που παρουσιάζουν.

Οι δύο τελευταίες κατηγορίες είναι αυτές των κωνοφόρων και των πλατύφυλλων. Τα κωνοφόρα αποτελούν και το μεγαλύτερο μέρος της καμένης έκτασης, οπότε η επιλογή του μοντέλου που θα τα αντιπροσωπεύει είναι υψίστης σημασίας. Το μοντέλο που επιλέχθηκε είναι το TU (165) Very High Load, Dry Climate Timber-Shrub.

TU5 (165)

Very High Load, Dry Climate Timber-Shrub



Εικόνα 71 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για τις εκτάσεις κωνοφόρων (Scott & Burgan, 2005)

Χαρακτηρίζεται από μέτρια προς υψηλή τάση διάδοσης της πυρκαγιάς και μετρίου μήκους φλόγας. Η αραιή κόμη των κωνοφόρων επιτρέπει στον υπόροφο να αναπτυχθεί με αποτέλεσμα να υπάρχει ένας πλούσιος σε εύφλεκτη βλάστηση τάπητας. Αυτό σε

συνδυασμό με την ευφλεκτότητα των κωνοφόρων και συγκεκριμένα της Πεύκης που μελετάται εδώ, δημιουργούν εκτάσεις υψηλής επικινδυνότητας όσον αφορά την εξάπλωση μιας δασικής πυρκαγιάς.

Τελευταία αντιστοίχιση είναι αυτή των πλατύφυλλων με το μοντέλο καύσιμης ύλης TL6 (186) Moderate Load Broad Leaf Litter. Το μοντέλο αυτό αναφέρεται σε εκτάσεις πλατύφυλλων με έναν όχι τόσο πλούσιο σε βλάστηση υπόροφο. Η τάση διάδοσης της πυρκαγιάς είναι μέτριας κλίμακας και το μήκος φλόγας χαμηλό.

TL6 (186)

Moderate Load Broadleaf Litter



Εικόνα 72 Μοντέλο Καύσιμης Ύλης για τις εκτάσεις πλατύφυλλων (Scott & Burgan, 2005)

Πίνακας 8 Αντιστοίχιση Μ.Κ.Υ με κλάσεις ταξινόμησης κατά αύξοντα αριθμό των κλάσεων

A/A	Κλάση	Μ.Κ.Υ.	Κωδικός Μ.Κ..Υ (FlamMap)	Κατηγορία Μοντέλου
1	Πεύκη	TU5	165	Καύσιμο
2	Πλατύφυλλα	TL6	186	Καύσιμο
3	Οικισμοί	NB1	91	Άκαυστο
4	Υδάτινα Σώματα	NB8	98	Άκαυστο
5	Γυμνό Έδαφος	NB9	99	Άκαυστο
6	Θαμνώδεις Εκτάσεις	SH7	147	Καύσιμο
7	Φρύγανα	GS2	122	Καύσιμο
8	Ελαιώνες	TU1	161	Καύσιμο
9	Λοιπές Καλλιέργειες	NB3	93	Άκαυστο

4.3.2 Εισαγωγή δεδομένων στο FlamMap

Landscape File Generation

Source Landscape File: C:\Users\gianni\OneDrive\Desktop\...\lcp_4.tif

Projection File:

General

Latitude: 38 Grid Distance Units: Meters

Rows: 1507 Lower Left X: 666165 CellSize: 30

Columns: 1778 Lower Left Y: 4281705

Required Themes	Source	Use LCP	Source Units	Constants
Elevation:	From Source Landscape File	<input checked="" type="checkbox"/>	Meters	<input type="checkbox"/> Constant: 0
Slope:	From Source Landscape File	<input checked="" type="checkbox"/>	Degrees	<input type="checkbox"/> Constant: 0
Aspect:	From Source Landscape File	<input checked="" type="checkbox"/>	Degrees	<input type="checkbox"/> Constant: 0
Fuel Model:	From Source Landscape File	<input checked="" type="checkbox"/>	Class	<input type="checkbox"/> Constant: 1
Canopy Cover:	From Source Landscape File	<input checked="" type="checkbox"/>	Percent	<input type="checkbox"/> Constant: 50

Crown Fuels

Include Crown Fuels:

Stand Height:	NA	<input type="checkbox"/>	Meters	<input type="checkbox"/> Constant: 15
Canopy Base Height:	NA	<input type="checkbox"/>	Meters	<input type="checkbox"/> Constant: 1
Canopy Bulk Density:	NA	<input type="checkbox"/>	kg/m3	<input type="checkbox"/> Constant: 0.2

Description

Εικόνα 73 Εισαγωγή πρώτης σειράς δεδομένων στο FlamMap

Η διαδικασία της προσομοίωσης ξεκινάει με τη δημιουργία του αρχείου Landscape, που έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια. Το αρχείο αυτό περιέχει τα Raster αρχεία που δημιουργήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, δηλαδή το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Elevation), τον χάρτη κλίσεων πρανών (Slope), τον χάρτη προσανατολισμού πρανών (Aspect), τον χάρτη καλύψεων γης (Fuel Model) και τον χάρτη βαθμού συγκόμωσης (Canopy Cover). Δεξιά αυτών απεικονίζονται οι μονάδες μέτρησης των εκάστοτε αρχείων. Το μέγεθος της περιοχής μελέτης είναι 1507x1778 pixel (εικονοστοιχεία) και ισχύει για όλα τα Raster αρχεία που έγιναν εισαγωγή στο λογισμικό. Αυτό έγινε εφικτό μέσω του QGIS και της εντολής Align Rasters, η οποία χρησιμοποιεί τις διαστάσεις μιας εικόνας και τις εφαρμόζει στις υπόλοιπες εικόνες που επιλέγονται.

Αφού γίνει η εισαγωγή των αυτών και δημιουργηθεί το αρχείο .lcp (Landscape), σειρά έχει η δημιουργία των κανόνων που θα αντιστοιχήσουν τις κλάσεις της ταξινόμησης με τα Μοντέλα Καύσιμης Ύλης. Αυτό γίνεται μέσω του Landscape Editor (Landscape→ Edit Landscape→ Create Rule).

Create/Edit Landscape Rule

Target Theme to Modify: Fuel Model

Value Assignment

Constant 165 Class

Expression

Fuel Models Filter

2 - Timber Grass/Understory
3 - Tall Grass
4 - Chaparral
5 - Short Brush
6 - Dormant Brush
7 - Southern Rough
8 - Cloud Timber Littor

1 - Short Grass

Additional AND Clauses

Raster Mask Filter

Existing Minimum Maximum Add Clause

Vector Intersection Filter

Vector Add Clause

AND Clauses

AND Clause Delete Clause

Rule Text

Set Fuel Model = 165 IF Fuel Model = (1)

OK Cancel Help

Εικόνα 74 Δημιουργία Κανόνα αντιστοίχισης κλάσης με M.K.Y. στο λογισμικό FlamMap

Landscape Editor

Create Rule Edit Rule Clear Rules

Rules:

Rule	Target Theme	Rule Description	Test Rule	Apply Rule	Delete Rule
1	Fuel Model	Set Fuel Model = 165 IF Fuel Model = (1)	Test	Apply	Delete
2	Fuel Model	Set Fuel Model = 186 IF Fuel Model = (2)	Test	Apply	Delete
3	Fuel Model	Set Fuel Model = 91 IF Fuel Model = (3)	Test	Apply	Delete
4	Fuel Model	Set Fuel Model = 98 IF Fuel Model = (4)	Test	Apply	Delete
5	Fuel Model	Set Fuel Model = 99 IF Fuel Model = (5)	Test	Apply	Delete
6	Fuel Model	Set Fuel Model = 147 IF Fuel Model = (6)	Test	Apply	Delete
7	Fuel Model	Set Fuel Model = 122 IF Fuel Model = (7)	Test	Apply	Delete
8	Fuel Model	Set Fuel Model = 161 IF Fuel Model = (8)	Test	Apply	Delete
9	Fuel Model	Set Fuel Model = 93 IF Fuel Model = (9)	Test	Apply	Delete

Εικόνα 75 Τελικοί κανόνες αντιστοίχισης κλάσεων με M.K.Y.

4.3.2.1 Μετεωρολογικά Δεδομένα

Τα μετεωρολογικά δεδομένα πάρθηκαν από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών και αφορούσαν τον μετεωρολογικό σταθμό Βάτερη. Ο σταθμός αυτός βρίσκεται λίγο πιο βόρεια της Λίμνης, σε υψόμετρο 130μ. Τα δεδομένα περιέχουν την θερμοκρασία, την σχετική υγρασία, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου και δίνονται σε δεκάλεπτο βήμα, τα οποία για να χρησιμοποιηθούν έπρεπε να μετατραπούν σε βήμα μιας ώρα. Αυτό συνεπάγεται τον υπολογισμό των μέσων όρων για κάθε δεδομένο ανά μια ώρα. Για τη χρήση τους στο λογισμικό, έπρεπε επίσης να μετατρέπουν σε αρχείο .wxs από .txt. Το αρχείο αυτό δημιουργείται μόνο εντός του λογισμικού με τη χρήση της εντολής Create .WXS File (New Farsite Run → Weather Stream And Burn Periods → WXS File → Create .WXS File) και μέσα σε αυτό εισάγονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες όπως η ώρα έναρξης της πυρκαγιάς, η διάρκεια της σε ώρες/ημέρες, το υψόμετρο του μετεωρολογικού σταθμού.

Record	Burn	Date	Temperature (°C)	RH (%)	Precipitation (mm)	Wind Speed (km/h)	Wind Direction (°)	Cloud Cover
1	<input type="checkbox"/>	08/03/21 00:00	32	31	0.000	6	64	0
2	<input type="checkbox"/>	08/03/21 01:00	32	35	0.000	3	113	0
3	<input type="checkbox"/>	08/03/21 02:00	31	38	0.000	3	101	0
4	<input type="checkbox"/>	08/03/21 03:00	31	37	0.000	2	90	0
5	<input type="checkbox"/>	08/03/21 04:00	30	42	0.000	5	72	0
6	<input type="checkbox"/>	08/03/21 05:00	30	43	0.000	3	83	0
7	<input type="checkbox"/>	08/03/21 06:00	29	52	0.000	3	116	0
8	<input type="checkbox"/>	08/03/21 07:00	29	46	0.000	3	86	0
9	<input type="checkbox"/>	08/03/21 08:00	31	45	0.000	2	107	0
10	<input type="checkbox"/>	08/03/21 09:00	32	52	0.000	3	240	0
11	<input type="checkbox"/>	08/03/21 10:00	34	39	0.000	6	203	0
12	<input type="checkbox"/>	08/03/21 11:00	37	29	0.000	8	218	0
13	<input type="checkbox"/>	08/03/21 12:00	38	23	0.000	8	221	0
14	<input type="checkbox"/>	08/03/21 13:00	40	18	0.000	9	225	0
15	<input type="checkbox"/>	08/03/21 14:00	41	18	0.000	21	41	0
16	<input checked="" type="checkbox"/>	08/03/21 15:00	38	24	0.000	46	45	0
17	<input checked="" type="checkbox"/>	08/03/21 16:00	37	27	0.000	57	45	0
18	<input checked="" type="checkbox"/>	08/03/21 17:00	37	26	0.000	35	45	0
19	<input checked="" type="checkbox"/>	08/03/21 18:00	36	25	0.000	34	45	0
20	<input checked="" type="checkbox"/>	08/03/21 19:00	35	22	0.000	41	45	0
21	<input checked="" type="checkbox"/>	08/03/21 20:00	35	21	0.000	34	41	0
22	<input checked="" type="checkbox"/>	08/03/21 21:00	35	20	0.000	16	83	0
23	<input checked="" type="checkbox"/>	08/03/21 22:00	33	24	0.000	5	75	0
24	<input checked="" type="checkbox"/>	08/03/21 23:00	33	27	0.000	8	71	0
25 *	<input checked="" type="checkbox"/>	08/04/21 00:00	33	35	0.000	4	117	0
26	<input checked="" type="checkbox"/>	08/04/21 01:00	30	39	0.000	2	113	0
27	<input checked="" type="checkbox"/>	08/04/21 02:00	31	36	0.000	2	169	0
28	<input checked="" type="checkbox"/>	08/04/21 03:00	30	38	0.000	4	90	0
29	<input checked="" type="checkbox"/>	08/04/21 04:00	30	39	0.000	1	113	0
30	<input checked="" type="checkbox"/>	08/04/21 05:00	29	44	0.000	2	117	0
31	<input checked="" type="checkbox"/>	08/04/21 06:00	29	37	0.000	4	71	0
32	<input checked="" type="checkbox"/>	08/04/21 07:00	30	43	0.000	1	169	0
33	<input checked="" type="checkbox"/>	08/04/21 08:00	28	52	0.000	3	124	0
34	<input checked="" type="checkbox"/>	08/04/21 09:00	29	58	0.000	6	128	0

Εικόνα 76 Μετεωρολογικά Δεδομένα (.wxs) στο λογισμικό FlamMap

4.3.2.2 Χρονική Υστέρηση της Καύσιμης Ύλης

Η περιεχόμενη υγρασία είναι το ποσό του νερού που περιέχεται στην καύσιμη ύλη, εκφράζεται ως ποσοστό επί του ξηρού της βάρους και είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη

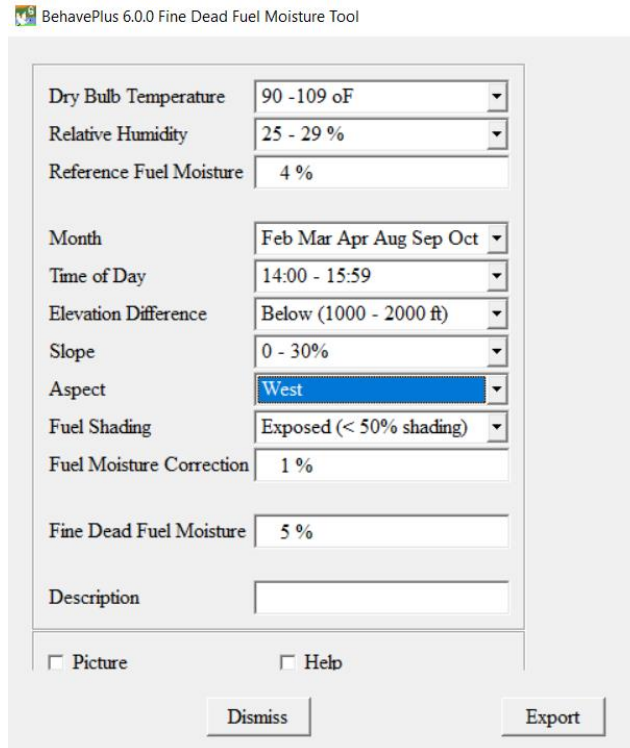
συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς, όσον αφορά στην ταχύτητα διάδοσης, τη θερμική ένταση του μετώπου και την παραγωγή καπνού. Η καύσιμη ύλη χωρίζεται σε νεκρή και ζωντανή και η περιεχόμενη υγρασία των δύο, μεταβάλλεται με διαφορετικό τρόπο και ρυθμό. Η μεταβολή της συνήθως είναι αποτέλεσμα των μετεωρολογικών συνθηκών. Η νεκρή καύσιμη ύλη μπορεί να περιέχει υγρασία μέχρι 30%, ενώ η περιεκτικότητα σε υγρασία της ζωντανής μπορεί να φθάσει και 300%. Η περιεχόμενη υγρασία του καινούριου φυλλώματος έχει υψηλότερες τιμές την εποχή της εμφάνισής του. Μειώνεται ραγδαία κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης της κόμης και γενικότερα του φυτού και έπειτα μειώνεται λίγο ακόμα μέχρι το τελικό στάδιο της ανάπτυξης. (Ρούσου, 2013)

Προφανώς, όσο πιο χαμηλή είναι η περιεχόμενη υγρασία μιας καύσιμης ύλης, τόσο πιο εύκολη είναι η διάδοση της φωτιάς μέσω αυτής. Στη ζωντανή καύσιμη ύλη, αυτή μεταβάλλεται ανάλογα με τις εποχές και τα στάδια ανάπτυξης τους φυτού. Στη νεκρή καύσιμη ύλη, μεταβάλλεται μέσα στην ημέρα, με βάση τις μετεωρολογικές συνθήκες. Η χρονική υστέρηση της καύσιμης ύλης (time lag -TL) είναι μια έκφραση του ρυθμού με τον οποίο μια δεδομένη καύσιμη ύλη προσεγγίζει το σημείο ισορροπίας της περιεχόμενης υγρασίας. Η χρονική υστέρηση που μεσολαβεί, καθορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται ώστε η νεκρή καύσιμη ύλη να χάσει περίπου το 63% της διαφοράς μεταξύ της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας και της περιεχόμενης υγρασίας στο σημείο ισορροπίας, σε σταθερές συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας του αέρα. Η διάρκεια αυτών των χρονικών περιόδων είναι ένα χαρακτηριστικό της καύσιμης ύλης. Η χρονική υστέρηση μπορεί να εκφραστεί σε λεπτά (min), ώρες (hr) ή μέρες (d), αλλά για μεγαλύτερη σαφήνεια χρησιμοποιούνται οι ώρες (Pyne et al, 1996)

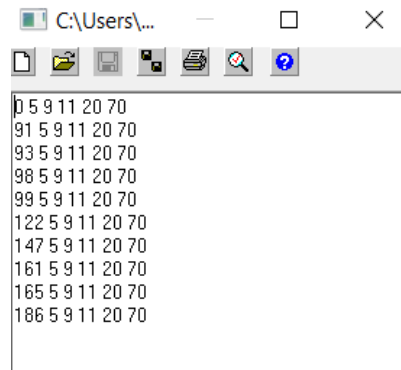
Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ο υπολογισμός της χρονικής υστέρησης της καύσιμης ύλης σε 1 ώρα, 10 ώρες και 100 ώρες έγινε με τη χρήση του λογισμικού BehavePlus. Είναι και το μόνο λογισμικό στο οποίο μπορεί να υπολογιστεί η συγκεκριμένη παράμετρος, χρησιμοποιώντας άλλα ήδη υπάρχοντα δεδομένα. Ο τρόπος που υπολογίζεται η χρονική υστέρηση 1 ώρας είναι βασισμένη στο μοντέλο του Ralph Nelson (2000) το οποίο λαμβάνει αρχικά υπόψιν την θερμοκρασία του αέρα και τη σχετική υγρασία και μετά χρησιμοποιώντας πρόσθετα δεδομένα για την θέση του σημείου που μελετάται, γίνονται οι απαραίτητες διορθώσεις, δίνοντας το τελικό αποτέλεσμα. Ο υπολογισμός της χρονικής υστέρησης για 10 ώρες και 100 ώρες γίνεται προσθέτοντας 1-2% και 2-4% αντίστοιχα (National Wildlife Coordinating Group, 2021).

Σαν θέση χρησιμοποιήθηκε ο μετεωρολογικός σταθμός Βάτερη (Λίμνη Ευβοίας), από τον οποίο έχουν παρθεί τα μετεωρολογικά δεδομένα και με τη μελέτη των αρχείων προσανατολισμού και κλίσεων, έγινε εισαγωγή και των τελευταίων χαρακτηριστικών που χρειάζονται για τη διόρθωση.

Οι αριθμοί αυτοί έπειτα εισέρχονται στο FlamMap και με την εντολή Create .FMS file (New Farsite Run → Fuel Moisture File → Create .FMS File) δημιουργείται το αρχείο που απαιτείται για την προσομοίωση.



Εικόνα 77 Υπολογισμός χρονικής υστέρησης υγρασίας για 1 ώρα με το λογισμικό BehavePlus



Εικόνα 78 Αρχείο .FMS με υγρασία νεκρής καύσιμης ύλης χρονικής υστέρησης 1, 10, 100 ωρών και περιεχόμενη υγρασία ποώδους και ξυλώδους βλάστησης (σε %)

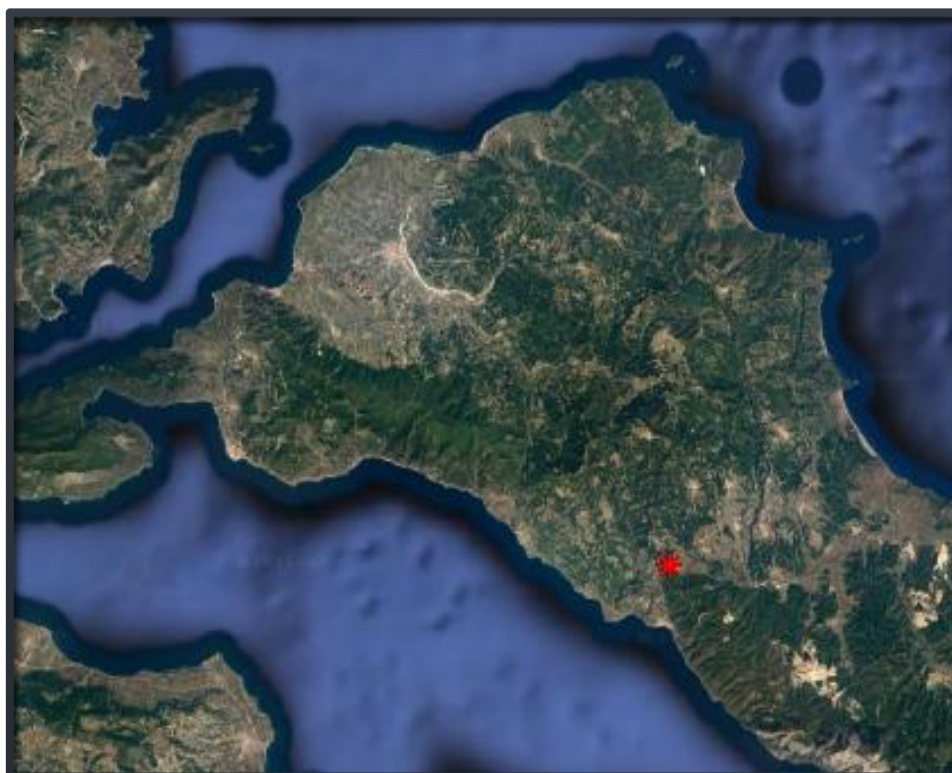
Οι αναφορές γύρω από τη συγκεκριμένη παράμετρο, ήταν ελάχιστες. Λιγοστές υπήρχαν στην ξενόγλωσση βιβλιογραφία, ενώ στην ελληνόφωνη, μόνο σε αντίστοιχες διπλωματικές εργασίες, οι οποίες αγγίζουν το θέμα επιδερμικά. Το μοντέλο του Nelson (2000) στο οποίο είναι βασισμένο και το λογισμικό του BehavePlus, δεν μπορεί να καλύψει ακριβώς το εύρος της καύσιμης ύλης μιας περιοχής, γιατί δεν αναφέρεται σε μεμονωμένα μοντέλα καύσιμης ύλης. Το τελικό σετ δεδομένων που εισάγεται στο λογισμικό του FlamMap, αναφέρεται στην χρονική υστέρηση 1 ώρας, 10 ωρών, 100 ωρών, στην περιεχόμενη υγρασία της ποώδους βλάστησης και της ξυλώδους, συνολικά και όχι για κάθε μονάδα καύσιμης ύλης ξεχωριστά. Αυτό είναι το δεύτερο θολό σημείο με τη συγκεκριμένη παράμετρο. Το ότι δεν μπορεί να διαχωριστεί στο λογισμικό του FlamMap,

η χρονική υστέρηση και η περιεχόμενη υγρασία για κάθε Μ.Κ.Υ., μπορεί να οδηγήσει σε παρερμηνευση των τελικών αποτελεσμάτων.

Μετά από δοκιμές με διάφορα νούμερα κυρίως στην περιεχόμενη υγρασία ποώδους και ξυλώδους βλάστησης, διότι τα υπόλοιπα μπορούν να υπολογιστούν με σχετική ευκολία αν έχεις τα απαραίτητα δεδομένα, επιλέχθηκαν οι τιμές 20% και 70% αντίστοιχα. Οι διαφοροποιήσεις που προκαλούσαν στο τελικό αποτέλεσμα δεν ήταν τόσο μεγάλες, αφού τα συγκεκριμένα νούμερα αναφέρονται κυρίως στην έναρξη της πυρκαγιάς και τις πρώτες ώρες τέλεσης της. Σε μια πυρκαγιά η οποία διαρκεί 8 μέρες, μικρές αλλαγές σε αυτές τις παραμέτρους, δεν είναι ικανές να τροποποιήσουν σε μεγάλο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα.

4.3.2.3 Εστία Έναρξης Πυρκαγιάς

Η επίσημη εστία έναρξης της πυρκαγιάς δόθηκε από την Πυροσβεστική Υπηρεσία σε μορφή συντεταγμένων. Οι συντεταγμένες αυτές εισήχθησαν στο λογισμικό του QGIS και εκεί δημιουργήθηκε ένα vector αρχείο το οποίο περιείχε μόνο το σημείο έναρξης σαν point. Αυτό έπειτα χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση (New Farsite Run→ Model Settings→ Ignition File→ Load Ignition File).



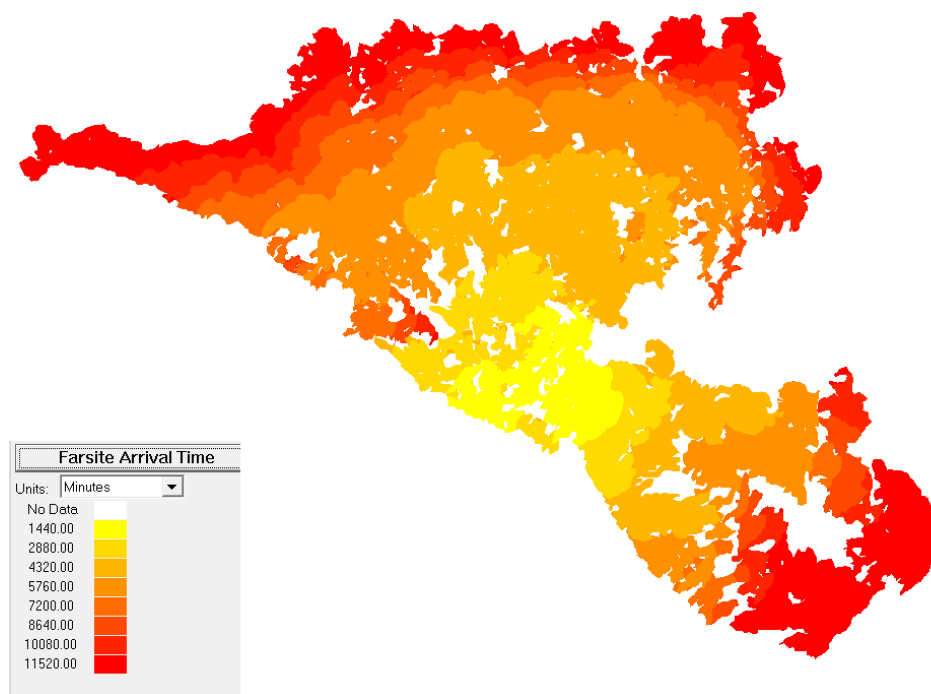
Εικόνα 79 Εστία Έναρξης Πυρκαγιάς σε υπόβαθρο Google Satellite

4.3.3 Αρχικά Αποτελέσματα

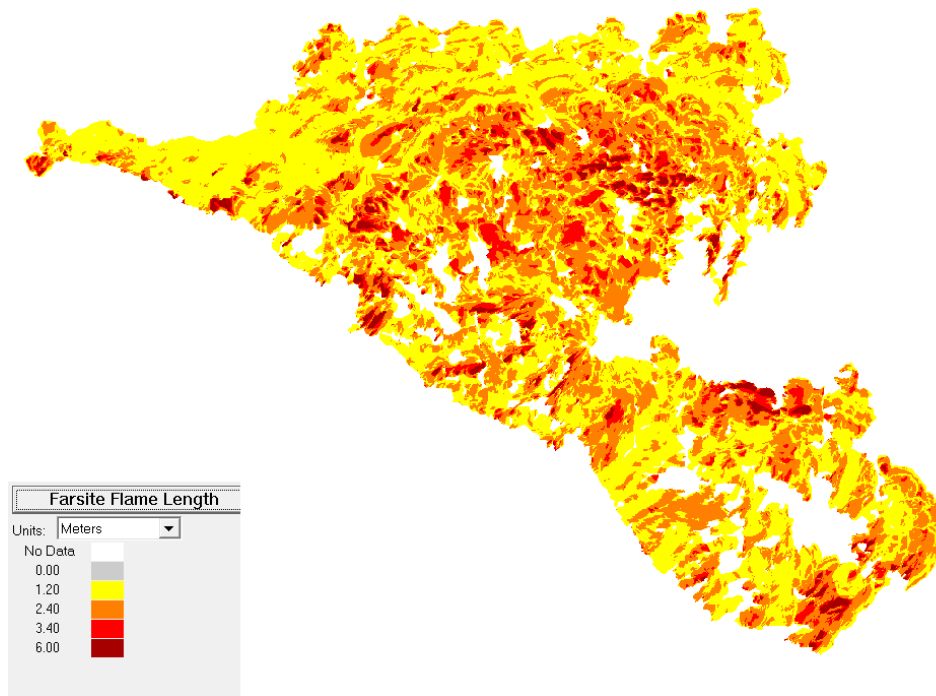
Η προσομοίωση έγινε με ανάλυση περιμέτρου και ανάλυση απόστασης εξάπλωσης στα 200μ. Η ακρίβεια αυτή, δεδομένου της έκτασης της περιοχής είναι ικανοποιητική. Με ανάλυση λιγότερο από τα 100μ., το πρόγραμμα αδυνατούσε να επεξεργαστεί τον όγκο

δεδομένων, με αποτέλεσμα να μην εξάγει κάποιο αποτέλεσμα. Έγιναν διάφορες δοκιμές ξεκινώντας από τα 200μ. και αυξάνοντας όλο και περισσότερο την ανάλυση, φτάνοντας έως τα 120μ. . Τα αποτελέσματα είχαν μικρές διαφορές από αυτά της ανάλυσης 200μ., ενώ σε θέμα χρόνου ήταν πολύ παραπάνω απαιτητικά. Αυτό θα μπορούσε να αποτελεί πρόβλημα του ηλεκτρονικού υπολογιστή στον οποίο λειτούργησε το λογισμικό, ή πρόβλημα του ίδιου του λογισμικού και της ποσότητας δεδομένων που μπορεί να διαχειριστεί. Ακόμη μια παράμετρος η οποία λήφθηκε υπόψιν η πιθανότητα ‘‘κηλίδωσης’’ της πυρκαγιάς (ember spot probability), δηλαδή η δυνατότητα της να αναπηδάει σε σημεία χωρίς να υπάρχει απαραίτητα συνέχεια της βλάστησης στο έδαφος, δηλαδή ένας εύφορος σε φωτιά τύπης. Τα κωνοφόρα και οι καρποί τους (κουκουνάρια), έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό το ‘‘σκάσιμο’’ τους. Όταν θερμαίνονται, διαστέλλονται με αποτέλεσμα να εκρήγνυται και να εκτοξεύονται μέχρι και 100μ. μακριά. Χρησιμοποιώντας πίνακες από το National Wildlife Coordinating Group, οι οποίοι έχουν ως παραμέτρους το είδος της βλάστησης και τη ταχύτητα του ανέμου και την ομοιότητα της Χαλέπιου Πεύκης με τα είδη πεύκης που βρίσκονται στις Η.Π.Α (τα οποία χρησιμοποιούνται στους εν λόγω πίνακες), η τιμή που δόθηκε ήταν προσεγγιστικά το 0,3.

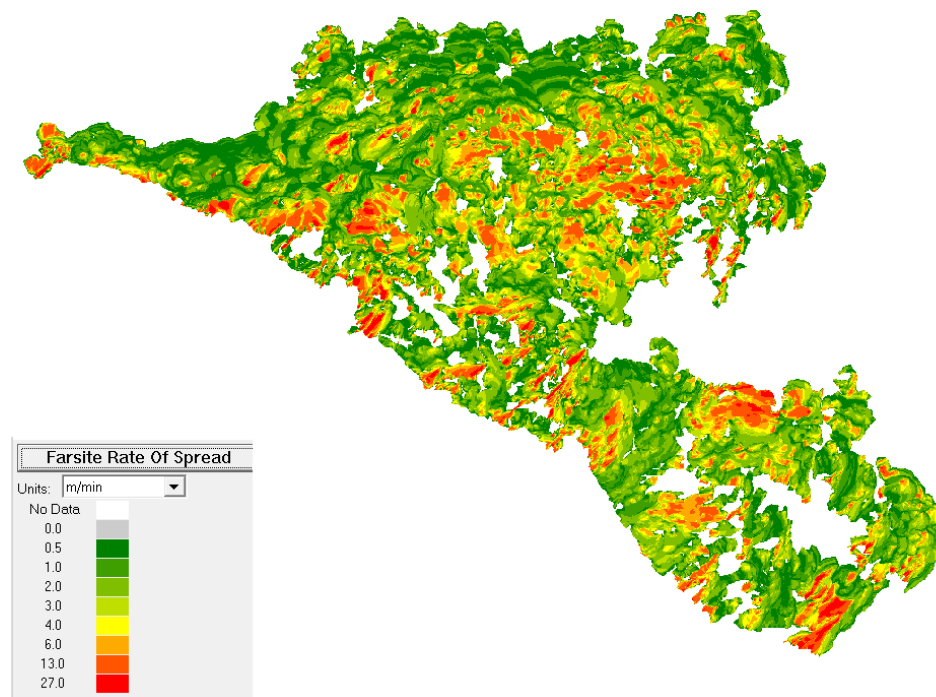
Τα δεδομένα εξόδου της προσομοίωσης αποτελούνται από χάρτες οι οποίοι έχουν ως αντικείμενο την ώρα άφιξης, το μήκος φλόγας, τον ρυθμό διάδοσης, την κατεύθυνση διάδοσης αλλά και την ένταση της πυρκαγιάς.



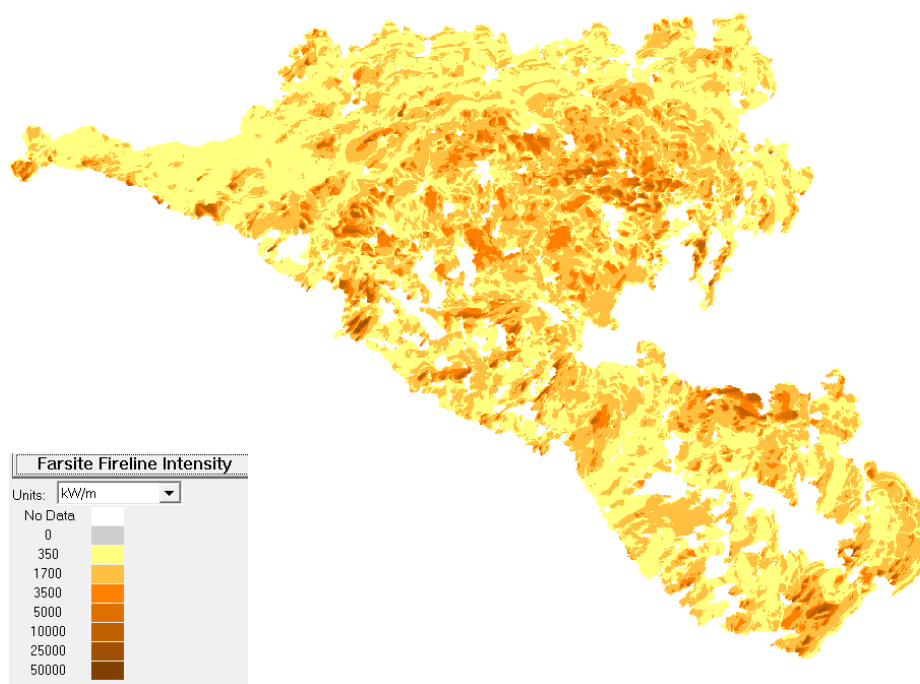
Εικόνα 80 Ταχύτητα εξάπλωσης πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και την επίσημη εστία έναρξης



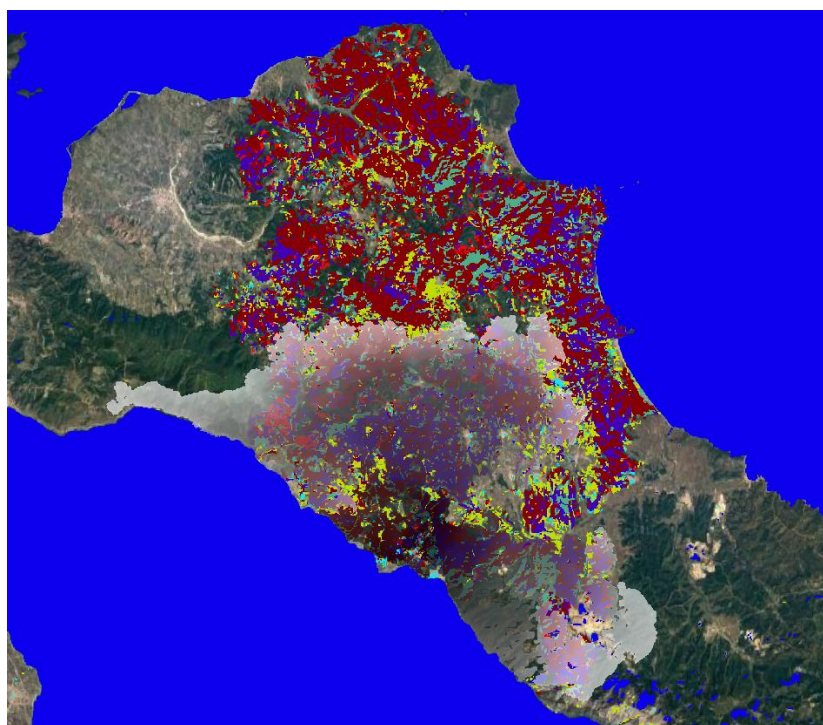
Εικόνα 81 Μήκος φλόγας πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και την επίσημη εστία έναρξης



Εικόνα 82 Ρυθμός εξάπλωσης πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και την επίσημη εστία έναρξης



Εικόνα 83 Ένταση πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και την επίσημη εστία έναρξης



Εικόνα 84 Σύγκριση αποτελέσματος προσομοίωσης πυρκαγιάς με την επίσημη εστία έναρξης με την ταξινομημένη καμένη έκταση και υπόβαθρο Google Satellite

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα, δεν αντιπροσωπεύει σε καμία περίπτωση τη πραγματική έκταση της πυρκαγιάς. Έγιναν παραπάνω δοκιμές, χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετικές παραμέτρους είτε αυτές αφορούσαν την χρονική υστέρηση, την ανάλυση περιμέτρου και απόστασης, την πιθανότητα κηλίδωσης, όμως τα αποτελέσματα είχαν πολύ μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους.

Η αποτυχία της προσομοίωσης σε τέτοιο βαθμό μπορεί να οφείλεται σε διάφορες παραμέτρους. Μια μπορεί να είναι η λανθασμένη ταξινόμηση και η λάθος αντιστοίχιση, η οποία όσο και να επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα δεν μπορεί να δημιουργήσει τόσο μεγάλες αποκλίσεις. Εκτός αν γίνεται λόγος για χονδροειδές σφάλματα, κάτι που δεν ισχύει λόγω των ελέγχων που έχουν γίνει κατά τη διάρκεια παραγωγής των δεδομένων. Μια ακόμη παράμετρος είναι η φύση των συγκεκριμένων μοντέλων, τα οποία έχουν δημιουργηθεί ώστε να ανταποκρίνονται σε πυρκαγιές με όσο τον δυνατόν πιο ελεγχόμενες συνθήκες. Συγκεκριμένα, ξεκίνησαν μελετώντας πυρκαγιές χωραφιών στις Η.Π.Α, τα οποία τα χαρακτήριζε η χαμηλή βλάστηση. Με τα χρόνια τα μοντέλα προσάρμοσαν τις δασικές εκτάσεις και τη βλάστηση που αυτές φέρουν. Επιπλέον, οι ακραίες καιρικές συνθήκες, στη προκειμένη περίπτωση τα χαμηλά επίπεδα σχετικής υγρασίας, μπορούν να ‘μπερδέψουν’ το μοντέλο.

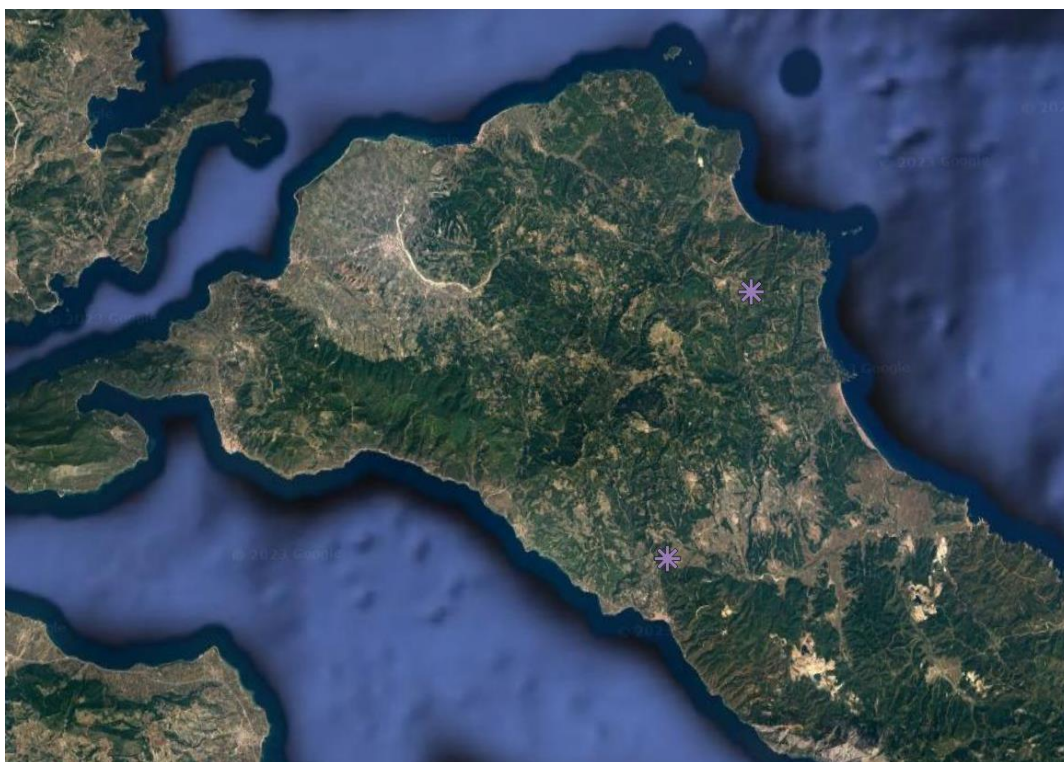
Παρόλα αυτά η μελέτη των μετεωρολογικών δεδομένων και κυρίως αυτών της διεύθυνσης ανέμου δημιούργησε απορίες σχετικά με την εγκυρότητα των δεδομένων και συγκεκριμένα της εστίας έναρξης. Οι άνεμοι που μάστιζαν την περιοχή τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο είχαν κατά ένα μεγάλο ποσοστό κατεύθυνση νοτιοδυτική και με βάση την θέση της εστίας έναρξης, αυτό θα περιόριζε την πυρκαγιά στην έκταση η οποία είχε ως αποτέλεσμα η προσομοίωση.

Σημαντική επίσης είναι και η έλλειψη δεδομένων για την παρέμβαση της πυροσβεστικής υπηρεσίας, η οποία κυρίως εναέρια και μετά από αρκετές μέρες παρενέβη, δημιουργούν ασάφειες όσον αφορά την κατεύθυνση της πυρκαγιάς.

4.3.4 Εξαγωγή επιπλέον αποτελεσμάτων

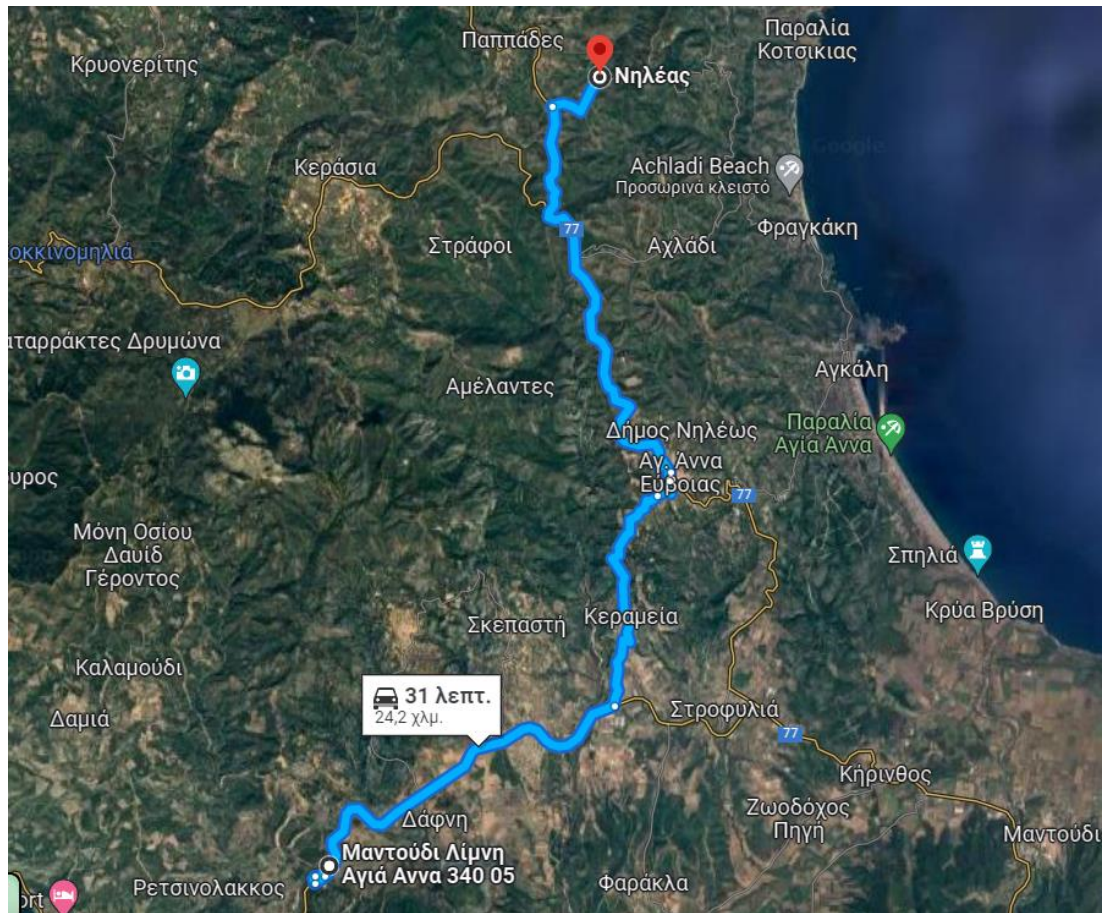
Με βάση τα παραπάνω αποφασίστηκε να γίνει δοκιμή εισαγωγής περισσότερων από μιας εστιών έναρξης. Σκοπός αυτού είναι ο έλεγχος της περίπτωσης του εμπρησμού εκ προθέσεως. Το σενάριο αυτό υπάρχει πάντα όταν γίνεται λόγος για μεγάλες δασικές εκτάσεις, οι οποίες μπορεί να μετασχηματιστούν όσον αφορά τη χρήση γης τους. Έπειτα από μελέτη του οδικού δικτύου της περιοχής επιλέχθηκαν σημεία τα οποία γειτνιάζουν σε δρόμο και είναι κοντά σε περιοχές με εύφλεκτη βλάστηση. Ταυτόχρονα επιλέχθηκε και η βέλτιστη διαδρομή από άποψη χρόνου.

Αρχικά επιλέχθηκε η επίσημη εστία έναρξης και ακόμη μια, ώστε να μελετηθεί η προσομοίωση με δύο εστίες. Η θέση της δεύτερης εστίας έχει ως ρόλο την συμπερίληψη της βορειοανατολικής πλευράς της περιοχής και της καμένης έκτασης. Είναι σε μια ασφαλή απόσταση μακριά από οικισμό, δίπλα σε χωμάτινο δρόμο και ταυτόχρονα σε κοντινή απόσταση από ένα σημαντικό πευκόδασος της περιοχής, το Πευκόδασος των Παππάδων.

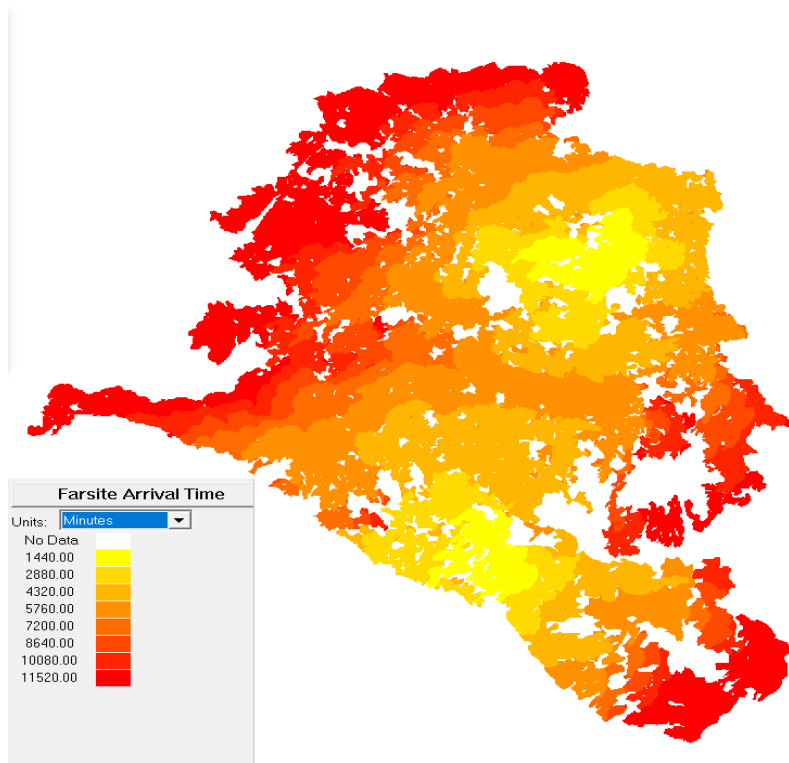


Εικόνα 85 Θέση της επίσημης εστίας έναρξης και μιας δεύτερης υποθετικής

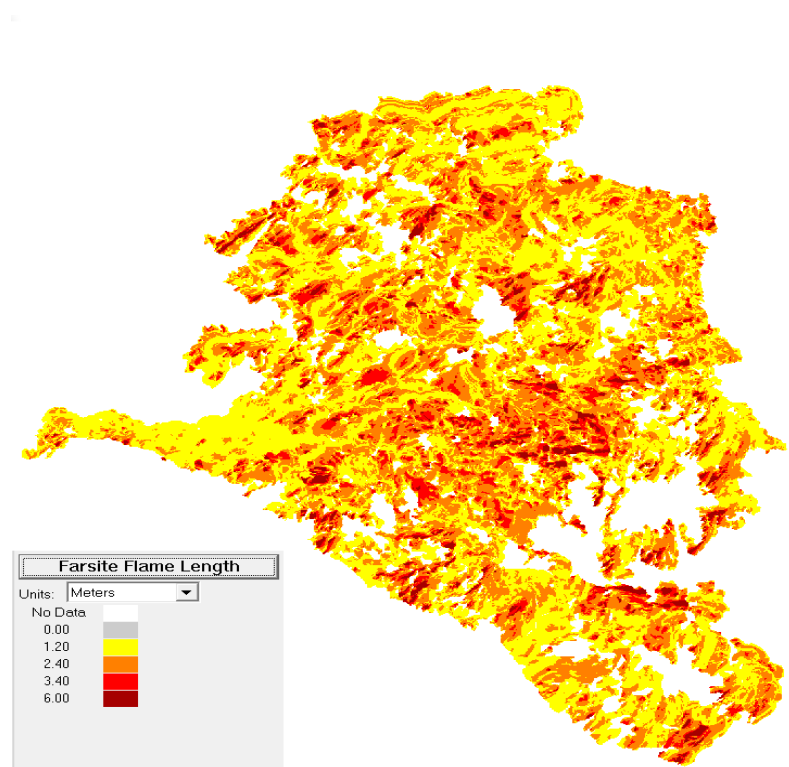
Χρησιμοποιώντας λοιπόν αυτές τις δύο εστίες και τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου και εξόδου ίδια ακριβώς με την προηγούμενη απόπειρα, τα αποτελέσματα ήταν τα παρακάτω.



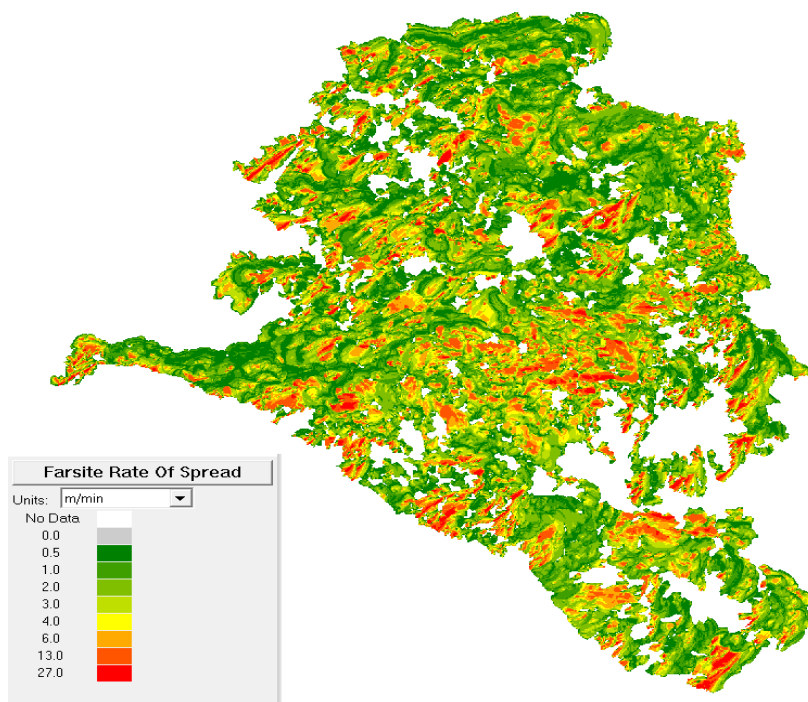
Εικόνα 86 Πιθανή (και ταχύτερη) Πορεία προς τη δεύτερη εστία με τη χρήση του Google Maps



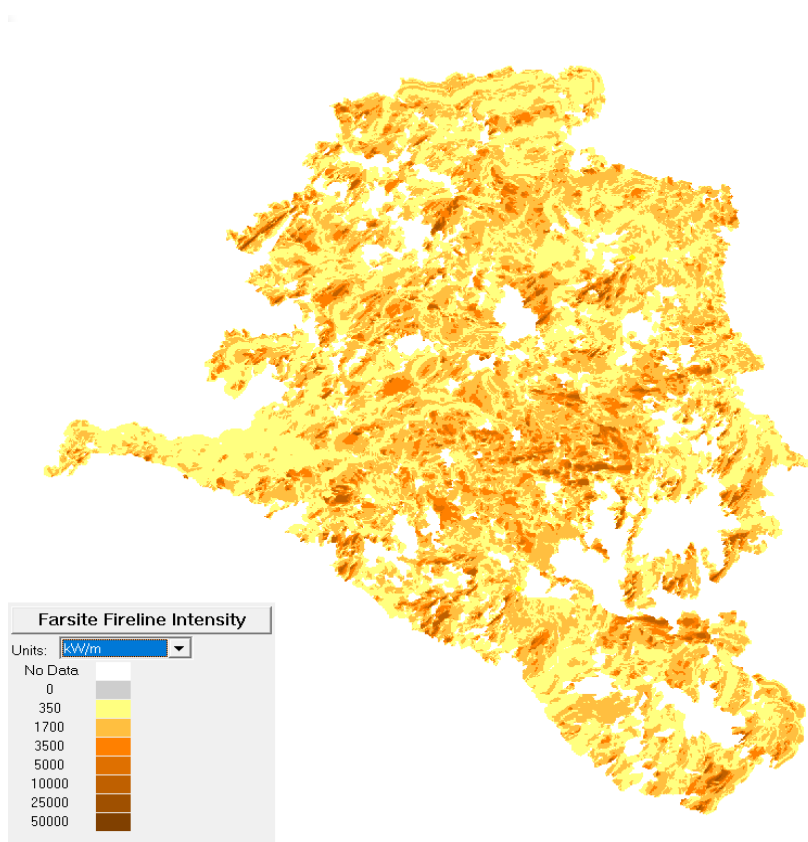
Εικόνα 87 Ταχύτητα εξάπλωσης πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και δύο εστίες



Εικόνα 88 Μήκος φλόγας πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και δύο εστίες



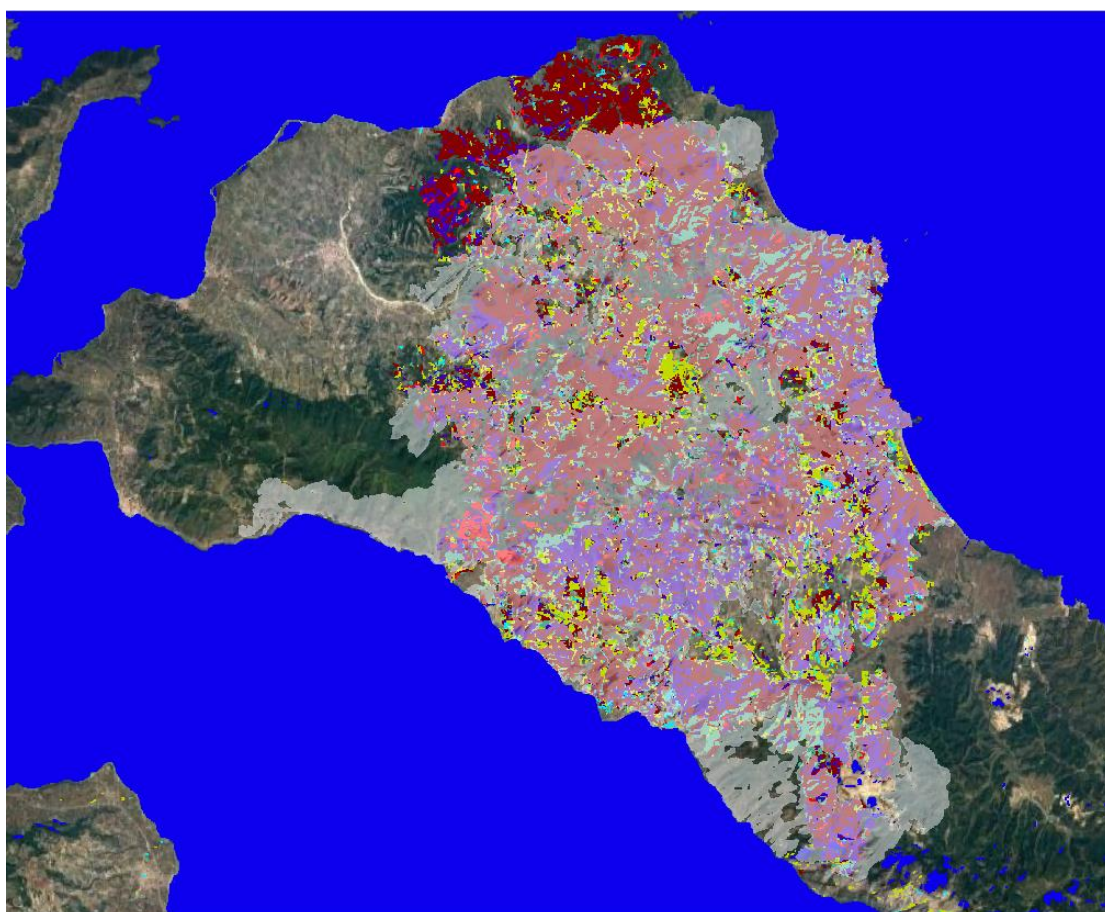
Εικόνα 89 Ρυθμός εξάπλωσης πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και δύο εστίες



Εικόνα 90 Ένταση πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και δύο εστίες

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τις δύο εστίες είναι οπτικά πολύ πιο κοντά στη πραγματική έκταση. Όπως φαίνεται οι ρυθμοί εξάπλωσης της πυρκαγιάς είναι σχετικά χαμηλοί, δηλαδή περίπου 1-2 μέτρα/λεπτό με εξαίρεση περιοχές κωνοφόρων δασών και πυκνών θαμνωδών εκτάσεων που ξεπερνάει τα 10-20 μέτρα/λεπτό. Η ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς καθιστά κατανοητό το ότι η πυρκαγιά κινήθηκε με αργούς ρυθμούς σχετικά (πολλές εκτάσεις κήκαν μετά από 4-5 μέρες), ενώ το μήκος της φλόγας παραμένει σχετικά χαμηλό με λίγα σημεία στον χάρτη να αγγίζουν τα πάνω από 3 μέτρα.

Το αποτέλεσμα της σύγκρισης καθιστά φανερό πως μεγάλο κομμάτι της αστοχίας αφορά εκτάσεις γυμνού εδάφους. Αυτό μπορεί να αποτελεί σφάλμα της ταξινόμησης, είτε με λάθος δειγματοληψία, είτε με λάθος του αλγορίθμου, ο οποίος μπορεί να μπέρδισε τις φασματικές υπογραφές του γυμνού εδάφους με περιοχές αραιής βλάστησης. Ωστόσο, το λογισμικό FlamMap λειτούργησε κατά κανόνα και θεώρησε τις εκτάσεις αυτές ως εκτάσεις μη καύσιμης ύλης, με αποτέλεσμα να τις προσπεράσει χωρίς να τις λάβει μέρος της καμένης έκτασης.



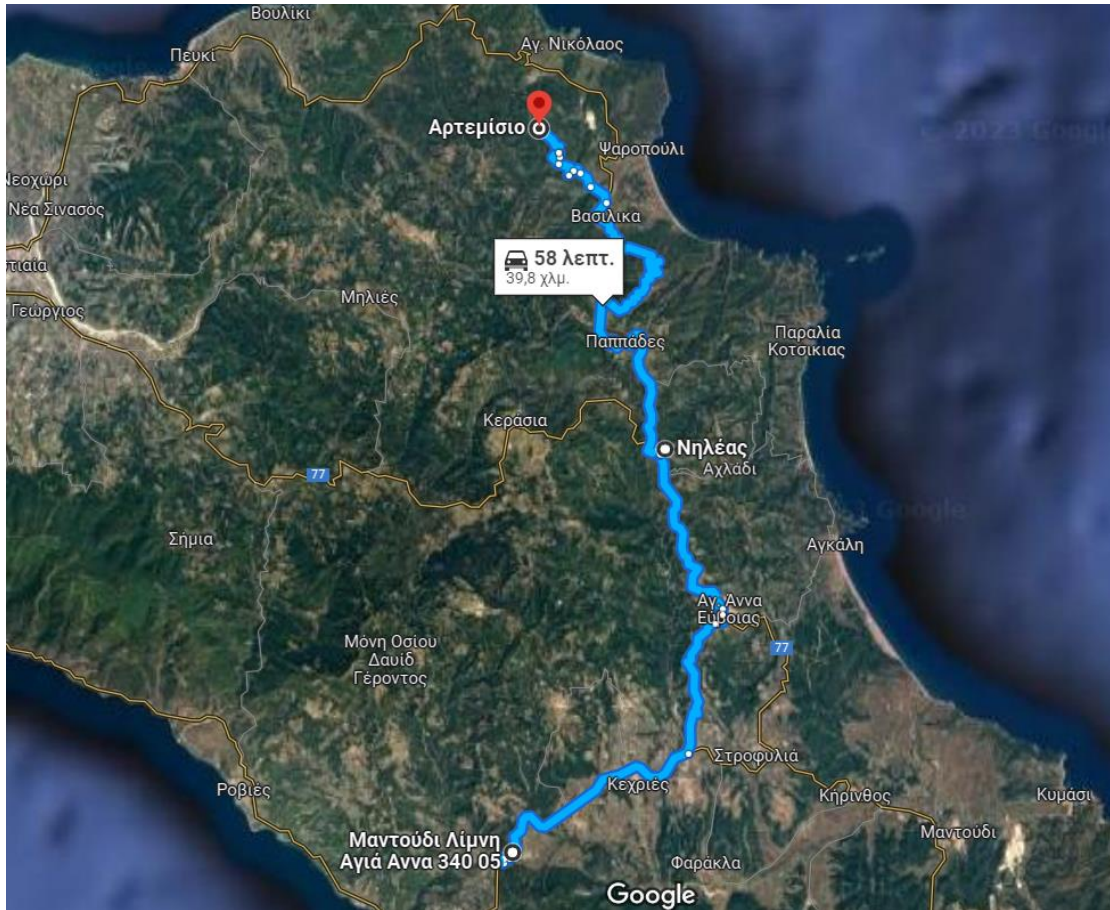
Εικόνα 91 Σύγκριση αποτελέσματος προσομοίωσης πυρκαγιάς με δύο εστίες με την ταξινομημένη καμένη έκταση και υπόβαθρο Google Satellite

Έγινε ακόμη μια απόπειρα προσομοίωσης ώστε να φτάσουν τα αποτελέσματα της να αγγίζουν όλο και περισσότερο την πραγματική έκταση της πυρκαγιάς. Αυτή τη φορά χρησιμοποιήθηκαν τρεις εστίες έναρξης, η επίσημη εστία, η δεύτερη εστία με μια μετακίνηση προς τα νοτιοδυτικά και μια τρίτη που βρίσκεται στο βορειοανατολικό κομμάτι της περιοχής, ώστε να καταφέρει η προσομοίωση της πυρκαγιάς να φτάσει και τις εκτάσεις οι οποίες κάηκαν, παρά τους αντίθετους σε διεύθυνση ανέμους. Η επιλογή του τρίτου σετ εστιών έναρξης έγινε διατηρώντας την ίδια φιλοσοφία με προηγουμένως. Μελετώντας το οδικό δίκτυο επιλέχθηκε ένα ακόμα σημείο κοντά σε δρόμο αλλά και περιτριγυρισμένο από καύσιμη ύλη, τέτοιο ώστε να μπορεί να αποτελέσει ένα ρεαλιστικό σενάριο διαδρομής αλλά και να καλύψει τις ανάγκες της προσομοίωσης. Η δεύτερη εστία έναρξης μετακινήθηκε προς τα νοτιοδυτικά σε ένα αντίστοιχο σημείο, λόγω του ότι βρισκόταν πολύ κοντά στην τρίτη εστία. Ένας παραπάνω λόγος για την επιλογή αυτή είναι να μελετηθούν οι δύο περιπτώσεις ως δύο ξεχωριστά σενάρια και όχι το ένα ως συνέχεια του άλλου.

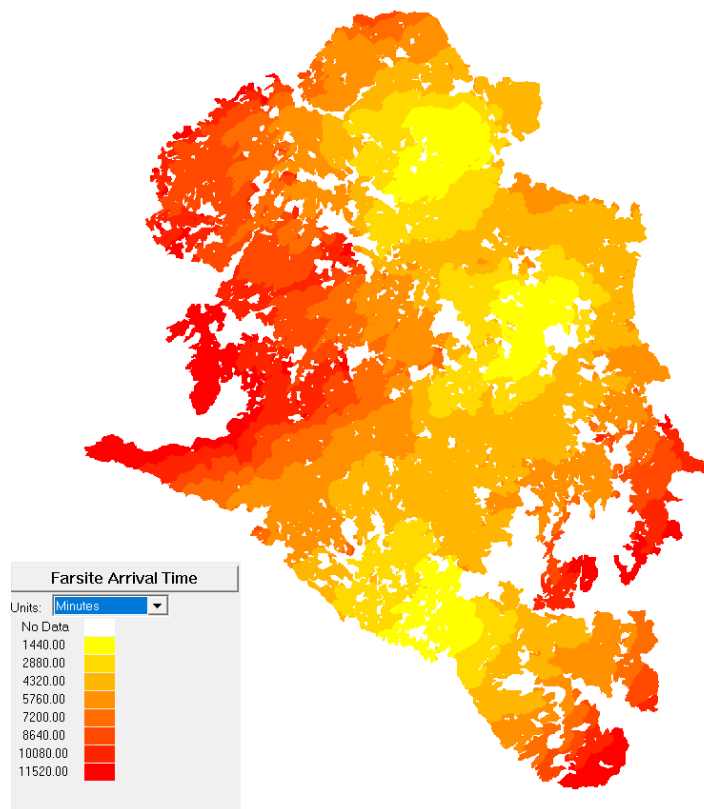
Όπως και προηγουμένως τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου και εξόδου παραμένουν ίδια, για να παρατηρηθεί η διαφορά των αποτελεσμάτων με παράγοντα τις εστίες έναρξης.



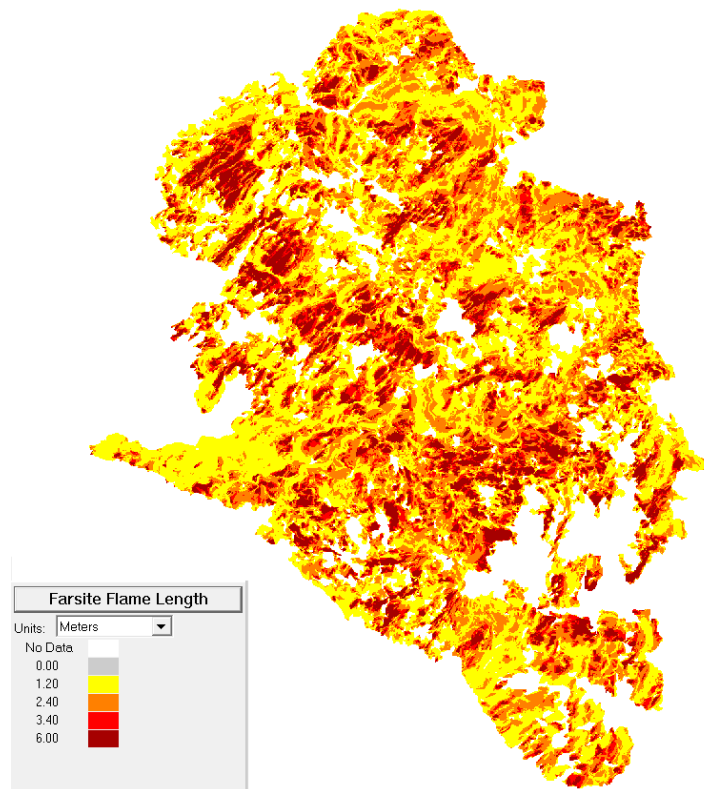
Εικόνα 92 Θέση της επίσημης εστίας έναρξης και άλλων δύο υποθετικών



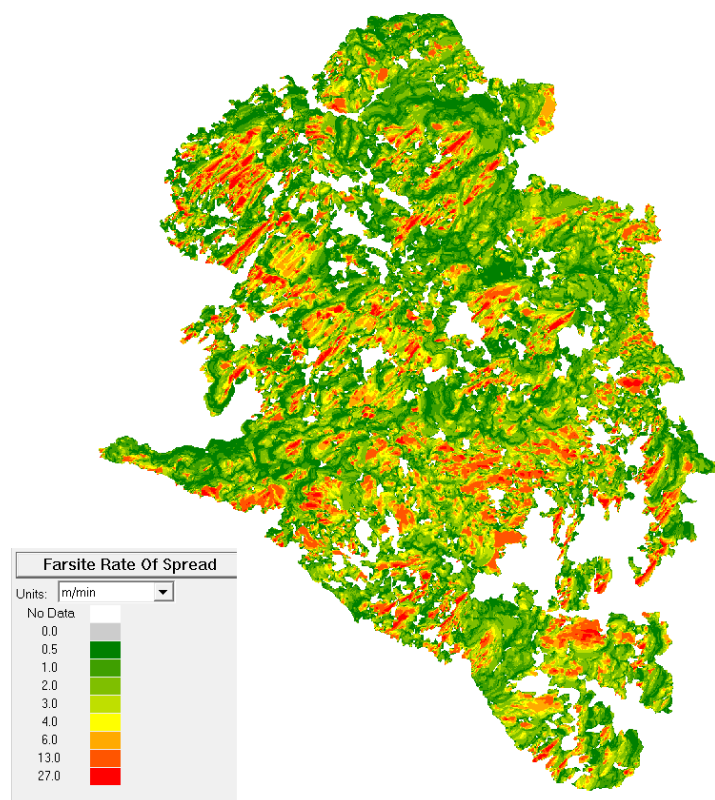
Εικόνα 93 Πιθανή (και ταχύτερη) πορεία προς τη δεύτερη και τρίτη εστία έναρξης με χρήση Google Maps



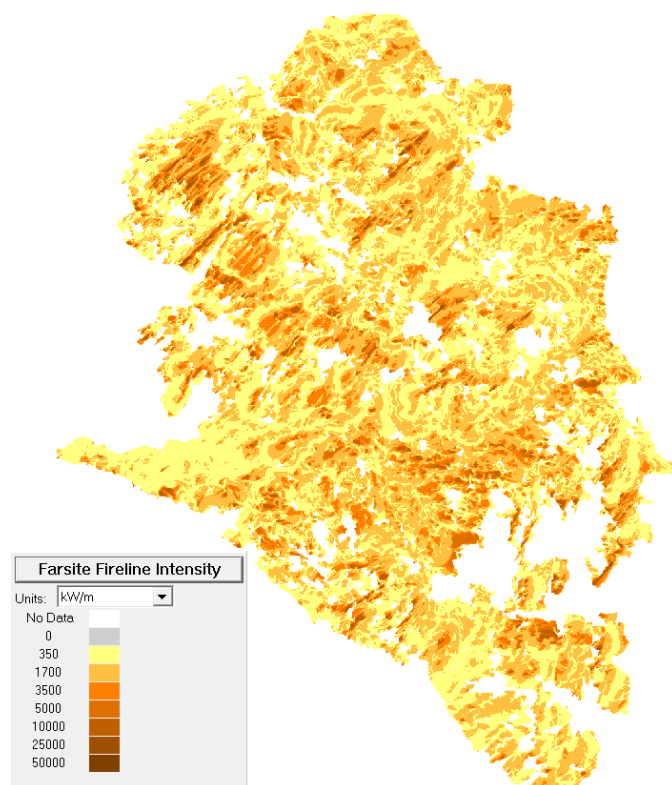
Εικόνα 94 Ταχύτητα εξάπλωσης πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και τρεις εστίες



Εικόνα 95 Μήκος φλόγας πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και τρεις εστίες

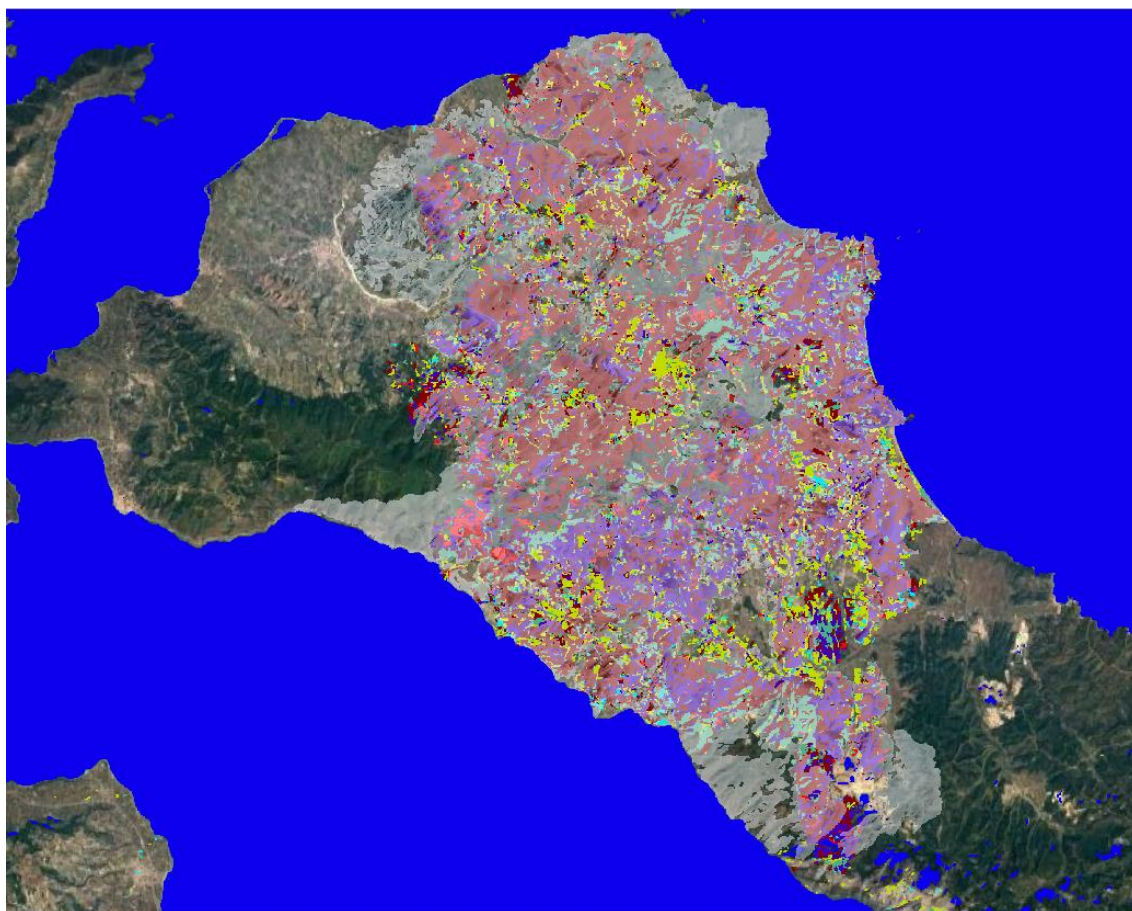


Εικόνα 96 Ρυθμός εξάπλωσης πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και τρεις εστίες



Εικόνα 97 Ένταση πυρκαγιάς με τη χρήση λογισμικού FlamMap και τρεις εστίες

Παρατηρείται πως οι θέσεις των τριών εστιών δίνουν τα πιο κοντινά στη πραγματικότητα αποτελέσματα. Ο χάρτης ταχύτητας εξάπλωσης, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις απεικονίζει περιοχές οι οποίες χρειάστηκαν αρκετές μέρες ώστε οι φλόγες να της πλησιάσουν, αλλά αυτή τη φορά δημιουργείται μια ζώνη η οποία ενώνει τις τρεις εστίες, η οποία μέσα στις πρώτες μέρες φαίνεται πως είχε καεί. Το μήκος φλόγας στη συγκεκριμένη περίπτωση απεικονίζεται ψηλότερο από τις προηγούμενες περιπτώσεις, κάτι που είναι άξιο απορίας αφού δεν άλλαξε σε κανένα σημείο η μονάδα καύσιμης ύλης, ούτε η περιεχόμενη υγρασία τους. Ο ρυθμός εξάπλωσης είναι παρόμοιος με αυτόν της περίπτωσης των δύο εστιών, δηλαδή κυρίως χαμηλός με μερικές εξαιρέσεις περιοχών κωνοφόρων, οι οποίες είναι περισσότερες αυτή τη φορά, λόγω της καινούριας έκτασης που έχει προστεθεί. Η ένταση της πυρκαγιάς παραμένει στα ίδια επίπεδα.



Εικόνα 98 Σύγκριση αποτελέσματος προσομοίωσης πυρκαγιάς με τρεις εστίες με την ταξινομημένη καμένη έκταση και υπόβαθρο Google Satellite

Όπως είναι κατανοητό από την παραπάνω εικόνα, οι περιοχές εντός της καμένης έκτασης που δεν έχουν συμπεριληφθεί, είναι σχεδόν οι ίδιες με αυτές της περίπτωσης των δύο εστιών έναρξης. Στο δυτικό κομμάτι, οι περίσσιες περιοχές είναι λιγότερες από πριν, ενώ

στο βορειοανατολικό κομμάτι έχουν προστεθεί καινούριες, παράλληλα με την σωστή καμένη έκταση.

Παρατηρείται πως αρκετές περιοχές οι οποίες η προσομοίωση εξάγει ως καμένες στη πραγματικότητα δεν ανήκουν στην καμένη έκταση. Σημαντικό παράδειγμα αυτού είναι κυρίως οι περιοχές στο δυτικό κομμάτι της περιοχής, οι οποίες απεικονίζονται και στις τρεις περιπτώσεις. Η μια περιοχή βρίσκεται βορειοδυτικά και αποτελεί ένα κομμάτι του δάσους πλατύφυλλων του Όρους Τελέθριο, στο οποίο εικάζεται πως δεν κήκε λόγω παρέμβασης των δυνάμεων της πυροσβεστικής αλλά και των κατοίκων της περιοχής, οι οποίοι έπαιξαν σημαντικό ρόλο στη κατάσβεση της πυρκαγιάς. Ακόμη μια περιοχή βρίσκεται στο νοτιοδυτικό κομμάτι, όπου η προσομοίωση εξάγει ως καμένη έκταση τους λόφους νότια του οικισμού της Λίμνης αλλά και το Πευκόδασος στο Όρος Καντήλι. Εκεί εκτός από τη παρέμβαση των ανθρώπινων δυνάμεων, η λάθος προσομοίωση μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη ενός μεγάλου νταμαριού (περιοχή εξαγωγής πετρωμάτων), το οποίο βρίσκεται ανάμεσα στο όρος Καντήλι και τη θάλασσα, κάτι που δεν έλαβε υπόψη η προσομοίωση.

Οι περιπτώσεις αυτές έχουν μια παραδοχή. Το λογισμικό FlamMap, δεν μπορεί να διαχωρίσει χρονικά την έναρξη της πυρκαγιάς, οπότε και οι τρεις εστίες αποτελούν για αυτό εστίες έναρξης μια ταυτόχρονης πυρκαγιάς. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο μιας και η διαδρομή που μπορεί να ακολουθήθηκε, όπως θα παρουσιαστεί και παρακάτω, είναι λιγότερο από μια ώρα, δηλαδή το χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Αν από την άλλη θεωρηθεί πως η πυρκαγιά είχε μια σχεδόν γραμμική πορεία τις ημέρες που έκαιγε, δηλαδή μεταπηδούσε από τη μια περιοχή στην άλλη σε βάθος χρόνου, τότε το πότε ακριβώς χρησιμοποιήθηκαν τα σημεία αυτά ως εστίες έναρξης δεν αποτελούν τροχοπέδη στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων, αφού δεν επηρεάζουν η μία την άλλη με σαφή τρόπο. Μπορούν δηλαδή να θεωρηθούν ως τρεις διαφορετικές εστίες έναρξης διαφορετικών πυρκαγιών, οι οποίες ενώθηκαν ώστε να δημιουργήσουν ένα μεγάλο πύρινο μέτωπο, το οποίο άφησε αυτή τη καμένη έκταση στο διάβα του.

4.4 Δείκτες F-Score

Για τον έλεγχο της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων, πέραν της οπτικής αξιολόγησης, υπολογίστηκε, για κάθε περίπτωση ο δείκτης F-Score. Ο δείκτης F-Score είναι μια μέτρηση για την εγκυρότητα της εκάστοτε δυαδικής ταξινόμησης (Wikipedia, 2023). Υπολογίζεται μέσω άλλων δύο δεικτών, των Precision (Ακρίβεια) και Recall (Ανάκληση). Ο δείκτης Precision ποσοτικοποιεί τον αριθμό των σωστών θετικών προβλέψεων που έγιναν, ενώ ο δείκτης Recall ποσοτικοποιεί τον αριθμό των σωστών θετικών προβλέψεων μέσα σε όλες τις θετικές προβλέψεις που θα μπορούσαν να είχαν γίνει, δηλαδή έναν αριθμό των χαμένων θετικών προβλέψεων (Machine Learning Mastery, 2020).

Τα δεδομένα που χρειάζονται οι παραπάνω δείκτες για να υπολογιστούν στη συγκεκριμένη περίπτωση, μεταφράζονται σε δυαδικές εικόνες των αποτελεσμάτων της

προσομοίωσης αλλά και της καμένης έκτασης. Ο έλεγχος θα γίνει σε δύο βάσεις. Πρώτα θα ελεγχθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με την ταξινόμηση της καμένης έκτασης που αναλύεται σε προηγούμενο κεφάλαιο και μετέπειτα τα ίδια αποτελέσματα θα ελεγχθούν με δοσμένα όρια της καμένης έκτασης, από την υπηρεσία Copernicus.

Για τον υπολογισμό των παραπάνω δεικτών, λοιπόν, δημιουργήθηκαν δυαδικές εικόνες για την καμένη έκταση (αυτήν που παράχθηκε μέσω ταξινόμησης και την δοσμένη οριοθετημένη έκταση του Copernicus) αλλά και για μια από τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Οι δυαδικές εικόνες δημιουργήθηκαν με τη χρήση του Raster Calculator, δίνοντας τη τιμή 0 όπου η εικόνα παρουσίαζε No Data και 1 όπου ήταν διαφορετικές οι τιμές. Μετά την δημιουργία των εικόνων αυτών, έγινε ο υπολογισμός των κατάλληλων εικόνων που χρειάζονται για τους δείκτες Precision και Recall. Αυτές είναι οι εικόνες που περιέχουν τις σωστές προβλέψεις κάθε αποτελέσματος (True Positive), τις υποεκτιμήσεις, οι οποίες αναφέρονται στις περιοχές όπου ήταν καμένη έκταση ενώ η προσομοίωση έδειχνε αλλιώς (False Negative) και τις υπερεκτιμήσεις, δηλαδή τις περιοχές όπου η προσομοίωση έδειχνε καμένη έκταση, ενώ το υπόβαθρο όχι (False Positive). Ο υπολογισμός αυτών των εικόνων, όπως και προηγουμένως, έγινε με τη χρήση του Raster Calculator. Έπειτα με τη χρήση της εντολής Raster Layer Unique Values Report, έγινε εξαγωγή των στοιχείων που ήταν απαραίτητα για τον υπολογισμό των δεικτών, δηλαδή τα εικονοστοιχεία κάθε εικόνας, που ανήκαν στη τιμή 1. Ο αριθμός αυτός των εικονοστοιχείων χρησιμοποιήθηκε για κάθε περίπτωση ώστε να γίνουν οι παρακάτω πράξεις. Θα δώσουμε το όνομα της κάθε εικόνας, ανάλογα με το περιεχόμενο της, στον αριθμό των εικονοστοιχείων, ώστε να είναι ξεκάθαρο τι χρειάζεται για τον υπολογισμό.

Εξίσωση 4 Υπολογισμός Δείκτη Precision

$$Precision = \frac{True\ Positive}{True\ Positive + False\ Positive}$$

Εξίσωση 5 Υπολογισμός Δείκτη Recall

$$Recall = \frac{True\ Positive}{True\ Positive + False\ Negative}$$

Εξίσωση 6 Υπολογισμός Δείκτη F-Score

$$F\ Score = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall}$$

Πίνακας 9 Δείκτες Precision, Recall & F-Score για τις τρεις περιπτώσεις και υπόβαθρο καμένης έκτασης τη ταξινόμηση προηγούμενου κεφαλαίου

Εστίες Έναρξης	Precision	Recall	F_Score
1	0,67	0,40	0,50
2	0,72	0,81	0,76
3	0,70	0,87	0,78

Πίνακας 10 Δείκτες Precision, Recall & F-Score για τις τρεις περιπτώσεις και υπόβαθρο καμένης έκτασης της υπηρεσίας Copernicus

Εστίες Έναρξης	Precision	Recall	F_Score
1	0,81	0,37	0,51
2	0,88	0,77	0,82
3	0,88	0,84	0,86

Τα αποτελέσματα των δεικτών ποσοτικοποιούν την οπτική κριτική που έγινε σε αυτά. Στη περίπτωση της μιας εστίας έναρξης ο δείκτης αγγίζει το 0,5 και στις δύο περιπτώσεις. Η ακρίβεια είναι σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, ωστόσο είναι παρόμοια και στις δύο περιπτώσεις. Αυτό είναι απόδειξη του ότι το δοσμένο υπόβαθρο καμένης έκτασης με αυτό της ταξινόμησης δεν διαφέρουν, σε εκείνο το σημείο. Στη περίπτωση των δύο εστιών ο δείκτης ανεβαίνει απότομα και φτάνει το 0,76 για το υπόβαθρο της ταξινόμησης και 0,82 για το υπόβαθρο Corine. Εδώ παρατηρείται μια διαφορά της τάξης του 0,6, αρκετά σημαντική, η οποία μπορεί να πηγάζει από δύο αιτίες. Η μια είναι η αστοχία της ταξινόμησης και των κανόνων ασαφούς λογικής που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να οριοθετηθεί η καμένη έκταση, κάτι που δεν μπορεί ακριβώς να επαληθευτεί γιατί δεν γνωρίζουμε με τόση λεπτομέρεια την καμένη έκταση. Η άλλη αιτία που μπορεί να έχει επηρεάσει την διαφορά αυτή είναι η απλούστευση και η γενίκευση που επιδέχτηκε η καμένη έκταση κατά το Copernicus. Επειδή ακριβώς δεν υπάρχει καταγεγραμμένη με πολύ λεπτομέρεια η καμένη έκταση, αυτό που υπάρχει σαν υπόβαθρο είναι “στρογγυλεμένο” ώστε να δείχνει χονδρικά το αποτύπωμα της πυρκαγιάς. Αυτό δεν σημαίνει ότι μέσα σε αυτήν την έκταση δεν υπάρχουν περιοχές που δεν κάηκαν ή που η ζημιά που υπέστη δεν ήταν τόσο μεγάλη, με αποτέλεσμα να έχουν διαφορετική φασματική υπογραφή σε σχέση με άλλες. Το ίδιο ισχύει και για την τρίτη περίπτωση όπου η διαφορά μεγαλώνει και φτάνει το 0,8. Η δικαιολόγηση είναι ίδια με της παραπάνω περίπτωσης προσθέτοντας πως στη τρίτη περίπτωση οι επιπλέον εκτάσεις που έχει σαν αποτέλεσμα η προσομοίωση, οφείλονται στην αύξηση της διαφοράς. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης προσεγγίζει πιο πολύ το “στρογγυλεμένο” υπόβαθρο του Copernicus, εξαιτίας αυτών των εκτάσεων που μπορεί να εξέχουν από τα όρια της ταξινομημένης έκτασης, αλλά ένα κομμάτι τους να

βρίσκεται εντός αυτού του υπόβαθρου. Δείκτες F-Score πάνω από 0,8 δείχνουν μια πολύ καλή ακρίβεια, ενώ αυτοί της τάξης του 0,7- 0,8 είναι αξιόλογοι.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Τα μοντέλα προσομοίωσης πυρκαγιών και συγκεκριμένα το FlamMap, έχουν μεγάλες δυσκολίες να ανταποκριθούν στο μεσογειακό δασικό οικοσύστημα, διότι έχουν κατασκευαστεί σε άλλες συνθήκες. Η προσπάθεια αντιστοίχισης της δασικής βλάστησης της Μεσογείου, με τα Μοντέλα Καύσιμης Ύλης, σχεδιασμένα για οικοσυστήματα των Η.Π.Α., ενέχει προβληματισμούς και σίγουρα παραδοχές. Επιπλέον, η εύρεση των κατάλληλων δεδομένων και ο υπολογισμός των εκάστοτε παραμέτρων, μπορεί να δυσκολέψει τον χρήστη. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη πλούσιας και επεξηγηματικής βιβλιογραφίας, είτε γίνεται λόγος για παγκόσμιο επίπεδο, είτε για την Ελλάδα, στην οποία το ζήτημα σπανίως έχει γίνει αντικείμενο μελέτης.

Η χρήση των μοντέλων αυτών μέχρι στιγμής στην Ελλάδα περιορίζεται στην μελέτη παλαιότερων πυρκαγιών με υπάρχοντα δεδομένα και στον έλεγχο της ακρίβειας των αποτελεσμάτων τους. Με την ίδια φιλοσοφία ξεκίνησε και η παρούσα εργασία, εμπεριέχοντας τις παραδοχές και τους προβληματισμούς που αναφέρθηκαν, προσπαθώντας να περιοριστούν όσο γίνεται. Στη περίπτωση αυτή λοιπόν, το μοντέλο προσομοίωσης, έδωσε αξιόλογα αποτελέσματα και ανταποκρινόταν στις αλλαγές δεδομένων και παραμέτρων, όταν αυτές γινόταν με σκοπό τον έλεγχο της εγκυρότητας τους (π.χ. θέσεις εστιών έναρξης, ποσοστά περιεχόμενης υγρασίας, κ.α.). Πολύ σημαντική επίσης είναι η δημιουργία των κατάλληλων θεματικών επιπέδων που χρειάζονται και κυρίως η ταξινόμηση. Λάθος ταξινόμηση, μπορεί να οδηγήσει σε χονδροειδή σφάλματα, τα οποία καταλήγουν σε μη έγκυρη αντιστοίχιση βλάστησης με Μ.Κ.Υ και συνεπώς σε στρεβλή προσομοίωση. Επίσης, κάτι που στην Ελλάδα αποτελεί εμπόδιο στη χρήση των μοντέλων αυτών, είναι η έλλειψη δεδομένων γύρω από τη παρέμβαση των πυροσβεστικών δυνάμεων. Η γνώση των θέσεων των οχημάτων και των δυνάμεων θα μπορούσε να δημιουργήσει εν δυνάμει αντιπυρικές ζώνες στο λογισμικό με αποτέλεσμα να εξαχθεί ένα πιο ρεαλιστικό αποτέλεσμα. Παρ' όλους τους προβληματισμούς και τα εμπόδια, η προσομοίωση δούλεψε και ανταποκρίθηκε, δίνοντας έτσι ένα ακόμα παράδειγμα, το οποίο θα μπορεί να αξιοποιηθεί στο μέλλον.

Κεφάλαιο 6. Προοπτικές

Σίγουρα δεν μπορεί να ειπωθεί πως η μελέτη αυτή εμπεριέχει εξολοκλήρου ακριβή αποτελέσματα, για την συγκεκριμένη πυρκαγιά, αλλά η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί, βελτιωμένη, για μελλοντική χρήση. Ένα τόσο συχνό και καταστροφικό φαινόμενο, όπως είναι οι δασικές πυρκαγιές στην Ελλάδα, θα έπρεπε να αποτελεί πεδίο μελέτης και έρευνας, με σκοπό την απώτερη αποφυγή, όχι του φαινομένου, διότι είναι αδύνατον, αλλά των ανεπιθύμητων επιπτώσεων που αφήνει στο διάβα του. Η προσπάθεια κατανόησης της συμπεριφοράς μιας δασικής πυρκαγιάς στον μεσογειακό και συγκεκριμένα στον ελλαδικό χώρο, αποτελεί την αφετηρία για την λήψη αποφάσεων και μέτρων.

Η εύρεση μοτίβων στις πυρκαγιές που έχουν συμβεί ανά τα χρόνια στη περιοχή, μέσα από τις προσομοιώσεις, θα μπορούσε να δημιουργήσει έναν μηχανισμό απότρεψης των επιπτώσεων αυτών που αναφέρθηκαν. Ο μηχανισμός αυτός μπορεί να περιέχει τη δημιουργία περαιτέρω αντιπυρικών ζωνών, την τοποθέτηση πυροσβεστικών δυνάμεων σε επίμαχα σημεία, με το ξεκίνημα μιας πυρκαγιάς, την ενημέρωση των κατοίκων σχετικά με την επικινδυνότητα δραστηριοτήτων που οδηγούν σε εμπρησμούς εξ' αμελείας. Όταν υπάρχουν γνώσεις για την πορεία και τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς, έστω και υποθετικά με τη χρήση αντίστοιχων δεδομένων, τότε η αντιμετώπιση της καθίσταται σημαντικά ευκολότερη. Για αυτό τον λόγο είναι σημαντική η ανάπτυξη γνώσεων και εργαλείων γύρω από το αντικείμενο των μοντέλων προσομοίωσης πυρκαγιάς στην Ελλάδα.

Επίλογος

Μελετώντας την παραπάνω εργασία, τα δεδομένα και τα αποτελέσματα της, γεννιούνται αρκετά ερωτήματα. Πως μπορεί μια πυρκαγιά να πάρει τέτοια διάσταση και διεύθυνση με ανέμους που κινούνται αντίθετα; Είναι αρκετή η έλλειψη σχετικής υγρασίας στην ατμόσφαιρα για να δικαιολογήσει ένα τέτοιο αποτέλεσμα; Είναι αποτέλεσμα φυσικής καταστροφής ή υπάρχει και ανθρώπινη παρέμβαση; Αν ισχύει οποιαδήποτε από τις δύο περιπτώσεις, θα μπορούσε να είχε αποτραπεί το μέγεθος της; Σίγουρα η έλλειψη δεδομένων γύρω από τη παρέμβαση της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας, δεν μας αφήνει να έχουμε μια σταθερή άποψη. Όσοι κόσμος έζησε εκείνες τις ημέρες παρακολουθώντας τα δημοσιεύματα, είτε πιο ορθά μιλώντας με κόσμο της περιοχής, ξέρει πολύ καλά την στάση που κράτησαν οι δυνάμεις της Πυροσβεστικής. Όπως οι ίδιοι ανέφεραν συνεχώς *“Μας άφησαν να καούμε”*. Αυτό που μπορεί να ειπωθεί σε αυτό το σημείο είναι πως πέρα από την εγκληματική αδιαφορία των υπεύθυνων, είναι ανεξήγητη η πορεία της πυρκαγιάς με τα επίσημα δεδομένα. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, αλλά και όλες

τις προσπάθειες που έγιναν μέχρι να προσεγγιστεί το αποτέλεσμα, η πεποίθηση πως η πυρκαγιά αυτή είχε εξ αρχής ανθρώπινη παρέμβαση και αποτελεί περίπτωση εμπρησμού, γίνεται όλο και δυνατότερη.

Η Βόρεια Εύβοια χαρακτηρίζεται από μια τρομερή ομορφιά, είτε γίνεται λόγος για τα δάση της, είτε για τις παραλίες της. Η ομορφιά αυτή ωστόσο, δεν έχει αξιοποιηθεί με στόχο της κεφαλαιοποίησης της, αλλά με στόχο την διατήρηση της και την απόλαυση της από τους κατοίκους και τους επισκέπτες της. Ακόμη, τα δάση και τα βουνά της έχουν υποστεί την ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση. Δεν είναι απίθανο όλα αυτά, να δημιουργούν σκέψεις γύρω από τη φύση της έναρξης της πυρκαγιάς. Εξάλλου, δεν είναι λίγες οι φορές που στον ελλαδικό χώρο (και στην Εύβοια συγκεκριμένα), έχουν υπάρξει τεράστιες καταστροφές και την επόμενη μέρα συντάσσονται μεγάλοι σχεδιασμοί για την ανάπλαση των περιοχών με διαφορετικούς όρους. Ανεμογεννήτριες, αστική δόμηση, τουριστικά θέρετρα, ιδιωτικοποίηση δασικών εκτάσεων κ.α.

Η επόμενη μέρα για την πυρκαγιάς της Β. Εύβοιας παρουσίασε το ίδιο ακριβώς μοτίβο. Οι κάτοικοι προσπάθησαν να ακουστούν, να δείξουν την σοβαρότητα των επιπτώσεων, την εγκληματική στάση που κρατήθηκε αλλά δυστυχώς αυτό “ξεφούσκωσε”, αφού ο δημόσιος διάλογος παρέμεινε στο κομμάτι των επιδοτήσεων και των διαγωνισμών ανάδοχων εταιριών. Τέτοιες καταστάσεις, εν έτη 2021 στη προκειμένη, θα έπρεπε να μην υπήρχαν ούτε σαν σενάρια, δεδομένης της τεχνολογικής ανάπτυξης των τελευταίων δεκαετιών. Με γνώμονα αυτό και την έμπρακτη και αμερόληπτη βοήθεια της επιστημονικής κοινότητας, δεν θα υπάρξει κάτι αντίστοιχο μελλοντικά.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αθανασίου Μ. (2015). "Συμβολή στην επιλογή της καλύτερης μεθόδου πρόβλεψης της συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών για την Ελλάδα". Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Αθανασίου Μ., Ξανθόπουλος Γ. (2009). "Η Συμπεριφορά των Μεγάλων Δασικών Πυρκαγιών του 2007 στην Ελλάδα". Εισήγηση Συνεδρίου, 14^ο Πανελλήνιο Δασολογικό Συνέδριο

Αργιαλάς Δ. (1999). "Φωτοερμηνεία– Τηλεπισκόπηση", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εκπαιδευτικές Σημειώσεις Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα.

Γκουρμπάτσης Α. (2021). "Οι φονικές και καταστρεπτικές πυρκαγιές στην Ελλάδα 1981-2020"

ΕΛ.ΣΤΑΤ Απογραφή Πληθυσμού Κατοίκων 2021

Εφημερίδα της Κυβερνήσεως (2019), Τεύχος Πρώτο, Αρ. Φύλλου 211

Ηλιόπουλος Ν. (2013). "Πυρο-Μετεωρολογία, Πυρκαγιές και Κλιματική Αλλαγή". Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Γεωγραφίας

Κολοπτάς Ε. (2013). "Η Αντικειμενοστρεφής Ανάλυση Τηλεπισκοπικών Εικόνων στη Μελέτη Θεμάτων του Περιβάλλοντος". Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Ντίνης Χ. (2022). "Εκτίμηση κινδύνου και διερεύνηση εναλλακτικών έγκαιρης αντιμετώπισης δασικής πυρκαγιάς με χρήση αντικειμενοστρεφούς ανάλυσης δορυφορικών εικόνων και μοντέλου διάδοσης πυρκαγιάς. Μελέτη περίπτωσης Δ. Κόνιτσας". Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) <<Περιβάλλον και Ανάπτυξη>>

Πουλάκη Π. "Χαρτογράφηση καύσιμης ύλης με Αντικειμενοστρεφή Ανάλυση Εικόνας για χρήση στο μοντέλο δασικής πυρκαγιάς Farsite. Μελέτη Περίπτωσης: Πυρκαγιά Πλωμαρίου Λέσβου 1994". Διπλωματική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Περιβάλλον και Ανάπτυξη Ορεινών Περιοχών.

Πύραρχος Διονύσιος Βορίσης (2001). Δασικές πυρκαγιές

Ρούσου Ο. (2013). "Χωρική Ανάλυση Κατανομής Καύσιμης Ύλης Για Διαχείριση Πυρκαγιών". Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Γεωγραφίας, Εργαστήριο Γεωγραφίας και Φυσικών Καταστροφών.

Σταμπουλίδης Κ. (2017). ‘‘Προσομοίωση της Εξέλιξης Δασικών Πυρκαγιών με Προσδιορισμό Μοντέλων Καύσιμης Ύλης από Τηλεπισκοπικά Δεδομένα’’. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διεπιστημονικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) <<Περιβάλλον και Ανάπτυξη>>

Φανδρίδη Χ. (2020). ‘‘Ανάλυση Τηλεπισκοπικών Εικόνων με Σκοπό τη Δημιουργία Χάρτη Επικινδυνότητας Πυρκαγιάς’’. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διεπιστημονικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) <<Περιβάλλον και Ανάπτυξη>>

Φράγκου Σ. (2016). ‘‘Μοντέλα Αλλαγών Χρήσης/Κάλυψης Γης για το Δήμο Μάνδρας-Ειδυλλίας για την Περίοδο 1993-2010 με τη Χρήση Δορυφορικών Εικόνων Landsat’’. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Albini, F.A. (1976a). ‘‘Estimating wildfire behavior and effects’’. Gen. Tech. Rep. INT30. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

Alexander M.E. (2000). ‘‘Fire Behaviour as a Factor in Forest and Rural Fire Suppression’’. Forest Research, Rotorua, in association with the National Rural Fire Authority, Wellington. Forest Research Bulletin No. 197, Forest and Rural Fire Scientific and Technical Series, Report

Alexander M. E. and M. G. Cruz. (2013). ‘‘Limitations on the accuracy in model predictions of wildland fire behavior: A state-of-the-knowledge overview’’. The Forestry Chronicle Vol. 89, No 3 May/June 2013.

Andrews P.L. (1986). ‘‘BEHAVE. Fire behavior prediction and fuel modelling system’’. Burn subsystem, USDA Forest Service. Ogden, UT.

Andrews P.L. and C.H. Chase. (1989). ‘‘BEHAVE: Fire behavior and prediction modeling System—Burn subsystem, Part II’’. General Technical Report INT-260. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Research Station.

Andrews P.L., Bevins C.D. and R.C. Seli. (2005). ‘‘BehavePlus fire modeling system, Version 4.0: User’s Guide’’. General Technical Report RMRS-GTR-106WWW revised. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

Andrews, P.L. (2009). ‘‘BehavePlus fire modeling system, version 5.0: Variables’’. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-213WWW Revised. Fort Collins, CO: USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Auburn University (2022), ‘‘Radiation Exchanges Between Surfaces’’. Lecture, Auburn University, Alabama, USA

Belcher et al., (2021) ‘‘UK wildfires and their climate challenges.’’ Expert Led Report Prepared for the third Climate Change Risk Assessment.

Burgan, R.E. and R.C. Rothermel. (1984).’’ BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modelling system—FUEL subsystem’’. Gen. Tech. Rep. INT-167. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

Cardille Jeffrey Alan, Monica G. Turner, Stephen J. Ventura, (2001). ‘‘Environmental and Social Factors Influencing Wildfires in The Upper Midwest, United States’’. Article, Ecological Applications

C. Zhai, S. Zhang and Z. Cao et al. (2020). ‘‘Learningbased prediction of wildfire spread with real-time rate of spread measurement.’’ Article, Combustion and Flame 215. Elsevier Inc.

Dimitrakopoulos A. (2002). ‘‘Mediterranean Fuel Models and Potential Fire Behavior in Greece’’. Article, International Journal of Wildland Fire

Finney, M.A. (1998). ‘‘FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation.’’ Revised (2004). Res. Pap. RMRS-RP-4, Ogden, UT: USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Finney M.A. (2006). ‘‘An Overview of FlamMap Fire Modeling Capabilities’’ USDA, Forest Service Proceedings, RMRS-P-41

Kalabokidis K.D. (2004). ‘‘Automated forest fire and flood hazard protection system. Disaster management: linking people and the environment.’’ GeoInformatics Mag 7

Pyne S.J., Andrews P.L. and R.D. Laven. (1996). ‘‘Introduction to Wildland Fire, 2nd edition.’’ John Wiley & Sons, Inc., New York.

Riano D., Chuvieco E., Salas J., Palacios-Orueta A., and Bastarrika A. (2002). ‘‘Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems.’’ Canadian Journal of forest Research 32

Rothermel R.C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service, General Technical Report INT-115.

Rothermel, R.C. (1983). ‘‘How to predict the spread and intensity of forest and range fires.’’ Gen. Tech. Rep. INT-143. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

Schroeder M.J. and C.C. Buck. (1970). ‘‘Fire weather. A guide to application of meteorological information to forest fire control operations.’’ Agric. Handb. 360. Washington, DC: USDA, Forest Service.

Scott J.H., and Burgan R.E., (2005). Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. General Technical Report RMRS-GTR-153. Fort Collins, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station

USGS (1997). ‘‘A Brief History of The Landsat Program’’ USGS Fact Sheet 084-97 December 1997. US Ministry of Interior, US Geological Survey

Van Wagner, C. E. (1985). Fire behavior modelling - how to blend art and science. In proceedings of the 8th National Conference on Fire and Forest Meteorology, April 29-May 2, 1985, Detroit, Michigan, USA. Society of American Foresters, Washington, DC, USA.

Viegas, D.X. (2006). Parametric study of an eruptive fire behavior model. International Journal of Wildland Fire

Διαδικτυακές Πηγές

National Wildfire Coordinating Group

<https://www.nwcg.gov/publications/pms437/fuel-moisture/dead-fuel-moisture-content>

<https://www.nwcg.gov/publications/pms437/fuel-moisture/live-fuel-moisture-content>

<https://www.nwcg.gov/publications/pms437/crown-fire/spotting-fire-behavior>

Redzone

<https://www.redzone.co/2015/12/19/wildfire-101-fire-anatomy/>

USGS

<https://www.usgs.gov/faqs/what-radiometric-resolution>

<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>

<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-9>

BehavePlus

<https://www.frames.gov/behaveplus/home>

Missoula Fire Sciences Laboratory

<https://www.firelab.org/project/flammap>

GISGeography

<https://gisgeography.com/ndvi-normalized-difference-vegetation-index/>

Towards Data Science

<https://towardsdatascience.com/understanding-random-forest-58381e0602d2>

Machine Learning Mastery

<https://machinelearningmastery.com/precision-recall-and-f-measure-for-imbalanced-classification/>

NASA Landsat Science

<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>

Satellite Imaging Corporation

<https://www.satimagingcorp.com/>

SentinelHub

<https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/landsat-8/ndwi/>

Wikipedia

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CF%80%CE%B9%CF%83%CE%BA%CF%8C%CF%80%CE%B7%CF%83%CE%B7>

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%AE%CE%BC%CE%BF%CF%82_%CE%9C%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%BF%CF%85%CE%B4%CE%AF%CE%BF%CF%85%E2%80%93%CE%9B%CE%AF%CE%BC%CE%BD%CE%B7%CF%82%E2%80%93%CE%91%CE%B3%CE%AF%CE%B1%CF%82_%CE%86%CE%BD%CE%BD%CE%B1%CF%82

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%AE%CE%BC%CE%BF%CF%82_%CE%99%CF%83%CF%84%CE%B9%CE%B1%CE%AF%CE%B1%CF%82%E2%80%93%CE%91%CE%B9%CE%B4%CE%B7%CF%88%CE%BF%CF%8D

<https://en.wikipedia.org/wiki/F-score>

Δήμος Μαντουδίου-Λίμνης-Αγίας Άννας

<http://www.malian.gov.gr/>

Δήμος Ιστιαίας-Αιδηψού

<https://dimosistiaiasaidipsou.gr/>

WonderGreece

http://www.wondergreece.gr/v1/el/Perioxes/N_Eyboias