



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ  
UNIVERSITY OF PIRAEUS

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων

Π.Μ.Σ.: *Κλιματική Κρίση και Τεχνολογίες  
Πληροφορικής και Επικοινωνιών*

**“Μελέτη διαχείρισης και εκτίμησης κινδύνου  
πυρκαγιάς με εφαρμογή πολυκριτηριακής  
ανάλυσης και αλγορίθμων μηχανικής εκμάθησης  
σε περιβάλλον G.I.S.”**

---

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**Μηνάς Χατζηγεωργιάδης**

ΑΜ: MKK2032

Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωάννης Μανιάτης

Συνεπιβλέπων: Δρ. Αθανάσιος Δογάνης

Πειραιάς 2022





## Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο

**“Μελέτη διαχείρισης και εκτίμησης κινδύνου πυρκαγιάς με εφαρμογή πολυκριτηριακής ανάλυσης και αλγορίθμων μηχανικής εκμάθησης σε περιβάλλον G.I.S.”**

καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και οι πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Πειραιώς αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Χατζηγεωργιάδης Μηνάς , 2022 , Πειραιάς

Υπογραφή Φοιτητή

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των σπουδών μου για την απόκτηση του μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών “Κλιματική Κρίση και Τεχνολογίες Πληροφορικής και Επικοινωνιών” (MSc in Climate Crisis and Information and Communication Technologies) του τμήματος Ψηφιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Πειραιώς.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθ. Ιωάννη Μανιάτη, διευθυντή του Π.Μ.Σ. “Κλιματική Κρίση και Τεχνολογίες Πληροφορικής και Επικοινωνιών” και τον Δρ. Μηχ. Αθανάσιο Δογάνη για την συνεχή υποστήριξη που μου παρείχαν καθ’ όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής. Οι συμβουλές και οι υποδείξεις τους υπήρξαν καθοριστικές, ώστε η εργασία μου να αποκτήσει λογική ροή και επιστημονική δομή. Οι διαλέξεις του Καθ. Ιωάννη Μανιάτη αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης για το θέμα της διπλωματικής, ενώ κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής, παρείχε καθοριστικές συμβουλές ώστε να διαμορφωθεί η τελική μορφή της εργασίας. Οι συμβουλές του Δρ. Μηχ. Αθανάσιου Δογάνη διευρύναν τις γνώσεις μου στα θέματα των Σ.Γ.Π., ενώ με τη τεχνογνωσία του στα Σ.Γ.Π. μου παρείχε καθοριστικές οδηγίες στα δυσκολότερα σημεία της έρευνας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το Τμήμα Επιχειρησιακής Πληροφορικής & Γεωχωρικής Ανάλυσης του Πυροσβεστικού Σώματος και συγκεκριμένα τον κ. Αθανάσιο Ιωαννίδη για την συνεργασία του. Ένα μεγάλο τμήμα της διπλωματικής βασίζεται στα δεδομένα που παρείχε το Τμήμα Επιχειρησιακής Πληροφορικής & Γεωχωρικής Ανάλυσης, ενώ οι συμβουλές και η τεχνογνωσία του Τμήματος στα θέματα της διαχείρισης του κινδύνου πυρκαγιάς αποτέλεσαν σημαντική πηγή της έρευνας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ανδρέα Αντωνάκο, Προϊστάμενο του Τμήματος Φυσικών Καταστροφών της Γενικής Γραμματείας Πολιτικής Προστασίας. Οι συμβουλές και οι κατευθυντήριες οδηγίες που μου έδωσε, στα αρχικά στάδια της διπλωματικής, ήταν καθοριστικές για την επιλογή του θέματος και τη διαμόρφωση της βιβλιογραφίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ιώ Δογάνη για την υποστήριξή της καθ’ όλη τη διάρκεια της διπλωματικής, καθώς επίσης και για τις σημαντικές συμβουλές που μου έδωσε, με τη τεχνογνωσία της στα θέματα των Σ.Γ.Π., ώστε να ξεπεραστούν τεχνικές δυσκολίες. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω την Ειρήνη Παράσχη για τη βοήθεια της στη μετάφραση των κειμένων.

Τέλος, Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου Δημήτρη, Δέσποινα και Άννα για την ηθική υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.



## Abstract

In the next few years, climate change is expected to lead to a significant increase of fire danger in Greece, provoking detrimental consequences in the environment and human beings. The effects of climate change have already been observable, especially during the summer period. For this reason, the term “Climate Crisis” is often used instead of “Climate Change”, so as to point out that the impacts of climate change will not be faced in the distant future; on the contrary, they are currently visible in the 21st century. The Geographical Information Systems (GIS) enable the conduction of in-depth studies and management models on fire risk, as well as the design of plans on proactive measures. In the present study, a flexible GIS-based workflow is suggested, with the aim to present the factors responsible for fire risk and their combination for fire hazard assessment, as well as monitoring shelter management in order to eliminate the possible dangers.

The National Park Forest of Dadia-Lefkimi-Soufli, including the wider area of Evros, was chosen for the implementation of the workflow and the intergraded models in the study area, as it is one of the most important protected areas in Greece.

The study was based on freely available and reliable research data, derived from national and international sources. These data were analysed with the aid of the GIS platform, in order to better illustrate the factors contributing to fire risk. Throughout the study, basic GIS tools and previous applications were used, such as machine learning algorithms (Support Vector Machine, Unsupervised Machine Learning), map algebra and geostatistics.

Afterwards, the factors were combined using multi-criteria decision analysis (MCDA) and analytic hierarchy process (AHP), in order to create a fire risk assessment model. The model was applied in Evros county (as mentioned previously) with the aim to measure the fire risk in the National Park Forest of Dadia-Lefkimi-Soufli. The results of this fire assessment study showed 3 major fire risk areas. The first one is located in the northern part on the national park, near the settlement of Giannouli. The second and widest area is located in the centre of the national park, around the invisible straight line that links the settlement of Kotronia and the settlement of Lagina. The third area is located on the south and more specifically in the northern part of the settlement Lefkimi. It should be pointed out that the average risk in the area is very high, fact that stresses the importance of monitoring the national park, especially during the summer period.

The results of fire risk for the National Park Forest of Dadia-Lefkimi-Soufli, the data for the existing monitoring shelters of the fire department in Evros, along with the protected areas constituted the basis for investigating the monitoring capabilities of the fire brigade and creating a model which detects the ideal places for fire lookout tower construction. In order to evaluate the potential of the existing infrastructure, a basic visibility model was created. According to the results, the existing fire monitoring infrastructure network, in full function, covers the biggest part of the county. More specifically, the 88% of the county is monitored by at least one fire lookout and the biggest part of these districts includes forests and protected areas.

The data provided from the spots of the existing fire lookout towers were processed using the Random Forest Regression algorithm and were combined with location suitability factors (altitude, road distance, slope, ridge). Also, Multicriteria analysis was used, in order to classify Evros county according to the possibility of constructing fire lookout towers. The suitable areas, according to the above mentioned criteria, cover a very limited district comparing to the total area of Evros county. Particularly, the suitable areas cover the 14% and the highly suitable areas only 1%. Consequently, the creation of a model capable of detecting these areas appears to be of great importance.

Out of the highly suitable areas, 4 new spots were selected, which are expected to expand surveillance in the protected areas of the county. The selection of these spots was succeeded by the combination of the results of the visibility model (offered from the existing monitoring infrastructure of the fire brigade), protection policies in force in each area, land cover and fire risk models. Each one of the 4 spots can improve the visibility of important forestal areas, which are included in Natura network 2000. Apart from the suitability model, alternative forest monitoring methods are suggested, with the placement of monitoring devices into wind parks.

In the following years, fire risk is expected to increase significantly in many areas of Greece. As a result, more and more public and private stakeholders will be obliged to face the dangers of wildfires in areas under their responsibility. In this context, the models which were created and applied in GIS platform, are presented on a general basis in the present thesis and can be used in additional areas of Greece apart from the Evros county. In addition to the model flexibility, the freely available data that were used, can give the opportunity to apply the workflow developed by any stakeholder.

---

**Keywords:** GIS, Fire risk parameters, Fire risk model, Fire risk mitigation, Land cover change, Support Vector Machine, SVM, Visibility model, Suitability model, Multicriteria Discission Analysis, MCDA, Analytic Hierarchy Process, AHP, Geostatistics, National Park Forest Dadia Lefkimi Soufli, Evros, Greece, Firewatch towers.



## Περίληψη

Η Κλιματική Αλλαγή αναμένεται τα επόμενα χρόνια να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση του κινδύνου πυρκαγιάς στην Ελλάδα, με καταστροφικές συνέπειες στο φυσικό και τους ανθρώπινο περιβάλλον. Οι κλιματικές μεταβολές έχουν ήδη αρχίσει να γίνονται αντιληπτές, ιδιαίτερα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Για αυτό το λόγο πολλές φορές αντί για τον όρο “Κλιματική Αλλαγή” χρησιμοποιείται ο όρος “Κλιματική κρίση”, ώστε να τονιστεί πως οι κλιματικές μεταβολές δεν είναι κάτι που θα αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα στο μέλλον, αλλά έχουν ήδη ξεκινήσει να εμφανίζονται στον 21<sup>ο</sup> αιώνα. Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.) δίνουν τη δυνατότητα ολοκληρωμένης μελέτης και διαχείρισης του κινδύνου πυρκαγιάς και του σχεδιασμού των μέτρων πρόληψης. Σε αυτό το πλαίσιο στη παρούσα διπλωματική προτείνεται μια ευέλικτη ροή εργασιών σε πλατφόρμα Σ.Γ.Π. για την αποτύπωση των παραγόντων κινδύνου πυρκαγιάς, τον συνδυασμό τους για την εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς και την διαχείριση των υποδομών παρακολούθησης, για τη μετρίαση του. Για την απαραίτητη εφαρμογή της ροής εργασιών και των μοντέλων που ενσωματώθηκαν σε αυτή, επιλέχθηκε μια από τις σημαντικότερες προστατευόμενες περιοχές της Ελλάδας, το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και την ευρύτερη περιοχή του νομού Έβρου που το περιβάλλει.

Η μελέτη βασίστηκε σε ανοικτά και αξιόπιστα δεδομένα από διεθνείς και εθνικές πηγές. Τα δεδομένα αυτά αναλύθηκαν σε περιβάλλον Σ.Γ.Π. ώστε να αποτυπωθούν οι σημαντικότεροι παράγοντες που διαμορφώνουν το κίνδυνο πυρκαγιάς. Η ανάλυση ενσωματώνει βασικά εργαλεία των Σ.Γ.Π. και προηγμένες εφαρμογές, όπως αλγόριθμους μηχανικής εκμάθησης (Support Vector Machine), άλγεβρας χαρτών και Γεωστατιστικής.

Στη συνέχεια οι παράγοντες συνδυάστηκαν με την εφαρμογή Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (Multi-Criteria Decision Analysis) και Διεργασίας Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytic Hierarchy Process) για να δημιουργηθεί ένα **μοντέλο εκτίμησης κινδύνου πυρκαγιάς**. Το μοντέλο, όπως προαναφέρθηκε, εφαρμόστηκε στη περιοχή του νομού Έβρου για να εκτιμηθεί ο κίνδυνος πυρκαγιάς στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου. Το αποτέλεσμα της μελέτης κινδύνου ανέδειξε 3 βασικές περιοχές που παρουσιάζουν πολύ υψηλό κίνδυνο πυρκαγιάς. Η πρώτη περιοχή κινδύνου εντοπίζεται στο βόρειο τμήμα του Εθνικού Πάρκου, κοντά στον οικισμό Γιαννούλη. Η δεύτερη και πιο εκτενής περιοχή εντοπίζεται στο κέντρο του Εθνικού Πάρκου περιμετρικά της νοητής ευθείας που ενώνει τον οικισμό Κοτρωνία με τον οικισμό Λαγυνά. Η τρίτη και τελευταία περιοχή εντοπίζεται νότια και συγκεκριμένα στο βόρειο τμήμα του οικισμού Λευκίμμη. Παράλληλα, ο μέσος κίνδυνος στη περιοχή είναι υψηλός, γεγονός που καθιστά την παρακολούθηση του Εθνικού Πάρκου αναγκαία, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες.

Τα αποτελέσματα του κινδύνου πυρκαγιάς για το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου, τα δεδομένα για τις υφιστάμενες υποδομές παρακολούθησης του Πυροσβεστικού Σώματος στο νομό Έβρου και οι προστατευόμενες περιοχές, αποτέλεσαν τη βάση για τη **διερεύνηση των δυνατοτήτων παρακολούθησης** του Πυροσβεστικού Σώματος και τη δημιουργία ενός **μοντέλου καταλληλότητας για τον εντοπισμό θέσεων που μπορούν να κατασκευαστούν πυροφυλάκια**. Για την εκτίμηση των δυνατοτήτων παρακολούθησης των υφιστάμενων υποδομών του Πυροσβεστικού Σώματος δημιουργήθηκε ένα βασικό μοντέλο ορατότητας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, το υφιστάμενο δίκτυο των υποδομών παρακολούθησης (σε πλήρη λειτουργία) καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα του Νομού.

Συγκεκριμένα το **88%** του Νομού παρακολουθείται από τουλάχιστον ένα παρατηρητή και το μεγαλύτερο μέρος των περιοχών αυτών περιέχουν δασικές εκτάσεις και Προστατευόμενες Περιοχές.

Τα δεδομένα από τις θέσεις των υφιστάμενων πυροφυλακίων επεξεργάστηκαν με αλγόριθμο μηχανικής εκμάθησης Τυχαίων Δασών (Random Forest Regression) και συνδυάστηκαν με τους παράγοντες καταλληλότητας θέσης (Υψόμετρο, Απόσταση από δρόμους, Κλίση Εδάφους και Περιοχές κορυφογραμμών) με τη βοήθεια της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης, ώστε να **διαβαθμιστεί ο νομός Έβρου ανάλογα με τη δυνατότητα ανέγερσης πυροφυλακίων**. Οι περιοχές καταλληλότητας, σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια, καλύπτουν μια εξαιρετικά μικρή περιοχή συγκριτικά με την έκταση του νομού Έβρου. Συγκεκριμένα, οι κατάλληλες περιοχές καλύπτουν το 14% και οι περιοχές εξαιρετικής καταλληλότητας μόλις το 1%. Επομένως, η δημιουργία ενός μοντέλου που μπορεί να τις αναγνωρίσει είναι εξαιρετικά σημαντική.

Από τις περιοχές υψηλής καταλληλότητας επιλέχθηκαν 4 νέες θέσεις, οι οποίες διευρύνουν τη παρακολούθηση στις προστατευόμενες περιοχές του Νομού. Για την επιλογή των θέσεων συνδυάστηκαν τα αποτελέσματα του μοντέλου ορατότητας από τις υφιστάμενες υποδομές παρακολούθησης του Πυροσβεστικού Σώματος, το καθεστώς προστασίας κάθε περιοχής, η κάλυψη γης και το μοντέλο κινδύνου πυρκαγιάς. Κάθε μια από τις 4 θέσεις βελτιώνει την ορατότητα σε σημαντικές δασικές περιοχές που εντάσσονται στο δίκτυο Natura 2000. Παράλληλα με το μοντέλο καταλληλότητας, προτείνονται εναλλακτικές μέθοδοι παρακολούθησης των δασικών εκτάσεων με την τοποθέτηση συσκευών παρακολούθησης σε αιολικά πάρκα.

Τα επόμενα χρόνια αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά ο κίνδυνος πυρκαγιάς σε πολλές περιοχές της Ελλάδας, με αποτέλεσμα όλο και περισσότεροι δημόσιοι και ιδιωτικοί φορείς να χρειαστεί να εντοπίσουν και στη συνέχεια να διαχειριστούν το κίνδυνο πυρκαγιάς στη περιοχή ευθύνης τους. Σε αυτό το πλαίσιο τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν και εφαρμόστηκαν σε Σ.Γ.Π. στη παρούσα διπλωματική είναι γενικά και μπορούν να αξιοποιηθούν, πέρα από το νομό Έβρου, και σε άλλες περιοχές της Ελλάδας. Παράλληλα με τη ευελιξία των μοντέλων, τα ελεύθερα δεδομένα που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν, δίνουν τη δυνατότητα εφαρμογής της ροής εργασιών που αναπτύχθηκε από οποιοδήποτε φορέα.

---

**Λέξεις κλειδιά:** Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, ΣΓΠ, Παραγόντες κινδύνου πυρκαγιάς, μοντέλο εκτίμησης κινδύνου πυρκαγιάς, διαχείριση υποδομών παρακολούθησης, μετρίαση κινδύνου πυρκαγιάς, Διεργασία Αναλυτικής Ιεράρχησης, Αλγόριθμος Μηχανικής Εκμάθησης, Γεωστατιστική, Κάλυψη γης, Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου, Έβρος, Μοντέλο ορατότητας, Μοντέλο καταλληλότητας,



## Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή .....	1
2	Η επίδραση της Κλιματικής Αλλαγής στις πυρκαγιές.....	5
2.1	Ακραία φαινόμενα.....	5
2.2	Η επίδραση της κλιματικής κρίσης στη συχνότητα ακραίων φαινομένων .....	7
2.3	Οι επιπτώσεις της κλιματικής κρίσης σε βασικές κλιματικές παραμέτρους της Ελλάδας που επιδρούν στον κίνδυνο πυρκαγιάς.....	10
3	Παράγοντες κινδύνου πυρκαγιάς .....	15
3.1	Καύσιμη ύλη .....	17
3.2	Ανάγλυφο .....	22
3.3	Κλιματικές-Μετεωρολογικές συνθήκες.....	22
4	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών .....	27
4.1	Ανάλυση διανυσματικών δεδομένων και ανάλυση ψηφιδωτών δεδομένων.....	28
4.2	Γεωστατιστικές μέθοδοι ανάλυσης χωρικής παρεμβολής. ....	28
4.3	Χωρική πολυκριτηριακή ανάλυση με χαρτογραφική υπέρθεση.....	31
5	Απεικόνιση παραγόντων κινδύνου πυρκαγιάς σε Σ.Γ.Π. ....	35
5.1	Απεικόνιση της καύσιμης ύλης σε Σ.Γ.Π.....	35
5.1.1	Ψηφιακός χάρτης χρήσης γης Corine (Corine Land Use Land Cover) .....	35
5.1.2	Φασματικοί συνδυασμοί δορυφορικών εικόνων (απεικονίσεις NDVI, Color Infrared) .....	36
5.1.3	Εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής εκμάθησης για τη δημιουργία ψηφιακού χάρτη κάλυψης γης.....	41
5.2	Απεικόνιση της περιεκτικότητας σε υγρασία της καύσιμης ύλης σε Σ.Γ.Π. ....	51
5.2.1	Δείκτης Forest Fire Weather Index (FWI) από το European Forest Fire Information System (EFFIS) .....	51
5.2.2	Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας (Topographic Wetness Index ή TWI).....	53
5.2.3	Δείκτες υγρασίας NDMI και NDWI.....	60
5.3	Απεικόνιση ανάγλυφου σε Σ.Γ.Π.....	65
5.3.1	Απεικόνιση ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM) .....	66
5.3.2	Απεικόνιση της κλίσης του εδάφους (slope) .....	66
5.3.3	Απεικόνιση του προσανατολισμού του εδάφους (aspect) .....	67
5.4	Απεικόνιση των Κλιματικών-Μετεωρολογικών παραγόντων κινδύνου σε Σ.Γ.Π. ..	70
5.4.1	Απεικόνιση της θερμικής ακτινοβολίας από δορυφορικά δεδομένα.....	70
5.4.2	Απεικόνιση του ανέμου με εφαρμογή χωρικής παρεμβολής.....	74
5.5	Απεικόνιση παραγόντων κινδύνου από ανθρώπινες δραστηριότητες σε Σ.Γ.Π.....	79
5.5.1	Απεικόνιση της περιοχής επίδρασης οικισμών.....	79



5.5.2	Απεικόνιση της περιοχής επίδρασης του οδικού δικτύου.....	80
6	Διαχείριση Κρίσεων .....	83
6.1	Πρόληψη (Mitigation).....	83
6.2	Ετοιμότητα (Preparedness) και Απόκριση (Response).....	84
6.3	Ανάκτηση (Recovery) .....	85
7	Εφαρμογή των Σ.Γ.Π. για τη κατασκευή μοντέλου κινδύνου πυρκαγιάς για το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου .....	87
7.1	Περιοχή Μελέτης .....	87
7.2	Μεθοδολογία αναγνώρισης κινδύνου πυρκαγιάς.....	88
7.2.1	Παράγοντες κινδύνου .....	90
7.2.2	Κατηγοριοποίηση παραγόντων σε κλίμακα κινδύνου .....	91
7.2.3	Υπολογισμός συντελεστών βάρους .....	94
7.3	Αποτελέσματα μοντέλου κινδύνου πυρκαγιάς για το 2021 .....	96
7.3.1	Μοντέλο κινδύνου αναφοράς (2021).....	96
7.4	Αποτελέσματα μοντέλου κινδύνου για το 2019 και η επίδραση της αλλαγής κάλυψης γης .....	98
7.4.1	Επίδραση πυρκαγιάς του Οκτωβρίου 2020 στο χάρτη κινδύνου .....	99
7.4.2	Επίδραση πυρκαγιάς του Ιουλίου 2021 στο χάρτη κινδύνου .....	101
8	Εφαρμογές των Σ.Γ.Π. στη διαχείριση πυροσβεστικών υποδομών .....	107
8.1	Μεθοδολογία αναγνώρισης κατάλληλων θέσεων και λύσεων για τη παρακολούθηση του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και της ευρύτερης περιοχής του Έβρου.....	107
8.1.1	Μοντέλο ορατότητας σε Σ.Γ.Π.....	107
8.1.2	Μοντέλο καταλληλότητας περιοχών κατασκευής πυροφυλακίων με την εφαρμογή αλγορίθμου Τυχαίων Δασών μηχανικής εκμάθησης και Πολυκριτηριακής Ανάλυσης.....	108
8.1.3	Εκτίμηση τρωτότητας του νομού Έβρου και του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου .....	113
8.1.4	Εντοπισμός κατάλληλων τοποθεσιών για την κατασκευή νέων πυροφυλακίων .....	114
8.2	Αποτελέσματα μοντέλου αναγνώρισης κατάλληλων θέσεων για τη παρακολούθηση του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και της ευρύτερης περιοχής του Έβρου.....	118
8.2.1	Υφιστάμενη κατάσταση παρακολούθησης.....	118
8.2.2	Αναγνώριση περιοχών τρωτότητας .....	122
8.2.3	Αποτελέσματα μοντέλου καταλληλότητας θέσης κατασκευής πυροφυλακίων .....	125
8.2.4	Επαλήθευση μοντέλου καταλληλότητας .....	128



8.2.5	Προτάσεις νέων θέσεων.....	129
8.3	Διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων παρακολούθησης.....	146
9	Συμπεράσματα.....	157
	Παράρτημα Ι.....	165
	Παράρτημα ΙΙ.....	167
	Παράρτημα ΙΙΙ.....	169
	Βιβλιογραφία .....	171

## Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1: Καταγεγραμμένος αριθμός εμφάνισης των ακραίων φαινομένων για τις χρονικές περιόδους 1980-1999 και 2000-2019. [Πηγή: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters Emergency Events Database (EM-DAT)].	5
Εικόνα 2: Η αύξηση της μέσης τιμής και της διακύμανσης μιας κλιματικής μεταβλητής έχει ως αποτέλεσμα η διακεκομμένη μορφή της κατανομής πιθανότητας της μεταβλητής να μεταβεί στη νέα κατανομή υπό τη συνεχή γραμμή. [Πηγή: Jentsch, A., J. Kreyling, and C. Beierkuhnlein, 2007, A new generation of climate change experiments: events not trends. <i>Frontiers in Ecology and the Environment</i> .]	7
Εικόνα 3: Η μεταβολή της θερμοκρασίας (°C) για την περίοδο 2026-2045 συγκριτικά με τη περίοδο 1971-2000 για τα κλιματικά σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5 και RCP 8.5 κατά σειρά από αριστερά προς τα δεξιά. [Πηγή: Διανέοσις, Ενσωματώνοντας την κλιματική αλλαγή στον μετασχηματισμό του αναπτυξιακού μοντέλου της Ελλάδας]	10
Εικόνα 4: Η ετήσια ποσοστιαία μεταβολή του ύψους βροχόπτωσης για τη περίοδο 2026-2045 συγκριτικά με τη περίοδο 1971-2000 για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 (αριστερά) και RCP 8.5 (δεξιά). [Πηγή: Διανέοσις, Ενσωματώνοντας την κλιματική αλλαγή στον μετασχηματισμό του αναπτυξιακού μοντέλου της Ελλάδας]	11
Εικόνα 5: Η ετήσια μεταβολή της υγρασίας του εδάφους σε kg ανά m <sup>2</sup> την χρονική περίοδο 2026-2045 συγκριτικά με την περίοδο 1971-2000 για το δυσμενέστερο κλιματικό σενάριο RCP 8.5, όπου είναι πιο εμφανείς οι διαφορές. [Πηγή: Διανέοσις, Ενσωματώνοντας την κλιματική αλλαγή στον μετασχηματισμό του αναπτυξιακού μοντέλου της Ελλάδας]	12
Εικόνα 6: Σχηματική απεικόνιση των τεσσάρων βασικών παραγόντων που συνθέτουν τον κίνδυνο πυρκαγιάς (Κλιματικές-μετεωρολογικές συνθήκες, το είδος και η κατάσταση της καύσιμης ύλης, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά και η ανθρώπινη δραστηριότητα).	16
Εικόνα 7: Ψηφιακός χάρτης χρήσης γης Corine 2018 για την Ελλάδα.	35
Εικόνα 8: Αριστερά έχει αποτυπωθεί η βλάστηση με κόκκινο χρωματισμό (Color Infrared) από το συνδυασμό των φασματικών καναλιών του μπλε B2 (κεντρικό μ.κ. 492,1nm), του ερυθρού B4 (κεντρικό μ.κ. 665nm) και του εγγύς υπέρυθρου B8 (κεντρικό μ.κ. 833nm). Στην δεξιά εικόνα παρουσιάζεται η αποτύπωση του δείκτη NDVI σύμφωνα με τη σχέση (4).	37
Εικόνα 9: Διαφορές ανάμεσα στην αποτύπωση της βλάστησης με ανάλυση πρόσφατων δορυφορικών εικόνων (9 Δεκεμβρίου 2021) και του ψηφιακού χάρτη χρήσης γης Corine 2018. Στην αριστερή εικόνα παρουσιάζεται η βλάστηση με κόκκινο χρωματισμό (Color Infrared), δεξιά παρουσιάζεται η κάλυψη γης σύμφωνα με το Corine 2018. Από τη σύγκριση των δυο εικόνων είναι εμφανείς η διαφορές στην αποτύπωση της κάλυψης γης στις περιοχές που επλήγησαν από τη πυρκαγιά του Αυγούστου 2021.	38
Εικόνα 10: Χάρτης καύσιμης ύλης 10 κατηγοριών σύμφωνα με τον EFFIS [Πηγή: European Forest Fire Information System (EFFIS)].	39
Εικόνα 11: Η περιοχή μελέτης συνολικής έκτασης 42.500 ha που περιλαμβάνει τη περιοχή Natura 2000 με κωδικό GR1110005 και τις περιοχές προστασίας της φύσης A1 και A2 του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.	41



Εικόνα 12: Ψηφιακός χάρτης κάλυψης γης σύμφωνα με τον δείκτη NDVI, 3 κατηγοριών για το νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης. Στη δεξιά εικόνα αποτυπώνεται η ίδια περιοχή στο ορατό φάσμα. ....	43
Εικόνα 13: Ο συνδυασμός color Infrared των φασμάτων του πράσινου (B03), του κόκκινου (B04) και του εγγύς υπέρυθρου (B08) πάνω στην οποία έγινε η εφαρμογή των αλγορίθμων μηχανικής. ....	44
Εικόνα 14: Οι απεικονίσεις των δεικτών NDBI (αριστερά), NDVI (κέντρο) και NDWI (δεξιά) με βάση τις οποίες ελέγχθηκε η εγκυρότητα των εικόνων εκπαίδευσης του αλγορίθμου. ....	46
Εικόνα 15: Ο χάρτης κάλυψης γης, όπως αποτυπώθηκε από το αλγόριθμο μηχανικής εκμάθησης SVM (αριστερά). Οι κατηγορίες έχουν αποτυπωθεί σε χρωματικές διαβαθμίσεις που συμβαδίζουν με το χάρτη Corine 2018 (δεξιά). ....	47
Εικόνα 16: Ο χάρτης κάλυψης γης, όπως αποδόθηκε από τον αλγόριθμο μη-εκπαιδευμένης μηχανικής μάθησης. Στην δεξιά εικόνα εμφανίζεται και ο χάρτης κάλυψης γης του Corine 2018 για λόγους συγκρίσεων. ....	49
Εικόνα 17: Συγκριτική εικόνα των τελικών αποτελεσμάτων της κάλυψης γης όπως αποτυπώθηκε από τον αλγόριθμο εκπαιδευόμενης μάθησης SVM (δεξιά) και τον αλγόριθμο μη-εκπαιδευόμενης εκμάθησης (αριστερά). ....	50
Εικόνα 18: Ο ευρωπαϊκός ψηφιακός χάρτης επικινδυνότητας πυρκαγιάς του δείκτη FWI για την ημερομηνία 26 Δεκεμβρίου 2021 από το MeteoFrance με χωρική ανάλυση 10km. [Πηγή: European Forest Fire Information System (EFFIS)]. ....	52
Εικόνα 19: Ο ευρωπαϊκός ψηφιακός χάρτης επικινδυνότητας πυρκαγιάς του δείκτη FWI για την ημερομηνία 15 Αυγούστου 2021 από το MeteoFrance με χωρική ανάλυση 10km., όπου ο κίνδυνος πυρκαγιάς σε πολλές χώρες και στην Ελλάδα είναι πολύ υψηλός [Πηγή: European Forest Fire Information System (EFFIS)]. ....	52
Εικόνα 20: Το επίπεδο πληροφορίας της διεύθυνσης ροής, όπου ο χρωματισμός των εικονοστοιχείων αντιστοιχεί στη κωδικοποίηση του Πίνακα 5, όπως παρουσιάζεται στο υπόμνημα. ....	54
Εικόνα 21: Παράδειγμα υπολογισμού των εικονοστοιχείων συσσώρευσης ροής από τη διεύθυνση ροής . [Πηγή: ESRI]. ....	54
Εικόνα 22: Το επίπεδο δεδομένων ψηφιδωτής μορφής της συγκέντρωσης ροής, όπου με σκούρα μπλε απόχρωση έχουν αποδοθεί τα εικονοστοιχεία που συγκεντρώνεται η ροή νερού σύμφωνα με τη διεύθυνση ροής των υδάτων. ....	55
Εικόνα 23: Το επίπεδο της κλίσης του εδάφους (Slope), για την περιοχή μελέτης. ....	57
Εικόνα 24: Το τελικό, ομαλοποιημένο επίπεδο πληροφοριών δεδομένων ψηφιδωτής μορφής του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας (TWI) για την περιοχή του νομού Έβρου (αριστερά). Στη δεξιά εικόνα παρουσιάζεται ο χάρτης της Γενικής Γραμματείας Πολιτικής Προστασίας Σχεδιασμού και Αντιμετώπισης Έκτακτων Αναγκών που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της αποτίμησης των πλημμυρισμένων εκτάσεων για τα έτη 2014 και 2015 όπου απεικονίζεται το υδρογραφικό δίκτυο του νομού Έβρου για λόγους σύγκρισης. ....	59
Εικόνα 25: Απεικόνιση του δείκτη Normalized Difference Moisture Index (NDMI) από ανάλυση πολυφασματικών δεδομένων του δορυφόρου Sentinel-2 για τη περιοχή του νομού Έβρου. Στη δεξιά εικόνα παρουσιάζεται το Εθνικό Πάρκο Δέλτα Έβρου, όπου είναι ορατές τόσο οι επιφάνειες που καλύπτονται από νερό όσο και οι καλλιέργειες...	61

Εικόνα 26: Σύγκριση των δεικτών NDVI (δεξιά) και NDMI (αριστερά), όπως απεικονίζουν την περιοχή μελέτης για τις ίδιες ημερομηνίες. ....	62
Εικόνα 27: Η απεικόνιση του δείκτη NDWI για την περιοχή μελέτης. Στη δεξιά εικόνα παρουσιάζεται η λεπτομέρεια της περιοχής μελέτης, όπου απεικονίζονται οι λίμνες του Εθνικού Πάρκου Δέλτα Έβρου. ....	63
Εικόνα 28: Σύγκριση των επιπέδων πληροφορίας δεδομένων κανονικοποιημένης ψηφιδωτής μορφής του δείκτη NDWI (δεξιά) και TWI (αριστερά). ....	64
Εικόνα 29: Η γεωγραφική έκταση ανάμεσα στους ποταμούς Άρδα και Ερυθροπόταμο όπως αποτυπώνεται από το δείκτη NDWI και του TWI. ....	65
Εικόνα 30: Το DEM της Ελλάδας αποτυπωμένο σε Σ.Γ.Π. σε μέτρα (m). Στην λεπτομέρεια της εικόνας δεξιά έχει αποτυπωθεί η περιοχή μελέτης του νομού Έβρου. [Πηγή: Copernicus, EU-DEM] .....	66
Εικόνα 31: Η κλίση του εδάφους (Slope) για την Ελλάδα (αριστερά) και το νομό Έβρου (δεξιά). ....	67
Εικόνα 32: Η χρωματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης προσανατολισμού του εδάφους, όπου οι τελικές τιμές μεταφράζονται σε κατευθύνσεις πυξίδας που περνούν τιμές από 0 έως 360 μοίρες [Πηγή: ESRI] .....	68
Εικόνα 33: Ο προσανατολισμός του εδάφους (Aspect) για την Ελλάδα (αριστερά) και το νομό Έβρου (δεξιά). ....	69
Εικόνα 34: Αποτύπωση της θερμοκρασίας του εδάφους, από τη θερμική ακτινοβολία, της Ελλάδας στις 10 Δεκέμβριου 2021 την ώρα 20:07, όπως την κατέγραψε ο δορυφόρος Sentinel-3. ....	71
Εικόνα 35: Αποτύπωση της θερμοκρασίας του εδάφους, από τη θερμική ακτινοβολία, της Ελλάδας στις 7 Αυγούστου 2021 την ώρα 20:09, όπως την κατέγραψε ο δορυφόρος Sentinel-3. ....	72
Εικόνα 36: Αποτύπωση της θερμοκρασίας του εδάφους, από τη θερμική ακτινοβολία και των ενεργών εστιών πυρκαγιών για ένα τμήμα της Ελλάδας στις 9 Αυγούστου 2021 την ώρα 08:39, όπως την κατέγραψε ο δορυφόρος Sentinel-3. [Πηγή: Emergency Response Coordination Centre (ERCC), ECHO Daily Map of 06 August 2021] .....	73
Εικόνα 37: Οι θέσεις των ανεμολογικών ιστών, που είναι τοποθετημένοι σε διάφορα σημεία της χώρας και η μέση ταχύτητα του ανέμου που καταγράψαν, με διαβαθμισμένη κλίμακα μεγέθους. [Πηγή: ΠΑΕ, Γεωπληροφοριακός χάρτης] .....	75
Εικόνα 38: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου Kriging για το προφίλ του μέσου ανέμου της Ελλάδας σύμφωνα με τα σημειακά δεδομένα από ανεμολογικούς ιστούς της εικόνας 37. Οι περιοχές που εκτιμάται ότι εμφανίζουν υψηλές ταχύτητες ανέμων εμφανίζονται με κόκκινο και κίτρινο χρώμα ενώ οι περιοχές που εκτιμάται ότι παρουσιάζουν μικρές τιμές ταχυτήτων με μπλε αποχρώσεις. ....	76
Εικόνα 39: Σύγκριση ανάμεσα στις Περιοχές Αιολικής Προτεραιότητας σύμφωνα με την Ελληνική και τα αποτελέσματα για το προφίλ ταχυτήτων ανέμου σύμφωνα με το μοντέλο χωρικής παρεμβολής Kriging. ....	78
Εικόνα 40: Τα αποτελέσματα ανάλυσης της απόστασης από τα κέντρα των οικισμών. ....	80
Εικόνα 41: Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της απόστασης από το οδικό δίκτυο. ....	81
Εικόνα 42: Η περιοχή μελέτης στα όρια της Ζώνης Natura 2000 GR1110002 (Δάσος Δαδιάς – Σουφλί) που περιλαμβάνει το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου, με τις Περιοχές Προστασίας της Φύσης Α1 και Α2. Οι συντεταγμένες που παρουσιάζονται είναι σε ΕΓΣΑ 87. ....	87



Εικόνα 43: Διάγραμμα ροής εργασιών για την εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς. ....	90
Εικόνα 44: Οι παράγοντες κινδύνου που συμπεριλήφθηκαν στο μοντέλο κινδύνου πυρκαγιάς κατά σειρά: το υψόμετρο, ο προσανατολισμός του εδάφους, η κλίση του εδάφους, ο τοπογραφικός δείκτης υγρασίας, η απόσταση από τους οικισμούς, η απόσταση από τους δρόμους και η κάλυψη της γης για το Σεπτέμβριο του 2021, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου μηχανικής εκμάθησης (SVM).....	91
Εικόνα 45: Ο χάρτης κινδύνου αναφοράς σύμφωνα με τη κάλυψη της γης του Σεπτεμβρίου 2021. ....	96
Εικόνα 46: Οι περιοχές πολύ υψηλού κινδύνου πυρκαγιάς για το έτος 2021, όπως αποτυπώνονται σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου. ....	97
Εικόνα 47: Χάρτης κινδύνου αναφοράς σύμφωνα με τη κάλυψη της γης του Σεπτεμβρίου 2021. ....	98
Εικόνα 48: Η έκταση (694 ha) της πυρκαγιάς του Οκτωβρίου 2020 σε υπόβαθρο του χάρτη κινδύνου 2019 και (δεξιά) η λεπτομέρεια της καμένης έκτασης. ....	99
Εικόνα 49: Η έκταση (694 ha) της πυρκαγιάς του Οκτωβρίου 2020 σε υπόβαθρο του χάρτη κινδύνου 2021 και (δεξιά) λεπτομέρεια της καμένης έκτασης. ....	100
Εικόνα 50: Η έκταση (242 ha) της πυρκαγιάς του Ιουλίου 2021 σε υπόβαθρο του χάρτη κινδύνου 2019 και (δεξιά) λεπτομέρεια της καμένης έκτασης. ....	102
Εικόνα 51: Η έκταση (242 ha) της πυρκαγιάς του Ιουλίου 2021 σε υπόβαθρο του χάρτη κινδύνου 2021 και (δεξιά) λεπτομέρεια της καμένης έκτασης. ....	103
Εικόνα 52: Τα επίπεδα δεδομένων ψηφιδωτής μορφής των παραμέτρων που συμπεριλήφθηκαν στο μοντέλο καταλληλότητας για την διερεύνηση των θέσεων που μπορούν να κατασκευαστούν νέα πυροφυλάκια. Στις εικόνες παρουσιάζονται κατά σειρά: το υψόμετρο, η συγκέντρωση ροής, η κλίση του εδάφους και η απόσταση από το οδικό δίκτυο. ....	110
Εικόνα 53: Περιοχές του δικτύου Natura 2000 του ηπειρωτικού τμήματος του νομού Έβρου με διαφορετική χρωματική απόχρωση ανάλογα με το όνομα και το κωδικό τους. ....	113
Εικόνα 54: Η κάλυψη γης της περιοχής του νομού Έβρου, που περιβάλλει το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του δείκτη NDVI. ....	114
Εικόνα 55: Ενδεικτικές περιοχές αποκλεισμού επιλογής νέων θέσεων πυροφυλακίων .....	116
Εικόνα 56: Διάγραμμα εργασιών που συνοψίζει τη συνολική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επιλογή προτεινόμενων θέσεων. ....	117
Εικόνα 57: Κάλυψη ορατότητας από τα υφιστάμενα πυροφυλάκια και περιπόλους για το τμήμα του νομού Έβρου που ανήκει στην ηπειρωτική Ελλάδα.....	118
Εικόνα 58:Κάλυψη ορατότητας από υφιστάμενα πυροφυλάκια για το τμήμα του νομού Έβρου που ανήκει στην ηπειρωτική Ελλάδα. ....	120
Εικόνα 59: Κάλυψη ορατότητας από τα υφιστάμενα πυροφυλάκια και περιπόλους στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου. ....	121
Εικόνα 60: Επικάλυψη των περιοχών του δικτύου Natura 2000 και των Περιοχών Προστασίας της Φύσης με τις μη ορατές περιοχές για στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και τις προστατευόμενες περιοχές που το περιβάλλουν. .	122
Εικόνα 61: Σύγκριση ανάμεσα στις μη ορατές περιοχές και στο χάρτη κινδύνου πυρκαγιάς του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.....	123

Εικόνα 62: Συγκριτική εικόνα της κάλυψης γης, σύμφωνα με το δείκτη NDVI και της ορατότητας εντός της περιοχής Natura 2000 Τρεις Βρύσες, με κωδικό GR1110003.	124
Εικόνα 63: Συγκριτική εικόνα της κάλυψης γης, σύμφωνα με το δείκτη NDVI και της ορατότητας εντός της περιοχής Natura 2000 του Νότιου Δασικού Συμπλέγματος Έβρου, με κωδικό GR1110009.	125
Εικόνα 64: Χάρτης καταλληλότητας κατασκευής νέων πυροφυλακίων στο τμήμα του νομού Έβρου που εντάσσεται στην ηπειρωτική Ελλάδα.	126
Εικόνα 65: Χάρτης καταλληλότητας κατασκευής νέων πυροφυλακίων στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.	127
Εικόνα 66: Τα υφιστάμενα πυροφυλάκια στην ορεινή περιοχή που περιβάλλει το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και οι περιοχές εξαιρετικής καταλληλότητας σύμφωνα με το μοντέλο.	129
Εικόνα 67: Τροποποιημένη κάλυψη ορατότητας του Εθνικού Πάρκου που προκύπτει με τη προσθήκη πυροφυλάκιου ύψους 5m στη προτεινόμενη θέση (Θ1).	130
Εικόνα 68: Η προτεινόμενη θέση σε σχέση με τη κάλυψη γης του αλγορίθμου SVM σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας του Sentinel-2 που καταγράφηκε στις 27 Σεπτεμβρίου 2021.	132
Εικόνα 69: Η προτεινόμενη θέση σε σχέση με τη κάλυψη γης σύμφωνα με τον χάρτη Corine 2018.	132
Εικόνα 70: Ενδεικτικό τοπογραφικό διάγραμμα της προτεινόμενης θέσης (Θ1) εντός του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου, σε κλίμακα 1:4.000.	133
Εικόνα 71: Τροποποιημένη κάλυψη ορατότητας του Εθνικού Πάρκου που προκύπτει με τη προσθήκη πυροφυλάκιου ύψους τουλάχιστον 5m στη προτεινόμενη θέση (Θ2).	134
Εικόνα 72: Η προτεινόμενη θέση σε σχέση με τη κάλυψη γης του αλγορίθμου SVM σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας του Sentinel-2 που καταγράφηκε στις 27 Σεπτεμβρίου 2021.	135
Εικόνα 73: Η προτεινόμενη θέση σε σχέση με τη κάλυψη γης σύμφωνα με τον χάρτη Corine 2018.	136
Εικόνα 74: Ενδεικτικό τοπογραφικό διάγραμμα της προτεινόμενης θέσης (Θ2) εντός του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου, σε κλίμακα 1:4.000.	137
Εικόνα 75: Υφιστάμενη ορατότητα της περιοχής Natura 2000, Τρεις Βρύσες.	138
Εικόνα 76: Τροποποιημένη ορατότητα περιοχής με τη προσθήκη της νέας θέσης παρατήρησης στην περιοχή Natura 2000, Τρεις Βρύσες.	138
Εικόνα 77: Σύγκριση της προτεινόμενης θέσης και της κάλυψη γης σύμφωνα με το χάρτη Corine 2018, εντός της περιοχής Natura 2000, Τρεις Βρύσες.	140
Εικόνα 78: Ενδεικτικό τοπογραφικό διάγραμμα της προτεινόμενης θέσης εντός της περιοχής Natura 2000, Τρεις Βρύσες, σε κλίμακα 1:4.000.	141
Εικόνα 79: Υφιστάμενη ορατότητα της περιοχής Natura 2000, Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου.	142
Εικόνα 80: Τροποποιημένη ορατότητα περιοχής με τη προσθήκη της νέας θέσης παρατήρησης στη περιοχή Natura 2000, Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου.	143
Εικόνα 81: Σύγκριση της προτεινόμενης θέσης και της κάλυψη γης σύμφωνα με το χάρτη Corine 2018, εντός της περιοχής Natura 2000, Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου.	145
Εικόνα 82: Ενδεικτικό τοπογραφικό διάγραμμα της προτεινόμενης θέσης εντός της περιοχής Natura 2000, Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου, σε κλίμακα 1:4.000.	146



Εικόνα 83: Οι ανεμογεννήτριες παρακολούθησης που ενσωματώθηκαν στο μοντέλο παρακολούθησης του νομού Έβρου. Στην εικόνα παρουσιάζονται οι προστατευόμενες περιοχές και οι ανεμογεννήτριες που διαθέτουν Άδεια Λειτουργίας.....	148
Εικόνα 84: Τροποποιημένη ορατότητα στο νομό Έβρου με τη προσθήκη θεωρητικών συσκευών παρακολούθησης στις 5 επιλεγμένες ανεμογεννήτριες της περιοχής.....	149
Εικόνα 85: Ορατότητα στη περιοχή Natura 2000, Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου (GR1110009) με τη προσθήκη συστημάτων παρακολούθησης στις 5 επιλεγμένες ανεμογεννήτριες (Εικόνα 83). .....	151
Εικόνα 86: Ορατότητα στην περιοχή Natura 2000, Τρεις Βρύσες (GR1110003) με τη προσθήκη συστημάτων παρακολούθησης στις 5 επιλεγμένες ανεμογεννήτριες (Εικόνα 83).....	152
Εικόνα 87: Ορατότητα στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου με τη προσθήκη συστημάτων παρακολούθησης στις 5 επιλεγμένες ανεμογεννήτριες (Εικόνα 83).....	154
Εικόνα 88: Οι θέσεις των περιπόλων σε σχέση με το χάρτη κινδύνου αναφοράς του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.....	161



## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Συνοπτικός πίνακας των ακραίων φαινομένων ανάλογα με τη πιθανότητα εμφάνισης στις αρχές του 21 <sup>ου</sup> αιώνα (2016-2035) και στα τέλη του 21 <sup>ου</sup> αιώνα (2081-2100) συγκριτικά με τη περίοδο 1986-2005. Η πιθανότητα εμφάνισης και η στατιστική εμπιστοσύνη έχουν υπολογιστεί από το (AR5-IPCC) [Πηγή: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013, Climate Change 2013 The Physical Science Basis].	9
Πίνακας 2: Οι παράγοντες που διαμορφώνουν το ρίσκο εμφάνισης πυρκαγιάς σε μια περιοχή [Πηγή: JRC European Commission, 2018, Basic criteria to assess wildfire risk at the pan-European level].	17
Πίνακας 3: Σχηματική απεικόνιση των παραμέτρων, από του οποίους υπολογίζεται ο δείκτης FWI. [Πηγή: JRC European Commission, 2018, Basic criteria to assess wildfire risk at the pan-European level].	19
Πίνακας 4: Κλίμακα 6 διαβαθμίσεων του δείκτη Fire Weather Index (FWI), ανάλογα με τον κίνδυνο πυρκαγιάς. [Πηγή: European Forest Fire Information System (EFFIS)]	51
Πίνακας 5: Πίνακας που δείχνει τη προτιμητέα ροή του νερού από κάθε εικονοστοιχείο προς τα 8 γειτονικά, με κωδικοποίηση που γίνεται σε αριθμούς που είναι δυνάμεις του 2. [Πηγή: ESRI]	53
Πίνακας 6: Το κεντρικό εικονοστοιχείο ενδιαφέροντος ψ μαζί με τα γειτονικά εικονοστοιχεία που σχηματίζουν το πλέγμα 3x3 [Πηγή: ESRI]	56
Πίνακας 7: Το κεντρικό εικονοστοιχείο ενδιαφέροντος ψ μαζί με τα γειτονικά εικονοστοιχεία στα οποία έχουν δοθεί ονόματα από τα γράμματα του αγγλικού αλφαβήτου. [Πηγή: ESRI]	67
Πίνακας 8: Η κατηγοριοποίηση των παραγόντων του μοντέλου στη κλίμακα κινδύνου από 1 έως 5.	93
Πίνακας 9: Ο πίνακας (Π) που απεικονίζει τη σχετική βαρύτητα αναμεσα στους παράγοντες κινδύνου του μοντέλου.	94
Πίνακας 10: Κανονικοποιημένος πίνακας συγκρίσεων (Π)	95
Πίνακας 11: Συντελεστές βαρύτητας που αντιστοιχούν στους παράγοντες κινδύνου.	95
Πίνακας 12: Παράμετροι μοντέλου ορατότητας.	108
Πίνακας 13: Εκτίμηση των συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τα αποτελέσματα 100 κύκλων του αλγορίθμου τυχαίου δάσους.	111
Πίνακας 14: Η κατηγοριοποίηση των παραγόντων του μοντέλου στη κλίμακα καταλληλότητας 0 και 1.	112
Πίνακας 15: Κατηγοριοποίηση του μοντέλου καταλληλότητας κατασκευής νέων πυροφυλακίων των αποτελεσμάτων.	125
Πίνακας 16: Συντεταγμένες προτεινόμενης θέσης (Θ1) για τη βελτίωση της ορατότητας του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.	130
Πίνακας 17: Συντεταγμένες προτεινόμενης θέσης (Θ2) για τη βελτίωση της ορατότητας του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.	133
Πίνακας 18: Συντεταγμένες προτεινόμενης θέσης για τη βελτίωση της ορατότητας της περιοχής Natura 2000 Τρεις Βρύσες (GR1110003).	137
Πίνακας 19: Συντεταγμένες προτεινόμενης θέσης για τη βελτίωση της ορατότητας της περιοχής Natura 2000 Τρεις Βρύσες (GR1110003).	141
Πίνακας 20: Χαρακτηριστικά και συντεταγμένες των ανεμογεννητριών που επιλέχθηκαν στο εναλλακτικό μοντέλο βελτίωσης ορατότητας.	147



## Περιεχόμενα Γραφημάτων

Γράφημα 1: Το ημιβαριόγραμμα του μοντέλου, με συνεχή γραμμή, που προσεγγίζει τα μπλε σημεία του ημιβαριογράμματος από δεδομένα του δείγματος.....	76
Γράφημα 2: Η κατανομή των εικονοστοιχείων για το χάρτη κινδύνου του 2019, εντός των ορίων της της καμένης έκτασης που προκάλεσε η πυρκαγιά του Οκτωβρίου 2020....	100
Γράφημα 3: Η κατανομή των εικονοστοιχείων για το χάρτη κινδύνου του 2021 εντός των ορίων της καμένης έκτασης που προκάλεσε η πυρκαγιά του Οκτωβρίου 2020. ....	101
Γράφημα 4: Η κατανομή των εικονοστοιχείων για το χάρτη κινδύνου του 2019 εντός των ορίων της καμένης έκτασης που προκάλεσε η πυρκαγιά του Ιουλίου 2021. ....	102
Γράφημα 5: Η κατανομή των εικονοστοιχείων για το χάρτη κινδύνου του 2021 εντός των ορίων της καμένης έκτασης που προκάλεσε η πυρκαγιά του Ιουλίου 2021. ....	104
Γράφημα 6: Στατιστικά αποτελέσματα του του αλγορίθμου τυχαίου δάσους για τη σημαντικότητα των παραμέτρων καταλληλότητας. ....	111
Γράφημα 7: Κατανομή της υφιστάμενης περιοχής ορατότητας του νομού Έβρου, όπου παρουσιάζεται το ποσοστό κάλυψης ανάλογα με τον αριθμό των παρατηρητών που έχουν οπτική επαφή με τις ορατές περιοχές. ....	119
Γράφημα 8: Κατανομή της υφιστάμενης περιοχής ορατότητας του του Εθνικού Πάρκου, όπου παρουσιάζεται το ποσοστό κάλυψης ανάλογα με τον αριθμό των παρατηρητών που έχουν οπτική επαφή με τις ορατές περιοχές.....	121
Γράφημα 9: Κατανομή του κινδύνου εντός των μη ορατών περιοχών σύμφωνα με το χάρτη κινδύνου πυρκαγιάς του 2021. ....	123
Γράφημα 10: Κατανομή του ποσοστού της καταλληλότητας κατασκευής πυροφυλακίων για τη περιοχή του νομού Έβρου. ....	127
Γράφημα 11: Κατανομή του ποσοστού της καταλληλότητας κατασκευής πυροφυλακίων για τη περιοχή του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου. ....	128
Γράφημα 12: Μεταβολή της έκτασης των μη ορατών περιοχών με την τοποθέτηση πυροφυλάκιου στη προτεινόμενη θέση Θ1, στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.....	131
Γράφημα 13: Μεταβολή της έκτασης των μη ορατών περιοχών με την τοποθέτηση πυροφυλάκιου στη προτεινόμενη θέση Θ2, στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.....	135
Γράφημα 14: Μεταβολή του ποσοστού των μη ορατών περιοχών με τη νέα θέση παρατήρησης σε σχέση με την υφιστάμενη στη περιοχή Natura 2000, Τρεις Βρύσες. ....	139
Γράφημα 15: Μεταβολή του ποσοστού των μη ορατών περιοχών με τη νέα θέση παρατήρησης στη περιοχή Natura 2000, Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου.....	144
Γράφημα 16: Κατανομή της ορατότητας του νομού Έβρου με τη προθήκη θεωρητικών συσκευών παρακολούθησης σε 5 επιλεγμένες ανεμογεννήτριες, όπου παρουσιάζεται το ποσοστό κάλυψης ανάλογα με τον αριθμό των παρατηρητών που έχουν οπτική επαφή με τις ορατές περιοχές σύμφωνα με την Εικόνα 84. ....	150
Γράφημα 17: Μεταβολή του ποσοστού των μη ορατών περιοχών με το εναλλακτικό σενάριο παρακολούθησης στη περιοχή Natura 2000, Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου. ....	151
Γράφημα 18: Μεταβολή του ποσοστού των μη ορατών περιοχών με το εναλλακτικό σενάριο παρακολούθησης στη περιοχή Natura 2000, Τρεις Βρύσες. ....	153

Γράφημα 19: Μεταβολή του ποσοστού των μη ορατών περιοχών με το εναλλακτικό σενάριο παρακολούθησης στη περιοχή του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου. .... 154

# 1. Εισαγωγή

An aerial photograph of a dense forest of evergreen trees. The trees are mostly dark green, but several trees in the foreground and middle ground are illuminated with a golden-brown light, suggesting autumn or a specific lighting effect. The text '1. Εισαγωγή' is overlaid in the top left corner in a white, serif font.

## 1. Εισαγωγή

Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC), η Κλιματική Αλλαγή αναμένεται να επιφέρει σημαντικές μεταβολές, τα επόμενα χρόνια, στη συχνότητα και διάρκεια των ακραίων φαινομένων που σχετίζονται άμεσα και έμμεσα με το κίνδυνο πυρκαγιάς. Η περιοχή της Μεσογείου, στην οποία εντάσσεται η Ελλάδα, αποτελεί μια από τις περιοχές που θα πληγούν περισσότερο από φαινόμενα καύσωνα και ξηρασίας εάν δεν ληφθούν μέτρα για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Σε αυτό το πλαίσιο είναι επιτακτική ανάγκη για συστηματική μελέτη του φαινομένου των πυρκαγιών, που απειλεί τον πολύτιμο φυσικό πλούτο της Ελλάδας, τις κρίσιμες υποδομές και πολλές φορές ακόμα και τις ανθρώπινες ζωές.

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.) αποτελούν την ιδανική πλατφόρμα απεικόνισης και μελέτης του κινδύνου πυρκαγιάς, όπως επίσης και των μεθόδων μετρίασης του. Μπορούν να συμβάλουν καθοριστικά τόσο στο σχεδιασμό της πρόληψης πυρκαγιών μιας περιοχής, όσο και στη παρακολούθησή τους. Απαραίτητη προϋπόθεση για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό της πυροπροστασίας μιας περιοχής είναι η αναγνώριση και η μελέτη του κινδύνου πυρκαγιάς. Σε κάθε περιοχή ανάλογα με τα κλιματικά, τοπογραφικά και κοινωνικά χαρακτηριστικά διαμορφώνεται ο κίνδυνος πυρκαγιάς με διαφορετικό τρόπο. Τα Σ.Γ.Π. δίνουν τη δυνατότητα οι παράγοντες που συνθέτουν τον κίνδυνο πυρκαγιάς και αποτελούν αντικείμενο μελέτης διαφορετικών επιστημών να αναπαρασταθούν, να επεξεργαστούν και τελικά συνδυαστούν ώστε να αποδώσουν με σαφή γεωγραφικό προσδιορισμό το κίνδυνο πυρκαγιάς σε μια περιοχή και κατ'επέκταση να συμβάλουν στο σχεδιασμό αντιμετώπισής τους. Οι αναλύσεις μπορούν να γίνονται γρήγορα, ενώ η άμεση απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε διαδραστικούς χάρτες μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στη βελτίωση της διαχείρισης του κινδύνου και των εκτατών καταστάσεων. Στη παρούσα διπλωματική προτείνεται μια ολοκληρωμένη και ευέλικτη ροή εργασιών σε πλατφόρμα Σ.Γ.Π. για την αποτύπωση των παραγόντων κινδύνου πυρκαγιάς, τον συνδυασμό τους για την εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς και την διαχείριση των υποδομών παρακολούθησης για τη μετρίαση του.

Η διπλωματική αποτελείται από 5 διακριτά και αλληλένδετα τμήμα. Το πρώτο τμήμα περιλαμβάνει τα Κεφάλαια 2, 3, 4 και 6 όπου αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο της διπλωματικής. Συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο η κλιματική αλλαγή επιδρά στην αύξηση της συχνότητας και έντασης των ακραίων φαινομένων, που αναπόφευκτά οδηγούν στην αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης πυρκαγιών. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εξέλιξη των κλιματικών παραμέτρων, που σχετίζονται άμεσα με κίνδυνο πυρκαγιάς, στη περιοχή της Ελλάδας. Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται θεωρητικά οι παράμετροι που συνθέτουν τον κίνδυνο πυρκαγιάς, ενώ στο Κεφάλαιο 4 αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο των σημαντικότερων εργαλείων ανάλυσης που θα αξιοποιηθούν στη συνέχεια της διπλωματικής. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 περιγράφονται συνοπτικά τα στάδια της διαχείρισης κρίσεων σε περιπτώσεις πυρκαγιών και η συμβολή των Σ.Γ.Π. σε αυτά.

Το δεύτερο τμήμα περιλαμβάνει το Κεφάλαιο 5, όπου αναλύονται και αποτυπώνονται οι σημαντικότεροι παράγοντες που συνθέτουν το κίνδυνο πυρκαγιάς. Για την απεικόνιση των παραγόντων κινδύνου επεξεργάστηκαν ελεύθερα και αξιόπιστα δεδομένα από ευρωπαϊκές και εθνικές πηγές. Η επιλογή των ελεύθερων δεδομένων σε συνδυασμό με την αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας ανάλυσης τους, διασφαλίζει την επαναληψιμότητα των



αποτελεσμάτων. Οι μεθοδολογίες ανάλυσης περιλαμβάνουν από απλά εργαλεία που διαθέτουν τα περισσότερα Σ.Γ.Π. έως και πολύπλοκες υπό-ροές εργασιών, όπως η εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής εκμάθησης για την αποτύπωση της κάλυψης γης από την επεξεργασία πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων, την εφαρμογή μεθόδων γεωστατιστικής για την εκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου και την εφαρμογή διαδοχικών εφαρμογών άλγεβρας χαρτών για τον υπολογισμό του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας (TWI).

Το τρίτο τμήμα αποτελείται από το Κεφάλαιο 7, όπου αναπτύσσεται ένα μοντέλο εκτίμησης κινδύνου πυρκαγιάς με εφαρμογή Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (Multi-Criteria Decision Analysis) και Διεργασίας Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytic Hierarchy Process). Στη συνέχεια το μοντέλο εφαρμόζεται στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου. Σε αυτό συνδυάζονται οι περισσότεροι από τους παράγοντες κινδύνου του Κεφαλαίου 5, ώστε να εκτιμηθεί ο κίνδυνος πυρκαγιάς σε μια περιοχή. Παράλληλα, στο Κεφάλαιο θα μελετηθεί αναλυτικά η επίδραση που έχει η αλλαγή της κάλυψης γης στο κίνδυνο πυρκαγιάς. Η κάλυψη γης και ιδιαίτερα το είδος των φυτών που εντοπίζονται σε μια περιοχή αποτελεί ένα από τους σημαντικότερους παράγοντες κινδύνου πυρκαγιάς. Επομένως, είναι σημαντικό στην ανάλυση κινδύνου να μπορεί να συμπεριλαμβάνεται η πιο πρόσφατη κάλυψη γης, ώστε ο κίνδυνος πυρκαγιάς να αποτυπώνει με ακρίβεια τις πραγματικές ανάγκες της περιοχής, χωρίς όμως να χρειάζονται πολυέξοδοι και χρονοβόροι επιτόπιοι έλεγχοι.

Το τέταρτο τμήμα αποτελείται από το Κεφάλαιο 8, όπου διεξάγεται μια εκτενής μελέτη της υφιστάμενης κατάστασης παρακολούθησης του νομού Έβρου από τις υποδομές παρακολούθησης του Πυροσβεστικού Σώματος και προτείνονται πιθανές θέσεις που μπορούν να κατασκευαστούν πυροφυλάκια σε ευαίσθητες προστατευόμενες περιοχές, με την εφαρμογή ενός μοντέλου διαβάθμισης της καταλληλότητας, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της περιοχής. Στη μελέτη συμπεριλαμβάνονται όλα τα αποτελέσματα και οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, μαζί με διάφορα άλλα δεδομένα που σχετίζονται με τη προστασία και τις υποδομές στη περιοχή μελέτης. Τα απαραίτητα δεδομένα για τις θέσεις των υφιστάμενων υποδομών παρακολούθησης προέρχονται από το Τμήμα Επιχειρησιακής Πληροφορικής και Γεωχωρικής Ανάλυσης / Δνση Πληροφορικής και Επικοινωνιών του Αρχηγείου Πυροσβεστικού Σώματος. Το πέμπτο και τελευταίο τμήμα περιλαμβάνει το Κεφάλαιο 9, όπου συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διπλωματική εργασία.

Όπως είναι φανερό κάθε τμήμα της διπλωματικής αποτελεί τη βάση στην οποία αναπτύσσεται το επόμενο τμήμα και όλα μαζί συνθέτουν μια ροή εργασιών που καλύπτει ένα σημαντικό μέρος της διαχείρισης του κινδύνου πυρκαγιών. Τα περισσότερα αποτελέσματα και τα ενδιάμεσα στάδια που παρουσιάζονται στα τμήματα 2, 3 και 4 προέκυψαν από πρωτότυπη ανάλυση δεδομένων, που διεξήχθη στη πιο πρόσφατη έκδοση του προγράμματος Σ.Γ.Π., ArcGIS Pro.



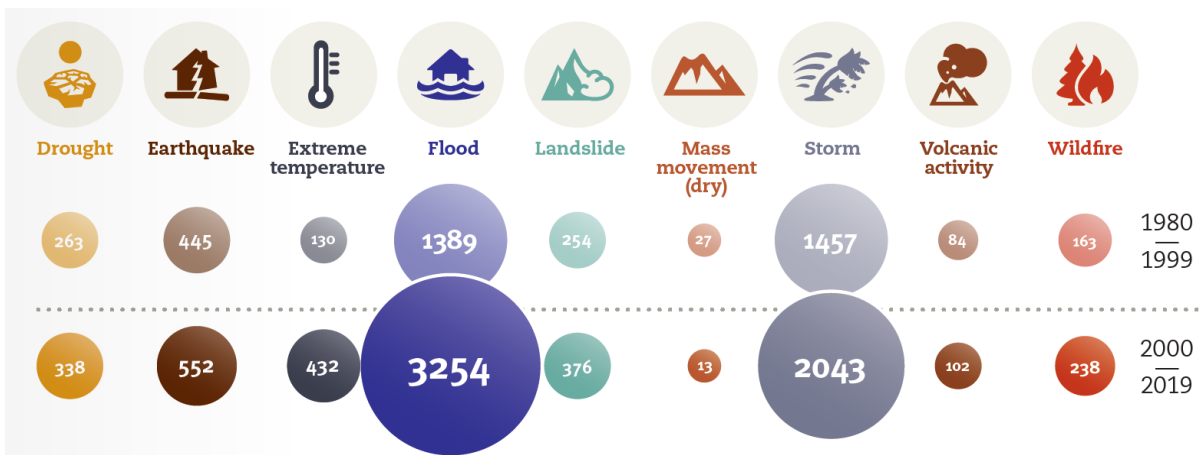


# 2. Κλιματική Κρίση & Πυρκαγιές



## 2 Η επίδραση της Κλιματικής Αλλαγής στις πυρκαγιές

Μια από τις σημαντικότερες επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής είναι η επίδρασή της στη συχνότητα εμφάνισης ακραίων φαινομένων, γεγονός που μπορεί να έχει δραματικές συνέπειες στις ζωές εκατομμυρίων ανθρώπων παγκοσμίως. Τα ακραία φαινόμενα αυξάνουν σημαντικά τον κίνδυνο εμφάνισης καταστροφικών γεγονότων όπως πλημμύρες, πυρκαγιές, ξηρασία, τυφώνες και καύσωνες. Από το 2000 έως το 2019 έχουν καταγραφεί από το Centre for Research on the Epidemiology of Disasters Emergency Events Database (EM-DAT) 7.348 καταστροφικά γεγονότα, ενώ από το 1980 έως το 1999 είχαν καταγραφεί συνολικά 4.212<sup>[1]</sup>. Οι καταστροφές την τελευταία εικοσαετία ευθύνονται για 1.23 εκ. θανάτους, επηρέασαν την ζωή 4.03 δις ανθρώπων και οδήγησαν σε οικονομικές απώλειες 2.97 τρις δολαρίων. Παράλληλα, φαίνεται τόσο από τα δεδομένα όσο και από την εμπειρία μας, ότι υπάρχει μια αύξηση της συχνότητας ακραίων καιρικών φαινομένων που οδηγούν πολλές φορές σε καταστροφικά γεγονότα<sup>[1]</sup>. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, τη τελευταία 20ετία σχεδόν όλα τα ακραία φυσικά φαινόμενα εμφανίζουν αυξητική τάση.



Εικόνα 1: Καταγεγραμμένος αριθμός εμφάνισης των ακραίων φαινομένων για τις χρονικές περιόδους 1980-1999 και 2000-2019. [Πηγή: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters Emergency Events Database (EM-DAT)].

### 2.1 Ακραία φαινόμενα

Τα ακραία φαινόμενα στη βιβλιογραφία σχετίζονται τόσο με τα ακραία καιρικά φαινόμενα<sup>[2],[3]</sup> όσο και με τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον και τους ανθρώπους<sup>[4]</sup>. Επομένως, η έννοια των ακραίων φαινομένων έχει διττή σημασία, αφού πολλές φορές πέρα από τα ακραία καιρικά φαινόμενα συμπεριλαμβάνει και τις καταστροφικές επιπτώσεις που μπορεί να έχουν. Συνήθως, όμως στη βιβλιογραφία συνδέονται με τα καιρικά φαινόμενα.

Σημαντικός είναι ο διαχωρισμός του πότε ένα καιρικό ή κλιματικό φαινόμενο μπορεί να χαρακτηριστεί “ακραίο”. Τα καιρικά και κλιματικά φαινόμενα είναι το αποτέλεσμα πολλών πολύπλοκων δυναμικών και θερμοδυναμικών διεργασιών της ατμόσφαιρας σε μεγάλη ή μικρή χωρική και χρονική κλίμακα. Οι δυναμικές αυτές διεργασίες μελετώνται με τη βοήθεια κατάλληλων φυσικών μεγεθών (μεταβλητών ή παραμέτρων) από εξειδικευμένα μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν δεδομένα για τις κλιματικές μεταβλητές, για το παρόν κλίμα, καθώς και προβολές τους για μελλοντικές περιόδους, ώστε να προβλεφθούν οι επερχόμενες μεταβολές στο κλίμα του πλανήτη. Οι μεταβλητές μπορούν να περιγραφούν στατιστικά μέσω



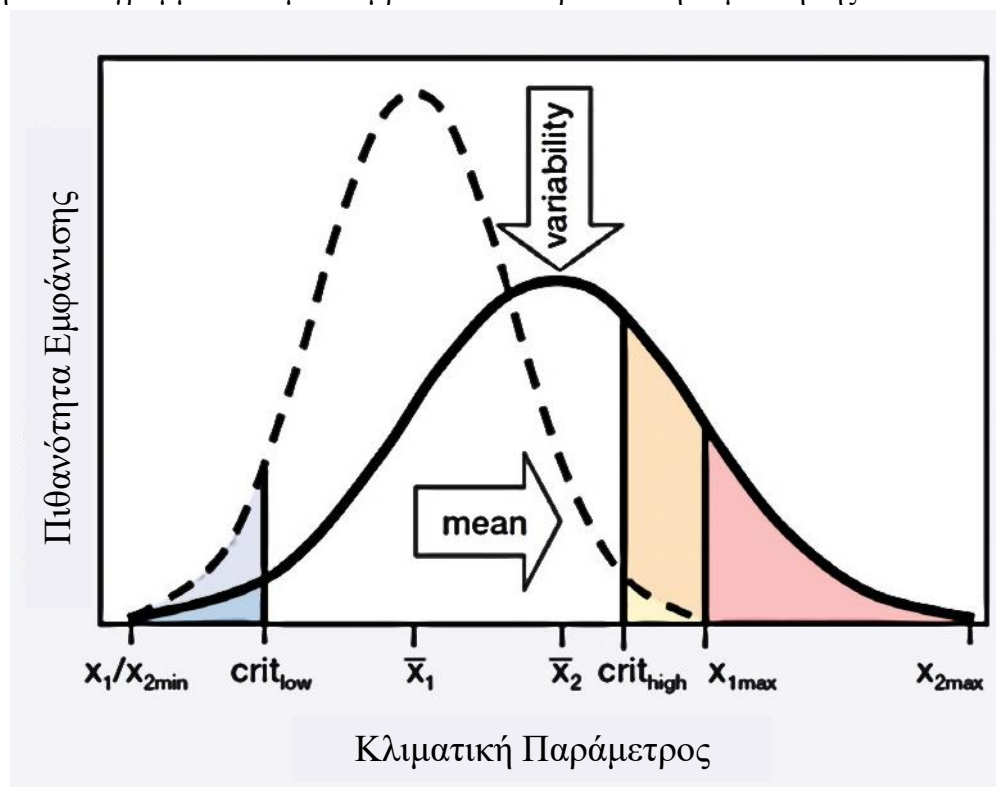
γνωστών μεγεθών όπως η μέση τιμή, η διακύμανση και η διασπορά. Με αυτό το τρόπο ένα ακραίο φαινόμενο είναι το αποτέλεσμα της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης διαφορών μεταβλητών που παρουσιάζουν ακραία διασπορά<sup>[5]</sup>. Το πιο και κατά πόσο ένα φαινόμενο μπορεί να χαρακτηριστεί ακραίο διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τη γεωγραφική τοποθεσία της περιοχής.

Ένα παράδειγμα ακραίου φαινομένου αποτελεί το κύμα καύσωνα που έπληξε τη κεντρική και νοτιοδυτική Ευρώπη τον Ιούνιο του 2019, κατά τη διάρκεια του οποίου καταγράφηκαν ακραίες θερμοκρασίες, με τιμές που ξεπερνούσαν τους 40°C. Η μέση τιμή της θερμοκρασίας στην Ευρώπη από 25 έως 29 Ιουνίου το 2019 μπορεί να χαρακτηριστεί ως ακραία καθώς ξεπέρασε τη μέση τιμή της θερμοκρασίας για το μήνα Ιούνιο της περιόδου 1981 έως 2010 κατά 7°C<sup>[6]</sup>. Σε αυτό το παράδειγμα, όπως είναι αναμενόμενο, κατά τη διάρκεια του καύσωνα και ιδιαίτερα εάν οι υψηλές θερμοκρασίες συνδυάζονται με μεγάλες ταχύτητες ανέμου και υψηλή ξηρασία ο κίνδυνος πυρκαγιάς ήταν πολύ υψηλός. Οι ακραίες τιμές των παραμέτρων της ταχύτητας του ανέμου, της θερμοκρασίας και της ξηρασίας συνθέτουν ένα ακραίο φαινόμενο που μπορεί να εξελιχθεί σε μια φυσική καταστροφή, στη προκειμένη περίπτωση πυρκαγιά.

Η προσέγγιση του παραπάνω παραδείγματος είναι μια απλοϊκή περιγραφή της πραγματικότητας, καθώς είναι πολύ δύσκολο να εξακριβωθούν οι ακριβείς αιτίες και παράμετροι που οδήγησαν στην εμφάνιση του φαινομένου<sup>[7]</sup>. Η εξακρίβωση των αιτιών που προκαλούν ακραία φαινόμενα αποτελεί αντικείμενο εντατικής μελέτης της επιστημονικής κοινότητας, όπως το ακαδημαϊκό περιοδικό *Bulletin of the American Meteorological Society* (BAMS) που εκδίδει ετησίως ειδικό τεύχος μελετών μέσα στις οποίες ερευνητές προσπαθούν να διασαφηνίσουν τα αίτια των ακραίων φαινομένων και ιδιαίτερα την σύνδεσή τους με ανθρωπογενείς παράγοντες<sup>[8]</sup>.

## 2.2 Η επίδραση της κλιματικής κρίσης στη συχνότητα ακραίων φαινομένων

Η μεταβολή του παγκόσμιου κλίματος οδηγεί αναπόφευκτα στη μεταβολή των στατιστικών μεγεθών των κλιματικών παραμέτρων και στην αλλαγή της συχνότητας, έντασης, χωρικής έκτασης και διάρκειας ακραίων φαινομένων<sup>[5]</sup>. Η μεταβολή των κλιματικών παραμέτρων μπορεί θεωρητικά να περιγράψει με την μεταβολή της κατανομής πιθανότητας της εκάστοτε παραμέτρου. Αλλαγές στα στατιστικά μεγέθη των παραμέτρων όπως η μέση τιμή, η διασπορά και το πλάτος, επιφέρουν μεταβολές στη πιθανότητα εμφάνισης ακραίων τιμών. Αυτό μπορεί να γίνει πιο κατανοητό με ένα παράδειγμα, εάν υποθέσουμε πως μία παράμετρος, όπως η θερμοκρασία, ακολουθεί κανονική κατανομή (Normal Distribution), όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Διάφοροι παράγοντες, όπως η αύξηση της συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, μπορεί να προκαλέσουν μεταβολές στη μέση τιμή (mean) και στη τυπική απόκλιση (standard deviation). Συγκεκριμένα, στο παράδειγμα της Εικόνας 2 παρατηρείται αύξηση της μέσης τιμής και της διακύμανσης, με αποτέλεσμα η διακεκομμένη μορφή της κατανομής πιθανότητας να μεταβεί στη νέα κατανομή υπό τη συνεχή γραμμή. Η παράμετρος πάνω και κάτω από κάποιες τιμές ( $crit_{high}$  και  $crit_{low}$ ) μπορεί να χαρακτηριστεί κρίσιμη, ανάλογα με την επίδραση που μπορεί να επιφέρει στο περιβάλλον και τους ανθρώπους. Η πιθανότητα να παρατηρηθούν τιμές πάνω από την ανώτερη κρίσιμη τιμή ( $crit_{high}$ ) της θερμοκρασίας στη νέα κατανομή είναι πολύ μεγαλύτερη από την αρχική κατανομή. Αντίθετα, η πιθανότητα να παρατηρηθούν τιμές κάτω από τη κατώτερη κρίσιμη τιμή ( $crit_{low}$ ) της θερμοκρασίας στη νέα κατανομή είναι πολύ μικρότερη από την αρχική κατανομή<sup>[9]</sup>. Να σημειωθεί ότι η πιθανότητα υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση από το γραμμοσκιασμένο εμβαδόν που περικλείει η καμπύλη της κάθε κατανομής



**Εικόνα 2:** Η αύξηση της μέσης τιμής και της διακύμανσης μιας κλιματικής μεταβλητής έχει ως αποτέλεσμα η διακεκομμένη μορφή της κατανομής πιθανότητας της μεταβλητής να μεταβεί στη νέα κατανομή υπό τη συνεχή γραμμή. [Πηγή: Jentsch, A., J. Kreyling, and C. Beierkuhnlein, 2007, A new generation of climate change experiments: events not trends. *Frontiers in Ecology and the Environment.*]



πιθανότητας. Αλλαγές στις τιμές στατιστικών μεγεθών των κλιματικών παραμέτρων σε συνδυασμό με τους πολύπλοκους μηχανισμούς που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, μεταβάλλουν την πιθανότητα εμφάνισης ακραίων φαινομένων. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται και οι πυρκαγιές οι οποίες συνδέονται άμεσα με τις παραμέτρους της θερμοκρασίας, της υγρασίας και της συχνότητας των βροχοπτώσεων.

Ιδιαίτερα ανησυχητικές είναι οι παρατηρήσεις και οι προβλέψεις της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC) σύμφωνα με την οποία αναμένονται σημαντικές αλλαγές στην συχνότητα εμφάνισης ακραίων φαινομένων συγκριτικά με το 1951<sup>[10]</sup>. Με μεγάλη εμπιστοσύνη (στατιστικά) τις επόμενες δεκαετίες θα παρατηρηθεί σημαντική αύξηση στη πιθανότητα εμφάνισης διαφόρων ακραίων φαινομένων, συμπεριλαμβανομένων των πυρκαγιών. Η αύξηση των συνθηκών που εύνουν την εμφάνιση πυρκαγιών μπορούν να συνδεθεί με την αλλαγή του κλίματος που προκαλεί η ανθρώπινη δραστηριότητα<sup>[11]</sup>. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη παρούσα κατάσταση είναι πιθανόν στις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα (2016-2035) και βέβαιο στα τέλη του 21<sup>ου</sup> αιώνα (2081-2100) ότι θα έχουμε στη διάρκεια του έτους λιγότερες ψυχρές ημέρες και περισσότερες θερμές ημέρες συγκριτικά με τη περίοδο 1986-2005. Το γεγονός αυτό αυξάνει τη πιθανότητα εμφάνισης, της διάρκειας και της έντασης των κυμάτων καύσωνα σε πολλές περιοχές της γης. Οι βροχοπτώσεις είναι πολύ πιθανό να γίνουν πιο έντονες και συχνές συγκριτικά με τη περίοδο 1986-2005. Τέλος, υπάρχουν ενδείξεις για αύξηση φαινομένων ξηρασίας ιδιαίτερα στα τέλη του 21<sup>ου</sup> αιώνα πάντα σε σύγκριση με τη περίοδο 1981-2005<sup>[12]</sup>. Αναλυτικότερα στο Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα ακραία φαινόμενα ανάλογα με τη πιθανότητα εμφάνισης στις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα (2016-2035) και στα τέλη του 21<sup>ου</sup> αιώνα (2081-2100), παράλληλα αναγράφεται η πιθανότητα ανθρωπογενείς παράγοντες να έχουν συνεισφέρει στην αλλαγή της συχνότητας των φαινομένων. Συνοψίζοντας: Εικόνα 2

- Τα δεδομένα δείχνουν αύξηση της έντασης και συχνότητας των ακραίων φαινομένων τα επόμενα χρόνια, γεγονός που αυξάνει το κίνδυνο εμφάνισης πυρκαγιών. Το γεγονός αυτό ενδέχεται να επηρεάσει τις ζωές δισεκατομμυρίων ανθρώπων, επιφέροντας παράλληλα σημαντικές οικονομικές απώλειες.
- Όλες οι περιοχές του κόσμου δεν επηρεάζονται με τον ίδιο τρόπο από τη κλιματική αλλαγή, έτσι το είδος και η ένταση των ακραίων φαινομένων διαφέρει ανάλογα με τη γεωγραφική τοποθεσία της περιοχής.
- Η αύξηση της συχνότητας και της έντασης πολλών ακραίων φαινομένων φαίνεται να πηγάζει από ανθρωπογενή αίτια.

Φαινόμενο και αλλαγή στη συχνότητα εμφάνισης	Ανθρώπινη επίδραση στις αλλαγές	Πιθανότητα εμφάνισης αλλαγών στις αρχές του 21 <sup>ου</sup> αιώνα (1981-2005)	Πιθανότητα εμφάνισης αλλαγών στα τέλη του 21 <sup>ου</sup> αιώνα (2081-2100)
Πιο θερμές και/ή λιγότερες κρύες μέρες και νύκτες για τις περισσότερες περιοχές	Πολύ πιθανό <sup>1</sup>	Πιθανό <sup>2</sup>	Πρακτικά βέβαιο <sup>3</sup>
Θερμότερες και/ή πιο συχνές θερμές ημέρες και νύχτες για τις περισσότερες περιοχές	Πολύ πιθανό	Πιθανό	Πρακτικά βέβαιο
Αύξηση στη συχνότητα και/ή διάρκεια των κυμάτων καύσωνα στις περισσότερες περιοχές	Πιθανό	-	Πολύ πιθανό
Αύξηση στη συχνότητα και/ή ένταση του νετού στις περισσότερες περιοχές	Μεσαία εμπιστοσύνη <sup>4</sup>	Πιθανό	Πολύ πιθανό
Αύξηση στη συχνότητα και/ή διάρκεια των φαινομένων ξηρασίας	Χαμηλή Εμπιστοσύνη <sup>4</sup>	Χαμηλή εμπιστοσύνη	Πιθανό
Αύξηση της έντασης των τροπικών κυκλώνων	Χαμηλή εμπιστοσύνη	Χαμηλή εμπιστοσύνη	Πιο πιθανό παρά όχι <sup>5</sup>
Ανύψωση θαλάσσιων υδάτων	Πιθανό	Πιθανό	Πολύ πιθανό

**Πίνακας 1:** Συνοπτικός πίνακας των ακραίων φαινομένων ανάλογα με την πιθανότητα εμφάνισης στις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα (2016-2035) και στα τέλη του 21<sup>ου</sup> αιώνα (2081-2100) συγκριτικά με τη περίοδο 1986-2005. Η πιθανότητα εμφάνισης και η στατιστική εμπιστοσύνη έχουν υπολογιστεί από το (AR5-IPCC) [Πηγή: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013, Climate Change 2013 The Physical Science Basis].

<sup>1</sup> Πιθανότητα εμφάνισης 90-100%

<sup>2</sup> Πιθανότητα εμφάνισης 66-100%

<sup>3</sup> Πιθανότητα εμφάνισης 99-100%

<sup>4</sup> Περιγράφει την εμπιστοσύνη των αποτελεσμάτων σύμφωνα με την εγκυρότητα των επιστημονικών στοιχείων και την κοινή αποδοχή τους.

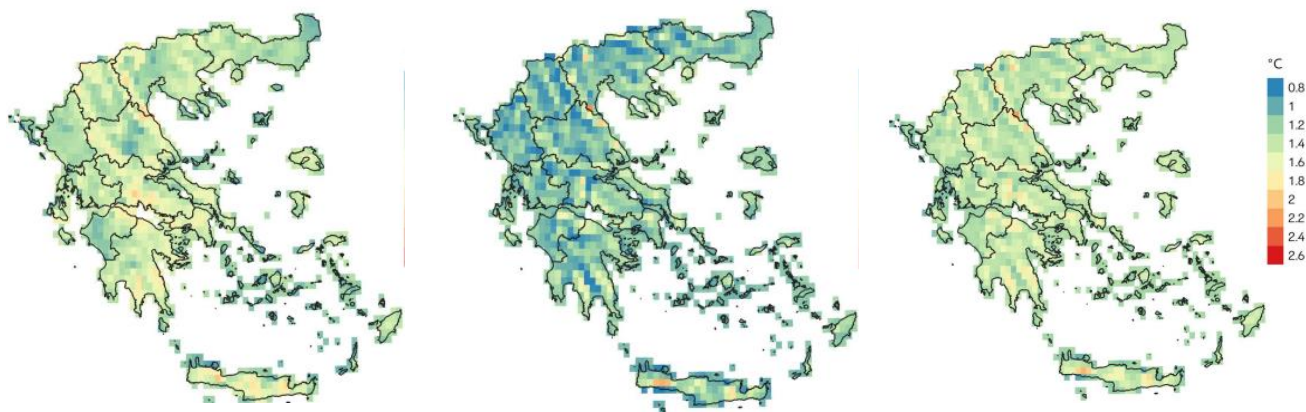
<sup>5</sup> Πιθανότητα εμφάνισης 50-100%



### 2.3 Οι επιπτώσεις της κλιματικής κρίσης σε βασικές κλιματικές παραμέτρους της Ελλάδας που επιδρούν στον κίνδυνο πυρκαγιάς

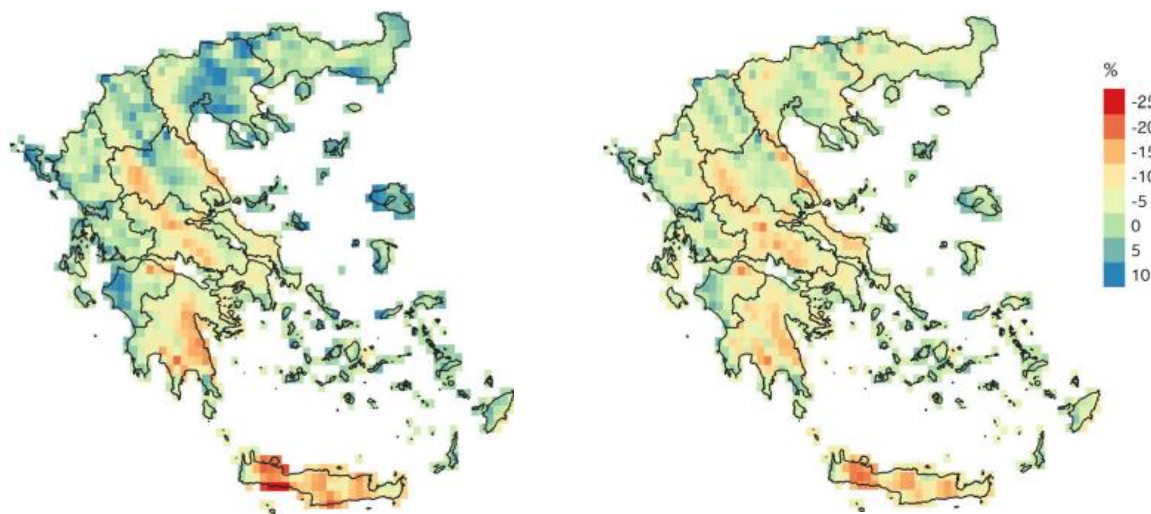
Όπως αναφέρθηκε, η επίδραση της κλιματικής κρίσης στις κλιματικές παραμέτρους διαφέρει σημαντικά ανά περιοχή. Βασικό θέμα της παρούσας ενότητας είναι οι πιθανές μεταβολές που ενδέχεται να προκληθούν λόγω της κλιματικής αλλαγής σε βασικές παραμέτρους που σχετίζονται με το κίνδυνο πυρκαγιών στη Ελλάδα. Οι παράμετροι αυτοί είναι η θερμοκρασία, η βροχόπτωση και η υγρασία. Η ανάλυση της εξέλιξης των παραμέτρων από τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC) διαφέρει ανάλογα το κλιματικό σενάριο, δηλαδή την εξέλιξη της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα (Representative Concentration Pathways ή RCP). Υπάρχουν πολλά σενάρια που διαφέρουν μεταξύ τους ανάλογα με την μελλοντική συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου. Ενδεικτικά μερικά σενάρια είναι το RCP 2.6 στο οποίο οι εκπομπές CO<sub>2</sub> παραμένουν σταθερές στις αρχές του 21ου αιώνα και στη συνέχεια μειώνονται και γίνονται αρνητικές έως τα τέλη του αιώνα. Το RCP 4.5 στο οποίο οι εκπομπές CO<sub>2</sub> εμφανίζουν περιορισμένη αύξηση έως τα μέσα του αιώνα και στη συνέχεια μειώνονται. Τέλος το RCP 8.5 στο οποίο οι εκπομπές CO<sub>2</sub> το 2100 θα είναι τρεις φορές υψηλότερες από τις σημερινές<sup>[10]</sup>. Οι αριθμοί που χαρακτηρίζουν κάθε σενάριο εξέλιξης αναφέρονται στη επίδραση των αερίων του θερμοκηπίου στο ενεργειακό ισοζύγιο (Radiative Forcing) σε W/m<sup>2</sup>.

Οι προβλέψεις για την εξέλιξη της **θερμοκρασίας** στη Ελλάδα ακολουθούν τη παγκόσμια τάση εμφανίζοντας αύξηση για τη χρονική περίοδο 2026-2045 σε σχέση με τη περίοδο 1971-2000. Η αυξητική τάση της θερμοκρασίας παρατηρείται και για τα τρία σενάρια που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται η ετήσια μεταβολή της θερμοκρασίας (°C) για την περίοδο 2026-2045 συγκριτικά με τη περίοδο 1971-2000 για τα κλιματικά σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5 και RCP 8.5 κατά σειρά<sup>[34]</sup>.



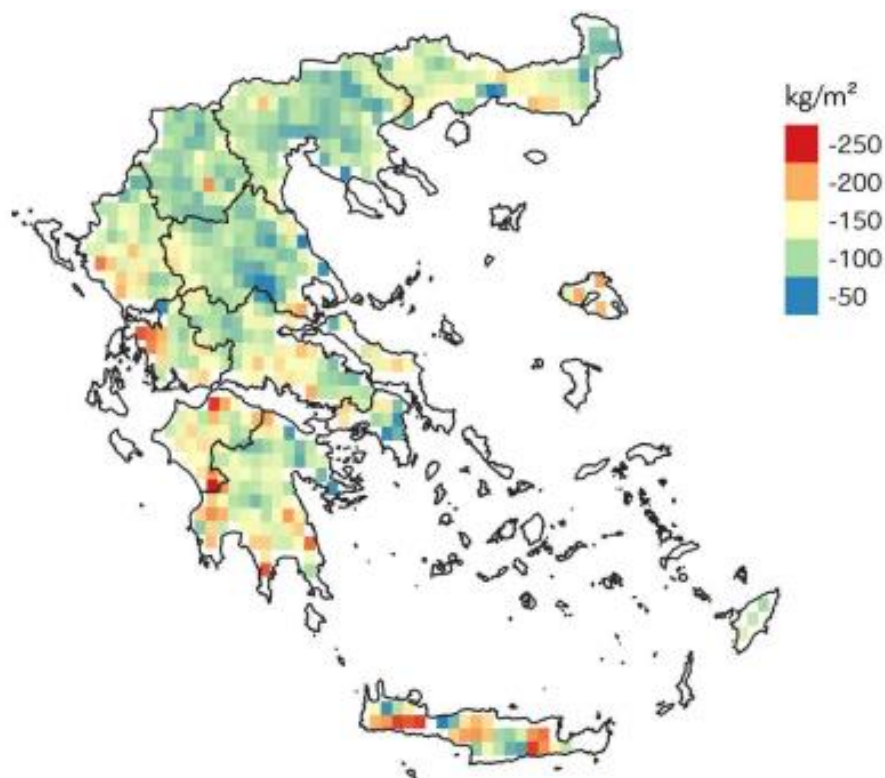
*Εικόνα 3: Η μεταβολή της θερμοκρασίας (°C) για την περίοδο 2026-2045 συγκριτικά με τη περίοδο 1971-2000 για τα κλιματικά σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5 και RCP 8.5 κατά σειρά από αριστερά προς τα δεξιά. [Πηγή: Διανέοσις, Ενσωματώνοντας την κλιματική αλλαγή στον μετασχηματισμό του αναπτυξιακού μοντέλου της Ελλάδας]*

Οι προβλέψεις για τη εξέλιξη του **ύψους βροχόπτωσης** στην Ελλάδα εμφανίζει τάση μείωσης και για τα τρία κλιματικά σενάρια. Η μείωση αναμένεται να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το σενάριο που εξετάζεται. Τα μεγαλύτερα ύψη βροχής της Ελλάδας εντοπίζονται στη Δυτική Ελλάδα και στις ορεινές περιοχές, ενώ μικρότερα ύψη βροχής παρατηρούνται στην Ανατολική Ελλάδα. Σημαντικές μεταβολές παρουσιάζονται και στη μέση ετήσια βροχόπτωση στις περισσότερες περιοχές της Ελλάδας. Η μεγαλύτερη μείωση εντοπίζεται στην Κρήτη, τη Νοτιοανατολική Πελοπόννησο και τη Στερεά Ελλάδα<sup>[34]</sup>. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται η ετήσια ποσοστιαία μεταβολή του ύψους βροχόπτωσης για την περίοδο 2026-2045 συγκριτικά με τη περίοδο 1971-2000 για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5 κατά σειρά.



*Εικόνα 4: Η ετήσια ποσοστιαία μεταβολή του ύψους βροχόπτωσης για τη περίοδο 2026-2045 συγκριτικά με τη περίοδο 1971-2000 για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 (αριστερά) και RCP 8.5 (δεξιά). [Πηγή: Διανέοσις, Ενσωματώνοντας την κλιματική αλλαγή στον μετασχηματισμό του αναπτυξιακού μοντέλου της Ελλάδας]*

Η **υγρασία του εδάφους** αποτελεί μια πολύ σημαντική κλιματική παράμετρο που σχετίζεται άμεσα με το κίνδυνο πυρκαγιάς. Οι προβλέψεις για την μελλοντική εξέλιξη της εδαφικής υγρασίας μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή. Οι υψηλότερες τιμές ταυτίζονται με τις περιοχές υψηλής βροχόπτωσης, αντίθετα μικρότερη υγρασία παρατηρείται στην ανατολική ηπειρωτική χώρα. Όσον αφορά στο σύνολό της Ελλάδας οι προβλέψεις των κλιματικών μοντέλων δείχνουν σημαντική μείωση της εδαφικής υγρασίας, με σημαντικότερη μείωση στη Νότια και Δυτική Ελλάδα, όπου η τάση της εδαφικής υγρασία για τα μέσα του 21<sup>ου</sup> ακολουθεί την τάση της βροχόπτωσης. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται η ετήσια μεταβολή της υγρασίας του εδάφους σε kg ανά m<sup>2</sup> την χρονική περίοδο 2026-2045 συγκριτικά με την περίοδο 1971-2000 για το δυσμενέστερο κλιματικό σενάριο RCP 8.5, όπου είναι πιο εμφανείς οι διαφορές<sup>[34]</sup>.



*Εικόνα 5: Η ετήσια μεταβολή της υγρασίας του εδάφους σε kg ανά m<sup>2</sup> την χρονική περίοδο 2026-2045 συγκριτικά με την περίοδο 1971-2000 για το δυσμενέστερο κλιματικό σενάριο RCP 8.5, όπου είναι πιο εμφανείς οι διαφορές. [Πηγή: Διανέοσις, Ενσωματώνοντας την κλιματική αλλαγή στον μετασχηματισμό του αναπτυξιακού μοντέλου της Ελλάδας]*

Όπως δείχνουν τα κλιματικά μοντέλα η εξέλιξη και των τριών κλιματικών παραμέτρων είναι δυσμενής για την εξέλιξη του κινδύνου πυρκαγιάς στην Ελλάδα. Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας σε συνδυασμό με την μείωση των βροχοπτώσεων και της υγρασίας του εδάφους, όπως είναι αναμενόμενο δημιουργούν συνθήκες που εύνουν τόσο την έναρξη όσο και την ανάπτυξη πυρκαγιών. Επομένως, είναι πολύ σημαντική η συστηματική μελέτη των παραγόντων που επηρεάζουν τον κίνδυνο πυρκαγιάς και ο τρόπος με τον οποίο οι παράγοντες αυτοί συνθέτουν το συνολικό κίνδυνο σε μια περιοχή. Επιπλέον, είναι επιτακτική ανάγκη η διερεύνηση μεθόδων για την μείωση και διαχείριση του κινδύνου πυρκαγιάς, ιδιαίτερα σε περιοχές προστασίας της φύσης.





# 3. Κίνδυνος Πυρκαγιάς



### 3 Παράγοντες κινδύνου πυρκαγιάς

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν μια από τις σημαντικότερες φυσικές καταστροφές, καθώς επιφέρουν δυσμενείς επιπτώσεις τόσο στους ανθρώπους, όσο και στο φυσικό περιβάλλον. Κάθε χρόνο το 4% της παγκόσμιας βλάστησης χάνεται από πυρκαγιές, ενώ παράλληλα οι πυρκαγιές επηρεάζουν τις ζωές εκατομμυρίων ανθρώπων προκαλώντας καταστροφές σε υποδομές και κατοικίες. Επίσης, οι πυρκαγιές προκαλούν σημαντικές εκπομπές επιβλαβών αερίων, διάβρωση του εδάφους, μειώνουν την παραγωγή αγαθών και μεταβάλλουν τη δυναμική των φυσικών οικοσυστημάτων<sup>[13]</sup>. Παράλληλα, η συχνή εμφάνιση πυρκαγιών σε ένα οικοσύστημα μειώνει σημαντικά τη δυνατότητα του να ανακάμψει και να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση<sup>[60]</sup>.

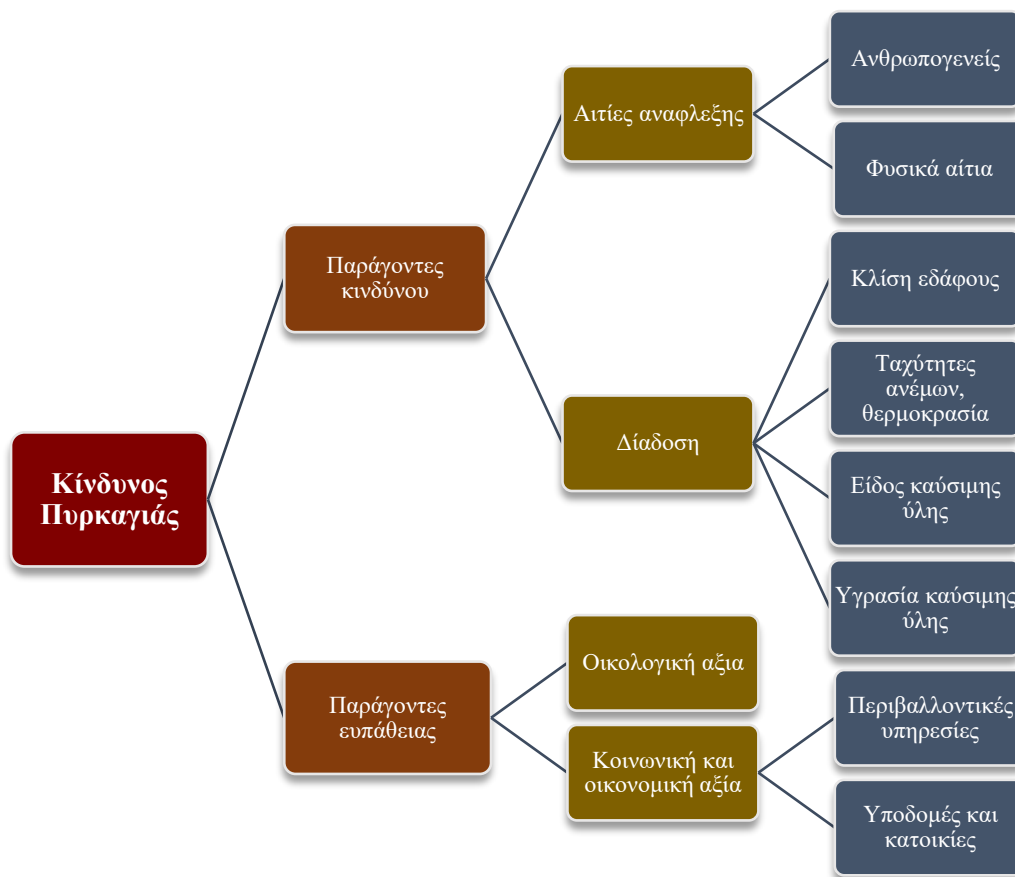
Η αρνητική επίδραση των κλιματικών παραγόντων κινδύνου όπως οι υψηλές θερμοκρασίες, η ξηρασία και η μείωση των βροχοπτώσεων, που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο έχουν αυξήσει σημαντικά το κίνδυνο εκδήλωσης πυρκαγιών ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες. Όμως οι παράγοντες που συνθέτουν το κίνδυνο πυρκαγιάς είναι πολύ περισσότεροι και πολλές φορές αλληλεξαρτώμενοι. Συγκεκριμένα, ο κίνδυνος πυρκαγιάς εξαρτάται από τη βροχόπτωση, τη σχετική υγρασία, τη θερμοκρασία του αέρα και εδάφους, την ταχύτητα του ανέμου, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά, τη κατάσταση και το είδος της βλάστησης, αλλά και από διάφορους κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες. Οι κλιματικοί/μετεωρολογικοί παράγοντες κινδύνου καθορίζουν το κίνδυνο σε χρονική κλίμακα, ενώ οι υπόλοιποι μπορούν να τον διαβαθμίσουν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια χωρικά, αναδεικνύοντας περιοχές ιδιαίτερου κινδύνου.

Η εκδήλωση πυρκαγιών σε δασικές εκτάσεις είναι ένα ιδιαίτερο φαινόμενο, καθώς δεν εξαρτάται εξ' ολοκλήρου από φυσικούς μηχανισμούς. Υπάρχουν δυο βασικοί παράγοντες που συνθέτουν τον κίνδυνο εμφάνισης δασικών πυρκαγιών. Ο πρώτος παράγοντας είναι η ανάφλεξη και ο δεύτερος η εξάπλωση της φωτιάς. Η ανάφλεξη των πυρκαγιών προκαλείται κυρίως από ανθρώπους, θελημένα με εμπρησμούς ή από αμέλεια. Για παράδειγμα στην Ευρώπη πάνω από το 90% των αναφλέξεων οφείλεται σε ανθρωπογενείς παράγοντες<sup>[14]</sup>. Η ανάπτυξη μιας πυρκαγιάς από την άλλη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6, καθορίζεται από τις κλιματικές-μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής, όπως η θερμοκρασία και η ταχύτητα των ανέμων<sup>[16]</sup>, το ανάγλυφο της περιοχής όπως τη κλίση του εδάφους και τέλος το είδος και τη κατάσταση της καύσιμης ύλης που είναι διαθέσιμη στη περιοχή. Οι παράγοντες αυτοί συνθέτουν τους λεγόμενους φυσικούς παράγοντες κινδύνου εκδήλωσης πυρκαγιών. Γενικότερα, σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος το ρίσκο (risk) εμφάνισης πυρκαγιάς για μια περιοχή είναι συνάρτηση του κινδύνου (hazard), της έκθεσης στο κίνδυνο (exposure) και της ευπάθειας (vulnerability). Ο κίνδυνος εμφάνισης πυρκαγιάς είναι συνδυασμός της παρουσίας πηγών ανάφλεξης, του είδους της καύσιμης ύλης και των παραγόντων που καθορίζουν τη διάδοση της πυρκαγιάς.



*Εικόνα 6: Σχηματική απεικόνιση των τεσσάρων βασικών παραγόντων που συνθέτουν τον κίνδυνο πυρκαγιάς (Κλιματικές-μετεωρολογικές συνθήκες, το είδος και η κατάσταση της καύσιμης ύλης, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά και η ανθρώπινη δραστηριότητα).*

Η ευπάθεια από την άλλη συμπεριλαμβάνει όλους τους κοινωνικούς, οικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες που υποδεικνύουν ότι μια περιοχή είναι ευάλωτη σε πυρκαγιές. Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες σχετίζονται με την κατάσταση περιβαλλοντικής προστασίας, την αξία της βιοποικιλότητας μιας περιοχής, αλλά και την ικανότητα ανάκαμψης του οικοσυστήματος. Οι κοινωνικοί παράγοντες σχετίζονται τόσο με τις υποδομές και τις κατοικίες που υπάρχουν στη περιοχή, όσο και από τα δημογραφικά χαρακτηριστικά των περιοχών. Τέλος, οι οικονομικοί παράγοντες, αναμενόμενα σχετίζονται με την ανθρώπινη δραστηριότητα της περιοχής, αλλά και με τις πιθανές οικονομικές επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρει μια πυρκαγιά<sup>[15]</sup>. Οι παράγοντες ρίσκου των πυρκαγιών συνοψίζονται στο Πίνακα 2.



Πίνακας 2: Οι παράγοντες που διαμορφώνουν τον κίνδυνο εμφάνισης πυρκαγιάς σε μια περιοχή [Πηγή: JRC European Commission, 2018, Basic criteria to assess wildfire risk at the pan-European level]

### 3.1 Καύσιμη ύλη

Η καύσιμη ύλη αποτελεί το υλικό στο οποίο γίνεται η ανάφλεξη και η εξάπλωση μιας πυρκαγιάς. Συμπεριλαμβάνει όλα τα είδη φυτών και των υπολειμμάτων τους που υπάρχουν σε μια περιοχή, στα οποία δύναται να διαδοθεί μια πυρκαγιά και αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα κινδύνου διάδοσης πυρκαγιών, καθώς είναι αυτός που ο άνθρωπος μπορεί να επιδράσει πιο εύκολα για να μειώσει τον συνολικό κίνδυνο. Η καύσιμη ύλη πάνω στην οποία διαδίδονται οι πυρκαγιές μπορεί να ομαδοποιηθεί σε τέσσερεις βασικούς τύπους<sup>[17]</sup>:

- Τη **χλόη (Grass)** που εμφανίζεται στα περισσότερα οικοσυστήματα. Τα κύρια χαρακτηριστικά της διάδοσης της φωτιάς στη χλόη είναι η γρήγορη ταχύτητα διάδοσης και η μικρή διάρκεια της.
- Τους **θάμνους (Shrubs)** που αποτελούν επίσης ένα πολύ συχνό είδος καυσίμου των οικοσυστημάτων. Η συμπεριφορά της φωτιάς σε θαμνώδεις εκτάσεις εξαρτάται από το είδος των θάμνων.
- Τα **απορρίμματα ξυλείας (Timber litter)** που συμπεριλαμβάνουν τα νεκρά τμήματα των φυτών και των δέντρων όπως φύλλα και κλαριά που συνθέτουν το έδαφος των δασών.
- Τους **κορμούς και τα υπολείμματά τους (Logging slash)** που συμπεριλαμβάνουν τα υπολείμματα της ξυλείας των δέντρων που προέρχονται είτε από φυσικά αίτια είτε από ανθρώπινη παρέμβαση.

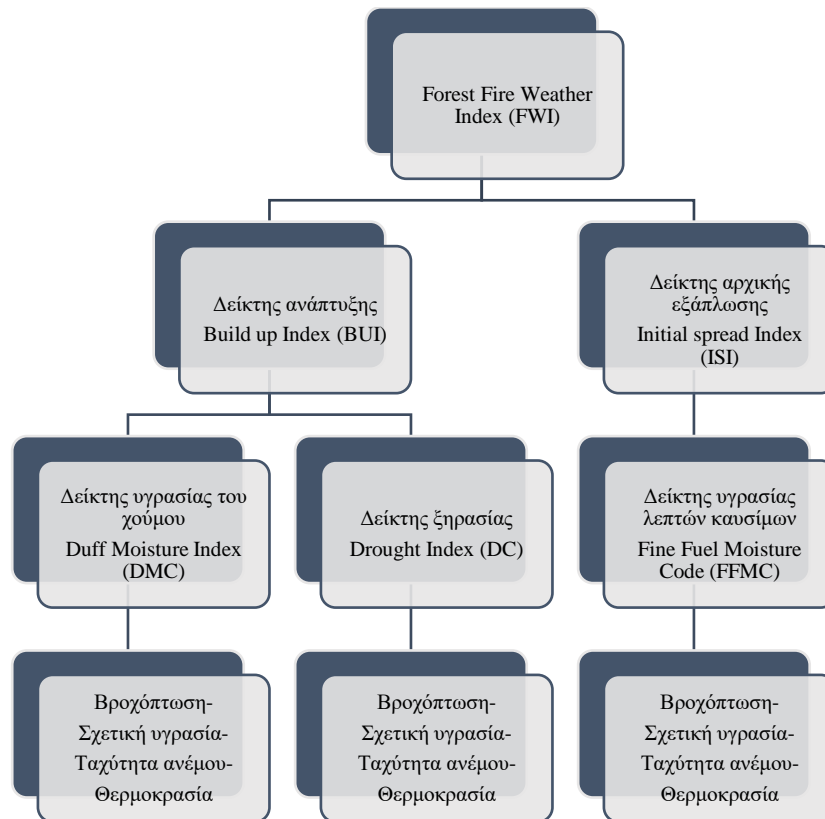


Κάθε είδος φυτού συμβάλει διαφορετικά στη διάδοση της πυρκαγιάς και ο ακριβής διαχωρισμός της καύσιμης ύλης γίνεται με μοντέλα τηλεπισκόπησης.<sup>[16]</sup>

Πέρα από το είδος της καύσιμης ύλης, πολύ σημαντική επίδραση στην εξάπλωση των πυρκαγιών έχει η κατάσταση που βρίσκεται. Η ικανότητα της καύσιμης ύλης να μεταφέρει τη φωτιά διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την περιεκτικότητα της σε υγρασία, τη πυκνότητα της, το μέγεθος της, τη χωρική συνέχεια της και τη κάθετη διαρρύθμιση της. Ο σημαντικότερος παράγοντας από αυτούς είναι η περιεκτικότητα της καύσιμης ύλης σε υγρασία, που πολλές φορές χρησιμοποιείται από μόνη της για να αποτυπωθεί ο κίνδυνος πυρκαγιάς σε μια περιοχή. Δεδομένου ότι το νερό που περιέχεται στην καύσιμη ύλη πρέπει να εξατμιστεί πριν συμβεί η ανάφλεξη, αναμενόμενα η περιεκτικότητα της καύσιμης ύλης σε υγρασία είναι εξαιρετικά σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την έναρξη μιας πυρκαγιάς<sup>[59]</sup>. Η ακριβής μέτρηση της υγρασίας που περιέχει η καύσιμη ύλη σε μεγάλες εκτάσεις είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθεί. Για αυτό χρησιμοποιούνται διάφορα προσεγγιστικά μοντέλα, τα οποία εκτιμούν την υγρασία από άμεσους μετεωρολογικούς ή έμμεσους τοπογραφικούς παράγοντες.

Βασικοί άμεσοι μετεωρολογικοί παράγοντες που επηρεάζουν την υγρασία της καύσιμης ύλης είναι ο άνεμος, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και οι βροχοπτώσεις. Οι έμμεσοι τοπογραφικοί παράγοντες είναι η κλίση του εδάφους και ο προσανατολισμός της. Αυτό συμβαίνει καθώς ο προσανατολισμός του εδάφους μιας περιοχής επηρεάζει σημαντικά τη ποσότητα της ακτινοβολίας που δέχεται η καύσιμη ύλη. Επίσης, έμμεσος παράγοντας επίδρασης είναι το υψόμετρο, αυτό συμβαίνει γιατί η υγρασία μεταβάλλεται με το ύψος. Τέλος, όπως είναι αναμενόμενο τόσο η υγρασία, όσο και η θερμοκρασία του αέρα και του εδάφους είναι χαμηλότερες κοντά σε περιοχές που υπάρχει νερό<sup>[32]</sup>, με αποτέλεσμα η καύσιμη ύλη κοντά στις περιοχές αυτές να εμφανίζει υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία. Η επίδραση των παραπάνω παραγόντων συμπεριλαμβάνεται σε διάφορους δείκτες, που αποτυπώνουν την κατάσταση της καύσιμης ύλης και την περιεκτικότητάς της σε υγρασία.

Ο πιο γνωστός δείκτης που σχετίζεται κυρίως με την υγρασία της καύσιμης ύλης είναι ο **Forest Fire Weather Index (FWI)**, ο οποίος αποτυπώνει τον ημερήσιο κίνδυνο πυρκαγιάς. Ο δείκτης FWI χρησιμοποιείται από το Ευρωπαϊκό Σύστημα Πληροφοριών για τις Δασικές Πυρκαγιές (European Forest Fire Information System, EFFIS) που ανήκει στο Σύστημα Διαχείρισης Καταστάσεων Έκτακτης Ανάγκης του Ευρωπαϊκού προγράμματος Κοπέρνικος (Copernicus Emergency Management Service, Copernicus EMS) για τη πρόγνωση της δασικής επικινδυνότητας πυρκαγιάς στην Ευρώπη. Η επικινδυνότητα πυρκαγιάς μέσω του δείκτη FWI από το EFFIS αναρτάται ημερησίως και εκτιμά τον κίνδυνο για 1 με 10 ημέρες. Η σχηματική απεικόνιση του υπολογισμού του δείκτη FWI παρουσιάζεται στο Πίνακα 3, όπου στη βάση του σχήματος είναι οι παράγοντες, κλιματικοί-μετεωρολογικοί, που καθορίζουν την κατάσταση της καύσιμης ύλης και στα ενδιάμεσα επίπεδα αναφέρονται οι δείκτες που διαμορφώνουν τον τελικό δείκτη FWI. Οι πέντε επιμέρους δείκτες μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες. Στους δείκτες ανάπτυξης και αρχικής εξάπλωσης, που σχετίζονται με την εξάπλωση της πυρκαγιάς και τους δείκτες που σχετίζονται με την υγρασία της καύσιμης ύλης (δείκτης υγρασίας του χούμου, ξηρασίας και υγρασίας λεπτών καυσίμων). Οι ενδιάμεσοι δείκτες υπολογίζονται από δεδομένα μετεωρολογικών προβλέψεων, που προέρχονται κυρίως από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προγνώσεων (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ή ECMWF). Υπάρχουν φυσικά και άλλοι παρόμοιοι δείκτες που αναφέρονται ονομαστικά McArthur Forest Fire Danger Index (MARK-5), ο Keetch-Byram Drought Index (KBDI) και National Fire Danger Rating System (NFDRS).



**Πίνακας 3:** Σχηματική απεικόνιση των παραμέτρων, από του οποίους υπολογίζεται ο δείκτης FWI. [Πηγή: JRC European Commission, 2018, Basic criteria to assess wildfire risk at the pan-European level]

Ένας άλλος τρόπος έμμεσης εκτίμησης της περιεκτικότητας της καύσιμης ύλης σε υγρασία, από το ανάγλυφο μιας περιοχής, είναι ο **Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας (Topographic Wetness Index ή TWI)**. Όπως αναφέρεται και στην ονομασία του, ο δείκτης αυτός χρησιμοποιεί τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής για να αποτυπώσει τις περιοχές που τείνει να συγκεντρώνεται το νερό. Οι περιοχές με μεγάλες τιμές του δείκτη αναμένεται να χαρακτηρίζονται από καύσιμη ύλη με υψηλή υγρασία. Ο δείκτης ενσωματώνει τη παροχή νερού από τις πηγές που τοποθετούνται σε υψηλό υψόμετρο και την απορροή υδάτων από τις περιοχές χαμηλότερου υψόμετρο, σύμφωνα με τη μορφολογία του εδάφους. Ο TWI αναπτύχθηκε από τους Beven και Kirkby (1979) στα πλαίσια του μοντέλου TOPMODEL, στο οποίο γίνεται η υπόθεση ότι η υδραυλική κλίση μπορεί να προσεγγιστεί από τη τοπογραφική κλίση. Το μοντέλο των Beven και Kirkby προσομοιώνει τις αλληλεπιδράσεις του νερού με τη τοπογραφία, αναδεικνύοντας τις περιοχές που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα να συγκεντρωθεί το νερό<sup>[27]</sup>.

Ο δείκτης TWI υπολογίζεται από τη συνολική επιφάνεια των λεκανών απορροής (Total Catchment Area ή TCA), το πλάτος ροής (Flow Width ή FW) και τη βαθμίδα της κλίσης του εδάφους (Slope)<sup>[18]</sup> σύμφωνα με τη σχέση (1a)

$$TWI = \ln \frac{TCA/FW}{\tan(Slope)} \quad (1a)$$

Η σχέση (1a) πολλές φορές συναντάται στη βιβλιογραφία με μια πιο απλή μορφή (1b)

$$TWI = \ln \frac{a}{\tan b} \quad (1b)$$



Ο δείκτης TWI παίρνει τιμές από -3 έως 30, όπου οι τιμές μεγαλύτερες του 10 υποδηλώνουν περιοχές συγκέντρωσης νερού ενώ τιμές μικρότερες του 7 υποδηλώνουν ξηρές περιοχές.

Τέλος, υπάρχουν και μέθοδοι έμμεσης εκτίμησης της περιεκτικότητας της καύσιμης ύλης σε υγρασία με ανάλυση πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων. Ένας από τους πιο γνωστούς δείκτες είναι ο **Normalized Difference Moisture Index (NDMI)** που αποτυπώνει τόσο τη περιεκτικότητα των φυλλωμάτων των φυτών σε υγρασία όσο και το ίδιο το νερό μέσα από τη φασματική υπογραφή του (Συμπλήρωμα 1). Για τον υπολογισμό του NDMI απαιτούνται δορυφορικές εικόνες στα φασματικά παράθυρα του κοντινού υπέρυθρου (Near Infrared ή NIR) στο μήκος κύματος των 850nm και του υπέρυθρου μικρού μήκους κύματος (Short Wave Infrared ή SWIR). Για τις εικόνες του δορυφόρου Sentinel-2 που προέρχονται από τον πολυφασματογράφο MSI (Multi Spectral Instrument) αντιστοιχούν στα φασματικά κανάλια (NIR) B8A του κοντινού υπέρυθρου και B11 του υπέρυθρου μικρού μήκους κύματος (SWIR) ή στα φασματικά κανάλια (NIR) B8A του κοντινού υπέρυθρου και B12 του υπέρυθρου μικρού μήκους κύματος (SWIR). Ο ακριβής υπολογισμός του NDMI δίνεται από τη σχέση (2) και παίρνει τιμές από -1 έως +1. Τιμές από -1 έως 0 δηλώνουν απουσία φυλλώματος βλάστησης και νερού ενώ τιμές από 0.3 έως +1 δείχνουν τη περιεκτικότητα νερού και υγρασίας στη βλάστηση, με το +1 να είναι η μέγιστη τιμή<sup>[29]</sup>.

$$\text{NDMI} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}} \quad (2)$$

Ο NDWI συνήθως χρησιμοποιείται για αναλύσεις καλλιεργειών ώστε να εκτιμηθεί η υγεία των φυτών. Όπως είναι προφανές οι δορυφορικές εικόνες περιέχουν τη πληροφορία των φασματικών υπογραφών του ανώτερου τμήματος του φυλλώματος των δέντρων, ειδικά σε περιοχές πυκνής βλάστησης, επομένως ο NDWI είναι δύσκολο να αποδώσει την πραγματική κατάσταση της καύσιμης ύλης που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια της γης. Μπορεί όμως να αναγνωρίσει τις περιοχές με πυκνή βλάστηση οι οποίες είναι ευάλωτες σε πυρκαγιές και τη παρουσία νερού σε αυτές.

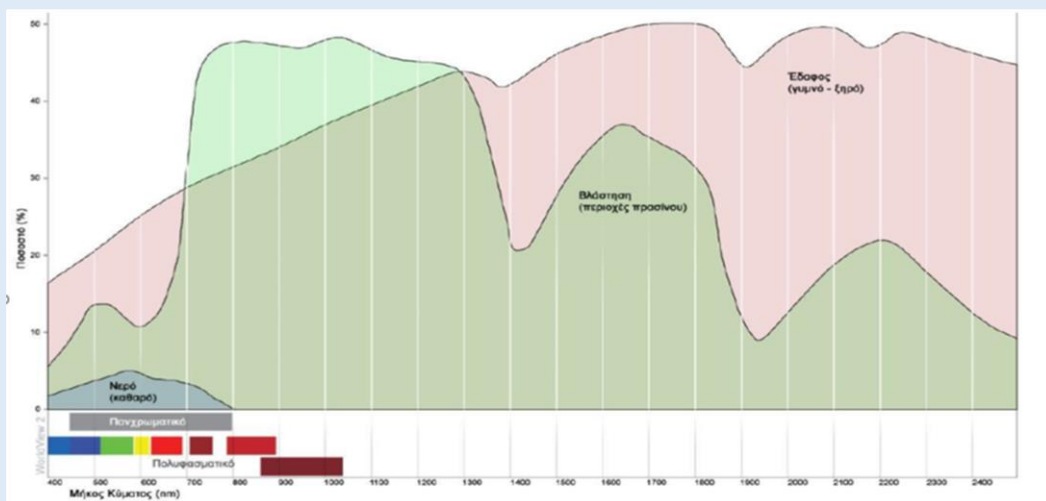
Ένας άλλος γνωστός δείκτης είναι ο **Normalized Difference Water Index (NDWI)** που αποτυπώνει κυρίως το νερό στην επιφάνεια της γης. Ο NDWI όπως και ο TWI μπορεί να δώσει μια έμμεση εκτίμηση της περιεκτικότητας της καύσιμης ύλης σε υγρασία, από τη παρουσία νερού σε μια περιοχή. Πολλές φορές συγκεκριμένος δείκτης συναντάται στη βιβλιογραφία με το ίδιο όνομα με τον δείκτη NDMI, όμως ο NDWI διαφέρει τόσο στο τρόπο που υπολογίζεται, όσο και στη πληροφορία που δίνει. Για τον υπολογισμό του NDWI απαιτούνται δορυφορικές εικόνες στα φασματικά παράθυρα του ορατού πράσινου (Green) περίπου στο μήκος κύματος των 560nm και του κοντινού υπέρυθρου (Near Infrared ή NIR) περίπου στο μήκος κύματος των 850nm. Για τις εικόνες του δορυφόρου Sentinel-2, τα μήκη κύματος αντιστοιχούν στα φασματικά κανάλια του πράσινου (Green) B03 και του κοντινού υπέρυθρου (NIR) B08. Ο ακριβής υπολογισμός του NDWI δίνεται από τη σχέση (3) και παίρνει τιμές από -1 έως +1. Τιμές από -1 έως 0 δηλώνουν απουσία νερού ενώ τιμές από 0.3 έως +1 δείχνουν παρουσία νερού και υγρασίας, με το +1 να είναι η μέγιστη τιμή<sup>[30]</sup>.

$$\text{NDWI} = \frac{\text{GREEN} - \text{NIR}}{\text{GREEN} + \text{NIR}} \quad (3)$$



### Συμπλήρωμα 1: Φασματική υπογραφή – Φασματική απόκριση υλικών

Τα κάθε υλικό απορροφά, επανεκπέμπει και ανακλά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που δέχεται από τον ήλιο με διαφορετικό τρόπο, ανάλογα με τα φυσικά χαρακτηριστικά του. Η ποσότητα και φασματική κατανομή της εκπεμπόμενης και ανακλώμενης ακτινοβολίας ενός αντικειμένου ονομάζεται φασματική ταυτότητα ή φασματική απόκριση<sup>[20]</sup>. Καταγράφοντας την ανακλώμενη και εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία των διαφόρων αντικειμένων από την επιφάνεια της Γης μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για το είδος τους και τις ιδιότητές τους. Στην εικόνα του παραρτήματος φαίνεται σχηματικά η φασματική απόκριση του εδάφους, της βλάστησης και του νερού στο ορατό, εγγύς και μέσο υπέρυθρο φάσμα (0.4-2.6μm). Με βάση την φασματική ταυτότητα της βλάστησης υπάρχουν κατάλληλοι δείκτες (δείκτες βλάστησης) με τους οποίους αναγνωρίζεται και ελέγχεται η κατάσταση της βλάστησης. Χρήσιμοι δείκτες βλάστησης για τη παρούσα διπλωματική είναι ο Normalized Difference Water Index (NDWI) που συσχετίζεται με τη περιεκτικότητα των φυτών σε νερό μέσα από τη φασματική υπογραφή τους και ο Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) που εκμεταλλεύεται την διαφορά της φασματικής απόκρισης της βλάστησης ανάμεσα στο ορατό κόκκινο και το εγγύς υπέρυθρο για την αναγνώριση των εκτάσεων που καλύπτονται από βλάστηση.





### 3.2 Ανάγλυφο

Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην διάδοση των πυρκαγιών διαδραματίζει η μορφολογία της περιοχής. Αρχικά, το **υψόμετρο (elevation)** καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη ποσότητα και ως ένα βαθμό τη κατάσταση της καύσιμης ύλης που είναι διαθέσιμη σε μια περιοχή. Δασικές εκτάσεις σε χαμηλά υψόμετρα χάνουν την υγρασία τους γρηγορότερα στο έτος σε σχέση με τις περιοχές που βρίσκονται σε ψηλότερα υψόμετρα εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας. Παράλληλα, περιοχές σε μεγαλύτερα υψόμετρα συνήθως δεν έχουν μεγάλη πυκνότητα καύσιμης ύλης<sup>[17]</sup>.

Ένας άλλος σημαντικός μορφολογικός παράγοντας που επηρεάζει τη διάδοση της πυρκαγιάς είναι η **κλίση του εδάφους (slope)** που βρίσκεται μια δασική περιοχή. Η κλίση του εδάφους ουσιαστικά είναι η γωνία που σχηματίζει η εφαιπτομένη στο έδαφος μιας περιοχής ως προς το επίπεδο παράλληλο με τη θάλασσα. Μια φωτιά διαδίδεται ευκολότερα ανηφορίζοντας μια πλαγιά, αυτό συμβαίνει καθώς η καύσιμη ύλη είναι πιο εύκολα πρόσβασιμη στη φωτιά προς τα επίπεδα που βρίσκονται προς τα επάνω. Όσο πιο μεγάλη η κλίση της δασικής περιοχής τόσο πιο γρήγορα διαδίδεται η πυρκαγιά προς τα ανώτερα επίπεδα. Στη διάδοση της φωτιάς σε πλαγιές συνεισφέρουν και τα τοπικά περιοδικά φαινόμενα κυκλοφορίας του ανέμου που σχετίζονται άμεσα με τη κλίση της περιοχής. Οι αναβατικοί και καταβατικοί<sup>[21]</sup> άνεμοι όπως ονομάζονται, είναι τοπικοί περιοδικοί άνεμοι που πνέουν κατά τη διάρκεια της ημέρας από τις κοιλάδες προς τα όρη, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας έχουν αντίθετη φορά κίνησης από τα όρη προς τις κοιλάδες. Οι άνεμοι αυτοί είναι γνωστοί ως αύρα των ορέων και κοιλάδων και οφείλουν τη δημιουργία τους στην εναλλαγή της θερμοκρασίας στη διάρκεια της ημέρας<sup>[21]</sup>. Αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού είναι η διάδοση της φωτιάς προς τα επάνω την ημέρα σε περιοχές με κλίση να ευνοείται ακόμα περισσότερο, ενώ τη νύχτα ο καταβάτης άνεμος πνέει αντίθετα στη φορά διάδοσης της φωτιάς.

Επίσης πολύ σημαντικός μορφολογικός παράγοντας είναι ο **προσανατολισμός του εδάφους (aspect)**, καθώς καθορίζει το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια περιοχή. Στο βόρειο ημισφαίριο οι κλίσεις του εδάφους με νότιο προσανατολισμό δέχονται μεγαλύτερο ποσό ακτινοβολίας του ήλιου συγκριτικά με τους άλλους προσανατολισμούς και αυτό έχει ως συνέπεια η καύσιμη ύλη να έχει λιγότερη υγρασία, επιτρέποντας έτσι την ευκολότερη διάδοση μιας πυρκαγιάς. Ακόμα, οι νότια προσανατολισμένες κλίσεις έχουν πιο ελαφριά καύσιμη ύλη και λιγότερη υγρασία άρα είναι πιο επιρρεπείς στη ανάπτυξη πυρκαγιών<sup>[17]</sup>.

Τέλος, υπάρχουν και τα φυσικά και τεχνητά **εμπόδια** που μπορεί να είναι δρόμοι, λίμνες, ποτάμια, θάλασσα κ.α. Τα εμπόδια λειτουργούν ως φραγμοί που δυσκολεύουν τη ανάπτυξη της πυρκαγιάς. Υπάρχουν και άλλοι μορφολογικοί παράγοντες μικρότερης σημασίας που σχετίζονται με τα τοπικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής.

### 3.3 Κλιματικές-Μετεωρολογικές συνθήκες

Οι κλιματικές-μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν σε μια περιοχή διαχωρίζονται ανάλογα με τη κλίμακα του χρόνου και του χώρου. Η περιγραφή των παραμέτρων σε μεγάλη κλίμακα χώρου και χρόνου διαμορφώνει τις κλιματικές συνθήκες μιας περιοχής, ενώ η περιγραφή των παραμέτρων σε μικρότερη κλίμακα χώρου και χρόνου περιγράφει τα μετεωρολογικά (ή συνοπτικά) φαινόμενά μιας περιοχής. Όπως ήδη αναφέρθηκε στο πίνακα 1 η κλιματική κρίση έχει επιφέρει ή θα επιφέρει σημαντικές μεταβολές σε όλους τους κλιματικούς-μετεωρολογικούς παράγοντες που σχετίζονται με την εμφάνιση πυρκαγιών. Αρχικά, αύξηση της **θερμοκρασίας** και η μεγαλύτερη διάρκεια θερμών ημερών έχει προφανείς

συνέπειες στην αύξηση του κινδύνου πυρκαγιάς. Οι υψηλές θερμοκρασίες στο έδαφος και στον αέρα δημιουργούν συνθήκες που μια φωτιά μπορεί να αναφλεχθεί και να αναπτυχθεί. Η μείωση των **βροχοπτώσεων** σε συνδυασμό με την αύξηση της **ξηρασίας** μειώνουν την υγρασία της καύσιμης ύλης, αυξάνοντας τον κίνδυνο ανάφλεξης και ανάπτυξης των πυρκαγιών. Για την περιοχή της Ελλάδας προβλέψεις μακροπρόθεσμων και μεσοπρόθεσμων κλιματικών μοντέλων για τη περίοδο 2026-2045 και 2071-2100 συγκριτικά με τη περίοδο 1961-1990 δείχνουν να συμβαδίζουν με τις γενικές προβλέψεις των κλιματικών μοντέλων, όπως προαναφέρθηκα στο κεφάλαιο 2. Τα κλιματικά μοντέλα δείχνουν αύξηση της μέσης θερμοκρασίας κατά 2,5°C με 3,5°C, σύμφωνα με το σενάριο της ραγδαίας οικονομικής ανάπτυξης που χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα έντονη κατανάλωση ενέργειας αλλά παράλληλη διάδοση νέων τεχνολογιών με χρήση τόσο ορυκτών καυσίμων όσο και εναλλακτικών πηγών ενέργειας<sup>[34]</sup>. Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη στις βόρειες περιοχές της Ελλάδας και μικρότερη στις νότιες. Παράλληλα, σύμφωνα με το ίδιο σενάριο αναμένεται μείωση των βροχοπτώσεων για τη περίοδο 2071-2100 συγκριτικά με τη περίοδο 1961-1990 σε όλη τη χώρα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, εκτός από τη περιοχή της Κρήτης, ενώ ταυτόχρονα θα αυξηθεί η ένταση τους<sup>[22]</sup>. Αυτά θα έχουν ως συνέπεια σταδιακά την αύξηση του κινδύνου πυρκαγιάς στην Ελλάδα.

Τέλος πολύ σημαντικός μετεωρολογικός παράγοντας κινδύνου ανάπτυξης πυρκαγιών είναι ο **άνεμος**. Ο άνεμος καθορίζει κατά κύριο λόγο τη κατεύθυνση διάδοσης της πυρκαγιάς, συντηρεί τη φωτιά παρέχοντας οξυγόνο, στεγνώνει από υγρασία τη καύσιμη ύλη και μεταφέρει σπινθήρες μακριά από τη κύρια εστία<sup>[17]</sup>. Ο άνεμος είναι ιδιαίτερα μεταβλητή παράμετρος και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες μικρής και μεγάλης κλίμακας. Μεταβάλλεται σημαντικά τόσο στη διάρκεια μιας ημέρας όσο και στη διάρκεια του έτους. Ήδη στη προηγούμενη υποενότητα παρουσιάστηκε ένα τοπικό περιοδικό φαινόμενο κυκλοφορίας του ανέμου μικρής κλίμακας (αναβάτης-καταβάτης άνεμος) που διαφέρει δραστικά στο κύκλο μέρας και νύχτας.

Ο αναλυτικός υπολογισμός των κλιματικών-μετεωρολογικών παραμέτρων είναι μια εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία που αποτελεί αντικείμενο μελέτης διαφορετικών επιστημών. Το κλασικό μοντέλο πρόβλεψης και περιγραφής των φυσικών παραμέτρων της θερμοκρασίας (T), της ταχύτητας του ανέμου (**v**) της πυκνότητας ( $\rho$ ) και της πίεσης (P) περιγράφεται από τις εξισώσεις που περιγράφουν τη δυναμική της ατμόσφαιρας. Οι εξισώσεις αποτελούν τις μαθηματικές εκφράσεις των βασικών Νόμων της διατήρησης της μάζας (εξ. συνέχειας), του 2<sup>ου</sup> Νόμου του Νεύτωνα (διατήρηση ορμής), του 1<sup>ου</sup> Νόμου της θερμοδυναμικής και μιας έκφρασης για τη καταστατική εξίσωση των αερίων<sup>[38]</sup>. Η μελέτη των εξισώσεων με κατάλληλες προσεγγίσεις ανάλογα με τη χρονική και χωρική κλίμακα περιγράφει άμεσα τις μεταβλητές της θερμοκρασίας και της ταχύτητας, ενώ έμμεσα προβλέπει άλλες παραμέτρους και φαινόμενα όπως οι βροχοπτώσεις. Αναφορικά το σύστημα των 6 εξισώσεων είναι<sup>[37]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} + \nabla(\mathbf{v}p) &= 0 && \text{(εξίσωση συνέχειας)} \\ \frac{D\mathbf{v}}{Dt} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} &= -\frac{\nabla P}{\rho} - \nabla\Phi_g - \mathbf{u} * \nabla^2 \mathbf{v} + \text{όροι τριβής} && \text{(εξισώσεις διατήρησης ορμής)} \\ c_p \frac{D\theta}{Dt} &= \frac{\theta}{T} \dot{Q} && \text{(θερμοδυναμική)} \\ PV &= RT && \text{(καταστατική π.χ. ιδανικό αέριο)} \end{aligned}$$



Είναι σαφές πως η μελέτη των παραπάνω μη γραμμικών εξισώσεων είναι εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία, με αναλυτικές λύσεις να είναι δυνατές σε ελάχιστες περιπτώσεις και μετά από αρκετές παραδοχές. Επομένως, οι καλύτερες δυνατές βραχυχρόνιες προβλέψεις για τις παραμέτρους ενδιαφέροντος δίνονται από υπολογιστικά ατμοσφαιρικά μοντέλα πρόβλεψης. Ιδιαίτερα, οι περιοχές κοντά στην επιφάνεια της γης βρίσκονται εντός του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος (ΑΟΣ) παρουσιάζουν ιδιαίτερες δυσκολίες μελέτης. Το ΑΟΣ είναι ένα λεπτό (~2km) μεταβλητό ατμοσφαιρικό στρώμα, ανάμεσα στη τροπόσφαιρα και την επιφάνεια της γης. Μέσα στο ΑΟΣ της Γης κυριαρχεί η τυρβώδης ροή των ανέμων, αυτό επιτρέπει στο ΑΟΣ να ανταποκρίνεται σχετικά γρήγορα σε κάθε μεταβολή που πραγματοποιείται στην επιφάνεια της Γης, αυξάνοντας τη πολυπλοκότητα της περιγραφής του συστήματος. Ο άνεμος για παράδειγμα εντός του ΑΟΣ στρέφεται από τις υψηλές προς τις χαμηλές πιέσεις, ενώ πάνω από το ΑΟΣ πνέει παράλληλα προς τις ισοβαρείς (καμπύλες που συνδέουν σημεία με ίδια ατμοσφαιρική πίεση). Η στροφή αυτή του ανέμου εντός του ΑΟΣ δημιουργεί μια σπειροειδή κίνηση γνωστή και ως σπείρα Eckman<sup>[39]</sup>.



# 4. G.I.S.



## 4 Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών

Όπως έχει ήδη αρχίσει να διαφαίνεται, οι περισσότεροι παράγοντες κινδύνου πυρκαγιών είναι χωρικά ορισμένοι, το γεγονός αυτό κάνει εξαιρετικά εύχρηστη την αποτύπωση τους σε επίπεδα πληροφορίας σε λογισμικό Σ.Γ.Π. Ένα Σ.Γ.Π. γνωστό ευρέως και ως G.I.S. (Geographic Information System), συνοπτικά είναι ένα πληροφοριακό σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται για την εισαγωγή, ανάκτηση, διαχείριση, ανάλυση και απόδοση γεωγραφικών δεδομένων έχοντας σαν κύριο στόχο την υποστήριξη διαδικασιών λήψης αποφάσεων που σχετίζονται με το σχεδιασμό και τη διαχείριση χρήσεων γης, φυσικών διαθεσίμων, περιβάλλοντος, μεταφορών, υπηρεσιών σε αστικό χώρο. Τα γεωγραφικά δεδομένα χαρακτηρίζονται από:

- τη θέση στο χώρο,
- τα περιγραφικά στοιχεία,
- τη χωρική σύνδεση με το χρόνο.

Οι χωρικές πληροφορίες που προέρχονται από διαφορετικούς επιστημονικούς κλάδους μπορούν να συνδυαστούν, να αναλυθούν και να παρουσιαστούν σε πλατφόρμες Σ.Γ.Π. μεταφέροντας σημαντικά δεδομένα και πληροφορίες, με τρόπο κατανοητό τόσο από τους άμεσα ενδιαφερόμενους φορείς όσο και από τους πολίτες. Έτσι τα Σ.Γ.Π. λειτουργούν ως ένα σημείο συγκέντρωσης πληροφοριών που μπορεί να έχει πρόσβαση ο κάθε ενδιαφερόμενος.

Τα γεωγραφικά δεδομένα στα Σ.Γ.Π. μπορούν να αναπαρασταθούν με δύο βασικές μορφές:

- τα δεδομένα διανυσματικής μορφής (vector)
- τα δεδομένα ψηφιδωτής μορφής (raster)

Σε όλα τα Σ.Γ.Π. οι δύο μορφές μπορούν να συνυπάρχουν ως επίπεδα πληροφορίας, ενώ πολλά λογισμικά GIS προσφέρουν την δυνατότητα μετάβασης από τη μία μορφή στην άλλη<sup>[36]</sup>.

Τα διανυσματικά δεδομένα μπορούν να αναπαρασταθούν με σημεία, γραμμές ή και πολύγωνα. Χαρακτηριστικά, παραδείγματα διανυσματικών δεδομένων είναι η θέση μιας ανεμογεννήτριας (Σημεία), ένας δρόμος (γραμμή) και ένα οικόπεδο (πολύγωνο)

Τα δεδομένα ψηφιδωτής μορφής αποτελούνται από κελιά που χαρακτηρίζονται από ένα πεδίο τιμών. Οι τιμές μπορεί να είναι οποιοδήποτε υποσύνολο των πραγματικών αριθμών ανάλογα με τη πληροφορία που περιγράφουν. Συνήθως, με δεδομένα ψηφιδωτής μορφής παρουσιάζονται μεγέθη που έχουν συνεχείς τιμές στο χώρο, όπως ο άνεμος και η θερμοκρασία

Επομένως, σε ένα Σ.Γ.Π. μπορούν να αποτυπωθούν διανυσματικά δεδομένα και δεδομένα κανονικοποιημένης ψηφιδωτής μορφής σε επίπεδα πληροφορίας και στη συνέχεια να γίνουν αναλύσεις, που με διαφορετικό τρόπο θα ήταν πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθούν. Παράλληλα, τόσο τα δεδομένα όσο τα αποτελέσματα των αναλύσεων, όπως θα φανεί πιο κάτω, παρουσιάζονται σε ένα Σ.Γ.Π. με τρόπο ενστικτώδη που διευκολύνει σημαντικά τη γρήγορη ερμηνεία τους, με αποτέλεσμα τη διευκόλυνση της λήψης αποφάσεων. Στη παρούσα διπλωματική θα επεξεργαστούμε τόσο δεδομένα κανονικοποιημένης ψηφιδωτής μορφής, όσο και διανυσματικά με ένα εύρη φάσμα απλών και σύνθετων αναλύσεων που παρέχουν το λογισμικό Σ.Γ.Π.<sup>[56]</sup>. Επίσης, όλες οι αναλύσεις θα πραγματοποιηθούν σε λογισμικό Σ.Γ.Π. ArcGIS Pro.



#### 4.1 Ανάλυση διανυσματικών δεδομένων και ανάλυση ψηφιδωτών δεδομένων

Η ανάλυση των διανυσματικών δεδομένων διαχωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες τις λειτουργίες ανάλυσης ενός επιπέδου και τις λειτουργίες υπέρθεσης επιπέδων. Από τη μια πλευρά, στις λειτουργίες ενός επιπέδου υπάγονται πολύ βασικές αναλύσεις όπως η δημιουργία περιμετρικών ζωνών (buffer zones), η συγχώνευση (dissolve) επιπέδων, η αποκοπή (clip) καθώς και η δημιουργία νέων διανυσματικών επιπέδων. Στις λειτουργίες υπέρθεσης υπάγονται οι αναλύσεις που περιλαμβάνουν περισσότερα από ένα επίπεδα όπως η αποκοπή (clip), η τομή (intersect), η ένωση (union), η ταυτοποίηση (identity), η συνένωση (merge) και η απαλοιφή (erase) <sup>[36]</sup>. Κάθε διανυσματικό επίπεδο συνοδεύονται από ένα περιγραφικό πίνακα, στον οποίο αναγράφονται εξαιρετικά χρήσιμες πληροφορίες για τις οντότητες του επιπέδου όπως συντεταγμένες, αποστάσεις, εμβαδά και περιγραφές κειμένου. Στους πίνακες αυτούς, μπορούν να συμπεριληφθούν μαθηματικές σχέσεις ή λογικές εκφράσεις με τις οποίες μπορούν να διεξαχθούν αναλύσεις.

Από την άλλη, η ανάλυση των ψηφιδωτών δεδομένων χαρακτηρίζεται από τις μαθηματικές και λογικές πράξεις ανάμεσα στα κελιά, τα οποία έχουν τη μορφή προκαθορισμένων γεωμετρικών σχημάτων συγκεκριμένων διαστάσεων. Τα περισσότερα επίπεδα που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής είναι σε μορφή ψηφιδωτών δεδομένων. Τα σύγχρονα λογισμικά Σ.Γ.Π. διαθέτουν μεγάλη ποικιλία εργαλείων επεξεργασίας ψηφιδωτών δεδομένων, ανάλογα με τις ανάγκες της ανάλυσης. Αυτές οι λειτουργίες ταξινομούνται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

- τοπικές (local),
- κεντρικές ή λειτουργίες γειτονίας (focal),
- λειτουργίες ζωνών (zonal)
- γενικευμένες (global) λειτουργίες <sup>[36]</sup>.

Στις παραπάνω κατηγορίες χρησιμοποιείται η θεωρία της άλγεβρας χαρτών (Map Algebra) η οποία τεκμηριώθηκε στις αρχές τις δεκαετίας του 1990<sup>[48]</sup>. Οι τοπικές λειτουργίες εφαρμόζονται σε δυο ή περισσότερα επίπεδα ψηφιδωτών δεδομένων και το αποτέλεσμα της ανάλυσης προέρχεται από μια λογική ή μαθηματική πράξη ανάμεσα σε κελιά με σαφή γεωγραφικό προσδιορισμό. Κατά τη εφαρμογή των εργαλείων που εφαρμόζουν λειτουργίες ζωνών, η τιμή για κάθε ψηφίδα του παραγόμενου επιπέδου υπολογίζεται με βάση τις τιμές όλων των ψηφιδών της ζώνης στην οποία ανήκει η συγκεκριμένη ψηφίδα στο επίπεδο εισόδου <sup>[36]</sup>. Με διαφορετικό τρόπο λειτουργούν οι εφαρμογές που βασίζονται σε γενικευμένες λειτουργίες. Σε αυτές οι τιμές σε κάθε ψηφίδα του παραγόμενου επιπέδου υπολογίζονται με βάση όλων των ψηφιδών του επιπέδου των δεδομένων εισόδου. Τέλος, οι εφαρμογές που βασίζονται σε λειτουργία γειτονίας εκτελούν λογικές ή μαθηματικές πράξεις ανάμεσα σε ένα κελί και τα γειτονικά του. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα κελιά του επιπέδου εισόδου. Οι περιγραφές των λειτουργιών που θα αξιοποιηθούν στη συνέχεια της διπλωματικής θα περιλαμβάνονται στις περιγραφές των εκάστοτε λειτουργιών στις ενότητες που θα χρησιμοποιηθούν.

#### 4.2 Γεωστατιστικές μέθοδοι ανάλυσης χωρικής παρεμβολής.

Πολλές φορές χρειάζεται από χωρικά εντοπισμένες σημειακές πληροφορίες διανυσματικών δεδομένων να εκτιμηθεί μια συνεχή επιφάνεια με δεδομένα ψηφιδωτής μορφής ή πολυγωνικά διανυσματικά δεδομένα. Αυτό ακριβώς επιτυγχάνουν οι μεθοδολογίες χωρικής παρεμβολής (Spatial Interpolation), που μπορούν σε ορισμένες περιπτώσεις, να δώσουν μια εκτίμηση των



τιμών που έχουν οι μεταβλητές σε όλο το χώρο με ένα συνεχή τρόπο<sup>[42]</sup>. Η χωρική παρεμβολή είναι αντικείμενο μελέτης της Γεωστατιστικής. Η Γεωστατιστική αποτελεί εφαρμογή της θεωρίας των Τυχαίων Συναρτήσεων στις Γεωεπιστήμες. Στόχος της είναι η ανάπτυξη αποτελεσματικών αλγορίθμων παρεμβολής για την δημιουργία τρισδιάστατων ή δισδιάστατων μοντέλων της μεταβλητής ενδιαφέροντος. Με την εφαρμογή της μεθοδολογίας γεωστατιστικής παρεμβολής παρακάμπτεται η πολυπλοκότητα των φυσικών διεργασιών, δίνοντας έτσι εκτιμήσεις για τις τιμές των μεταβλητών σε όλο το χώρο. Όπως είναι αναμενόμενο, η ακρίβεια της γεωστατιστικής παρεμβολής εξαρτάται από τη ποιότητα και το πλήθος των δεδομένων του δείγματος στο οποίο εφαρμόζεται.

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι για τη διεξαγωγή χωρικής παρεμβολής ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δείγματος<sup>[42]</sup>. Η μεθοδολογία Kriging αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές μεθόδους και αναπτύσσεται στη βάση της παραδοχής ότι το μετρούμενο μέγεθος  $z$  είναι μια περιφερειοποιημένη μεταβλητή, δηλαδή μια μονοσήμαντη και ομαλά μεταβαλλόμενη μεταβλητή, που δεν λαμβάνει τυχαίες τιμές, ούτε όμως περιγράφεται με απόλυτη ακρίβεια από μια γεωμετρική επιφάνεια που να ορίζεται από μια μαθηματική συνάρτηση<sup>[44]</sup>. Η περιφερειοποιημένη μεταβλητή έχει μια συνιστώσα τάσης την  $\mu$ , που μπορεί να είναι μια σταθερή μέση τιμή ή μια επιφάνεια πρώτου, δεύτερου ή τρίτου βαθμού. Η συνιστώσα αυτή περιγράφει οριζόντια το δείγμα και ανάλογα με τη συναρτησιακή της εξάρτηση από τη θέση διαβαθμίζει και τη κατηγορία της παρεμβολής Kriging. Η δεύτερη συνιστώσα της περιφερειοποιημένης μεταβλητής είναι η υπολειπόμενη συνιστώσα,  $v$ , που προσδιορίζεται αφαιρώντας τη συνιστώσα τάσης από την τιμή της περιφερειοποιημένης μεταβλητής.<sup>[42]</sup>

Σύμφωνα με τη μέθοδο Kriging η περιφερειοποιημένη μεταβλητή  $z$  συνδέεται με τη υπολειπόμενη μεταβλητή και τη συνιστώσα τάσης από τη σχέση

$$z = \mu + v$$

όπου η υπολειπόμενη μεταβλητή μπορεί να υπολογιστεί από το γραμμικό συνδυασμό των πλησιέστερων σημείων του δείγματος των πραγματικών μετρήσεων, σύμφωνα με τη σχέση<sup>[43]</sup>

$$v' = \sum_{i=1}^n w_i v(x_i, y_i)$$

Όπου  $v'$  είναι η εκτιμώμενη τιμή της υπολειπόμενης μεταβλητής σε ένα σημείο χωρίς μετρήσεις,  $w_i$  τα κατάλληλα βάρη και  $v$  οι πλησιέστερες  $n$  τιμές της υπολειπόμενης μεταβλητής που θέλουμε να υπολογίσουμε.

### Σύνηθες Kriging (Ordinary Kriging)

Μια από τις πιο γνωστές μεθόδους χωρικής παρεμβολής είναι το Σύνηθες Kriging (Ordinary Kriging). Σύμφωνα με αυτή η συνιστώσα τάσης είναι σταθερή σε όλη την περιοχή μελέτης. Το μοντέλο υπολογίζει τα βάρη  $w_i$  ώστε να ελαχιστοποιείται η διακύμανση της πρόβλεψης και συγκεκριμένα της ποσότητας  $L$

$$L = E \left[ (v(\mathbf{r}) - v'(\mathbf{r}))^2 \right] = E \left[ \left( v(\mathbf{r}) - \sum_{i=1}^n w_i v(\mathbf{r}) \right)^2 \right]$$

Όπου  $\mathbf{r}$  η θέση<sup>[43]</sup>



Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί διαφορετικά ως συνάρτηση του πίνακα C της συνδιασποράς αναμεσά στις θέσεις των σημείων του δείγματος.

$$L = C_0 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j C_{ij} - 2 \sum_i^j w_i C_i - 2\lambda \left( \sum_{i=1}^n w_i - 1 \right)$$

όπου λ είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrange. Ελαχιστοποιώντας τη παραπάνω σχέση προκύπτει ένα γραμμικό σύστημα n+1 εξισώσεων, από το οποίο υπολογίζονται οι κατάλληλοι συντελεστές βαρύτητας.

Ο πίνακας C υπολογίζεται από μια πολύ σημαντική ποσότητα της Γεωστατιστικής που ονομάζεται βαριόγραμμα (variogram) και είναι το βασικό διαγνωστικό εργαλείο για τον χωρικό χαρακτηρισμό μίας περιφερειοποιημένης μεταβλητής. Τα βαριογράμματα παρέχουν μια μαθηματική περιγραφή της σχέσης ανάμεσα στη διακύμανση των τιμών που μετρήθηκαν στα ζευγάρια του δείγματος και στην απόσταση που τα χωρίζει και εκφράζεται ως η γραφική παράσταση της ημι-διακύμανσης (ημιβαριόγραμμα)  $\gamma(h)$ <sup>[45]</sup> σύμφωνα με τη κάτωθι σχέση

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i,j=1}^n (z_i - z_j)^2$$

Στη πιο πάνω σχέση αποτυπώνεται η βασική παραδοχή πως το ημιβαριόγραμμα εξαρτάται μόνο από τη σχετική θέση h των σημείων και όχι από τη θέση τους **r**. Το ημιβαριόγραμμα ουσιαστικά αποτυπώνει γραφικά την έντονη συσχέτιση που έχουν κοντινά σημεία μεταξύ τους. Τα βασικά στοιχεία της γραφικής αναπαράστασης ενός ημιβαριόγραμματος είναι τιμή κατωφλίου, σ, (sill), που αποτελεί τη τιμή του ορίου καθώς το h τείνει στο άπειρο. Το σφάλμα περιφερειοποιημένης μεταβλητής, α, (nugget) που πρακτικά είναι η τιμή του ημιβαριόγραμματος για h=0 και αποτυπώνει το “θόρυβο” του δείγματος. Τέλος, η ζώνη επιρροής, l, που είναι η περιοχή κατά την οποία το βαριόγραμμα παρουσιάζει μια σαφή ανοδική τάση<sup>[44]</sup> και καθορίζει τη περιοχή επίδρασης των σημείων.

Υπάρχουν διάφορα συναρτησιακά μοντέλα ημιβαριόγραμματος, ανάλογα με τη μορφή της χωρικής διακύμανσης του δείγματος. Τα πιο συνηθισμένα μοντέλα είναι το Σφαιρικό (Spherical), το Εκθετικό (Exponential), το Γκαουσιανό (Gauss) και το Γραμμικό (Linear)<sup>[98]</sup>. Το Σφαιρικό μοντέλο χρησιμοποιείται όταν το σφάλμα περιφερειοποιημένης μεταβλητής είναι σημαντικό και το όριο τις τιμές κατωφλίου εμφανίζεται ξεκάθαρα στο ημιβαριόγραμμα<sup>[98]</sup>. Η σχέση που περιγράφει το μοντέλο είναι

$$\gamma(h) = \begin{cases} a + (\sigma - \alpha) \left( \frac{3h}{2l} - \frac{h^3}{2l^3} \right), & \text{εάν } 0 < h < l \\ 0, & \text{εάν } h = 0 \\ \sigma, & \text{εάν } h \geq l \end{cases}$$

Το Εκθετικό μοντέλο εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που το ημιβαριόγραμμα εμφανίζει σταδιακή αύξηση έως τη μέγιστη τιμή της ζώνης επιρροής, ενώ το σφάλμα περιφερειοποιημένης μεταβλητής και η τιμή κατωφλίου είναι σαφώς καθορισμένες<sup>[98]</sup>. Το Εκθετικό μοντέλο δίνεται από τη σχέση

$$\gamma(h) = \begin{cases} \alpha + (\sigma - \alpha) \left( 1 - e^{-\frac{3h}{l}} \right), & \text{εάν } h > 0 \\ 0, & \text{εάν } h = 0 \end{cases}$$

Το Γκαουσιανό μοντέλο εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου η διακύμανση είναι ομαλή και το σφάλμα περιφερειοποιημένης μεταβλητής είναι μικρό σε σχέση με τη τιμή καταωφλίου<sup>[98]</sup>. Το μοντέλο του Γκάους δίνεται από τη σχέση

$$\gamma(h) = \begin{cases} \alpha + (\sigma - \alpha) \left(1 - e^{-\frac{3h^2}{l^2}}\right), & \text{εάν } h > 0 \\ 0, & \text{εάν } h = 0 \end{cases}$$

Τέλος το γραμμικό μοντέλο εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που το σφάλμα περιφερειοποιημένης μεταβλητής είναι μηδενικό τότε το ημιβαριόγραμμα προσεγγίζεται με τη γραμμική σχέση

$$\gamma(h) = \sigma - \nu h$$

Όπου  $\nu$  είναι η κλίση της ευθείας<sup>[98]</sup>.

### 4.3 Χωρική πολυκριτηριακή ανάλυση με χαρτογραφική υπέρθεση

Είναι πολύ συχνό στη διαχείριση και εκτίμηση κινδύνου να χρειάζεται η λήψη αποφάσεων με βάση πολλαπλά χωρικά δεδομένα που είναι δύσκολο να συνδυαστούν άμεσα. Η πολυκριτηριακή ανάλυση αποφάσεων (Multi Criteria Decision Analysis ή MCDA) ως κύριο στόχο τη διαμόρφωση τυποποιημένων διαδικασιών οι οποίες βοηθούν τους λήπτες αποφάσεων στην επίλυση διαφόρων προβλημάτων<sup>[36]</sup>. Ουσιαστικά είναι μια μέθοδος που συνδυάζει τα διάφορα κριτήρια ώστε να αποτυπωθεί ένας τελικός στόχος που βοηθά στη λήψη αποφάσεων. Τα Σ.Γ.Π. προσφέρουν μια πλατφόρμα στην οποία διάφορα χωρικά δεδομένα (κριτήρια) που σχετίζονται άμεσα με το πρόβλημα και έχουν σαφή χωρικό προσδιορισμό μπορούν ενταχθούν σε ένα μοντέλο πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Στη παρούσα διπλωματική θα εφαρμοστεί η μέθοδος ιεραρχικής ανάλυσης (Analytic Hierarchy Process ή AHP) που αποτελεί μια πολύ συχνή μέθοδο συνδυασμού χωρικών δεδομένων για τη λήψη αποφάσεων<sup>[61]</sup>. Τα βασικά στάδια της MCDA είναι αρχικά ο προσδιορισμός των κριτηρίων και των περιορισμών, στη συνέχεια η ανατίμηση των κριτηρίων σε ένα ενιαίο εύρος τιμών που αποτυπώνει τη σχετική βαρύτητα ανάμεσα στις τιμές. Πολύ βασικό στάδιο είναι ο προσδιορισμός των συντελεστών βάρους, δηλαδή πόσο κάθε κριτήριο επηρεάζει τη τελική απόφαση. Με αυτό το τρόπο το πρόβλημα λαμβάνει μια ιεραρχική δόμηση ανάλογα με τη σημαντικότητα του κάθε κριτηρίου στη τελική λήψη απόφασης. Τέλος, τα κριτήρια συνδυάζονται για να αποτυπωθεί η τελική απόφαση και γίνεται έλεγχος της εγκυρότητας του μοντέλου<sup>[36]</sup>. Το μοντέλο υποθέτει ότι η τελική απόφαση είναι ένας γραμμικός συνδυασμός  $n$  κριτηρίων σύμφωνα με τη σχέση

$$A = \sum_{i=1}^n w_i K_i$$

Όπου  $A$  είναι η τελική απόφαση,  $K$  τα κριτήρια και  $w$  οι συντελεστές βαρύτητας.

Οι συντελεστές βαρύτητας υπολογίζονται από πίνακες σύγκρισης (ανάλυση ιεραρχίας, AHP) των κριτηρίων, στους οποίους τα κριτήρια συγκρίνονται κατά ζεύγη. Συγκεκριμένα, γίνεται η εκτίμηση ενός πίνακα  $\Pi$  που αποτυπώνει τη σχετική βαρύτητα ανάμεσα στα κριτήρια και ο υπολογισμός των συντελεστών βάρους ανάγεται σε ένα πρόβλημα ιδιοτιμών και ιδιοανυσμάτων,  $\Pi\psi = \lambda\psi$ , όπου  $\psi$  είναι το διάνυσμα των συντελεστών βάρους,  $\psi = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ .



Στη θεωρητική περίπτωση που οι συντελεστές βαρύτητας είναι γνωστοί τότε τα στοιχεία του πίνακα δίνονται από τη σχέση

$$\Pi_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$$

Αυτό όμως συνεπάγεται ότι από το διάνυσμα  $\psi$  μπορεί να υπολογιστεί ο πίνακας  $\Pi$ , δηλαδή ο πίνακας είναι  $1^{\text{ης}}$  τάξης. Η τάξη ενός τυχαίου πίνακα  $A$  (συμβολίζεται με  $\text{rank}A$ ) είναι ένας φυσικός αριθμός  $N$  εάν τουλάχιστον μία υποορίζουσα τάξης  $N$  που σχηματίζεται από τον  $A$  είναι διάφορη από το μηδέν και όλες οι άλλες οι υποορίζουσες τάξης  $N+1$ , αν υπάρχουν, είναι ίσες με μηδέν. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι ο πίνακας  $\Pi$  έχει μόνο μια ιδιοτιμή ( $\lambda$ ), με τιμή ίση με το ίχνος του  $\Pi$  ( $\text{tr}\Pi$ ). Με βάση όμως τη πιο πάνω σχέση για το ίχνος του  $\Pi$  ισχύει ότι

$$\lambda = \text{tr}(\Pi) = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{w_i} = n, \quad i=1,2,3,\dots,n$$

Στη πραγματικότητα όμως τα βάρη και η ιδιοτιμή δεν είναι ορισμένα με σαφήνεια, καθώς ο πίνακας συγκρίσεων περιέχει ανακολουθίες. Από τη μεθοδολογία της ΑΗΡ γίνεται μια εκτίμηση των συντελεστών βάρους και στη συνέχεια εκτιμάται η συνέπεια των υποθέσεων. Η εκτίμηση των συντελεστών βάρους γίνεται από το πρόβλημα των μέγιστων ιδιοτιμών του πίνακα  $\Pi$ ,  $\Pi\hat{\psi} = \lambda_{\max}\hat{\psi}$ . Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι να εκτιμηθεί η ιδιοτιμή ( $\lambda_{\max}$ ) και τα βάρη, όπως η επίλυση το χαρακτηριστικού πολυωνύμου και η μέθοδος της κανονικοποίησης του πίνακα  $\Pi$ .

Αναπόσπαστο κομμάτι της ΑΗΡ είναι η επαλήθευση της συνέπειας που έχει η κατανομή των συντελεστών βάρους. Με βάση τα αποτελέσματα των ιδιοτιμών υπολογίζεται ο δείκτης συνέπειας (Consistency Index, CI) και η αναλογία συνέπειας (Consistency Ratio, CR) από τις σχέσεις<sup>[62]</sup>

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Όπου ο δείκτης RI είναι η μέση τιμή των δεικτών συνέπειας και δίνεται από τη βιβλιογραφία. Ένας πρακτικός κανόνας είναι ότι μια τιμή του  $CR < 0,1$  είναι αποδεκτή.



# 5. Παράγοντες Κινδύνου

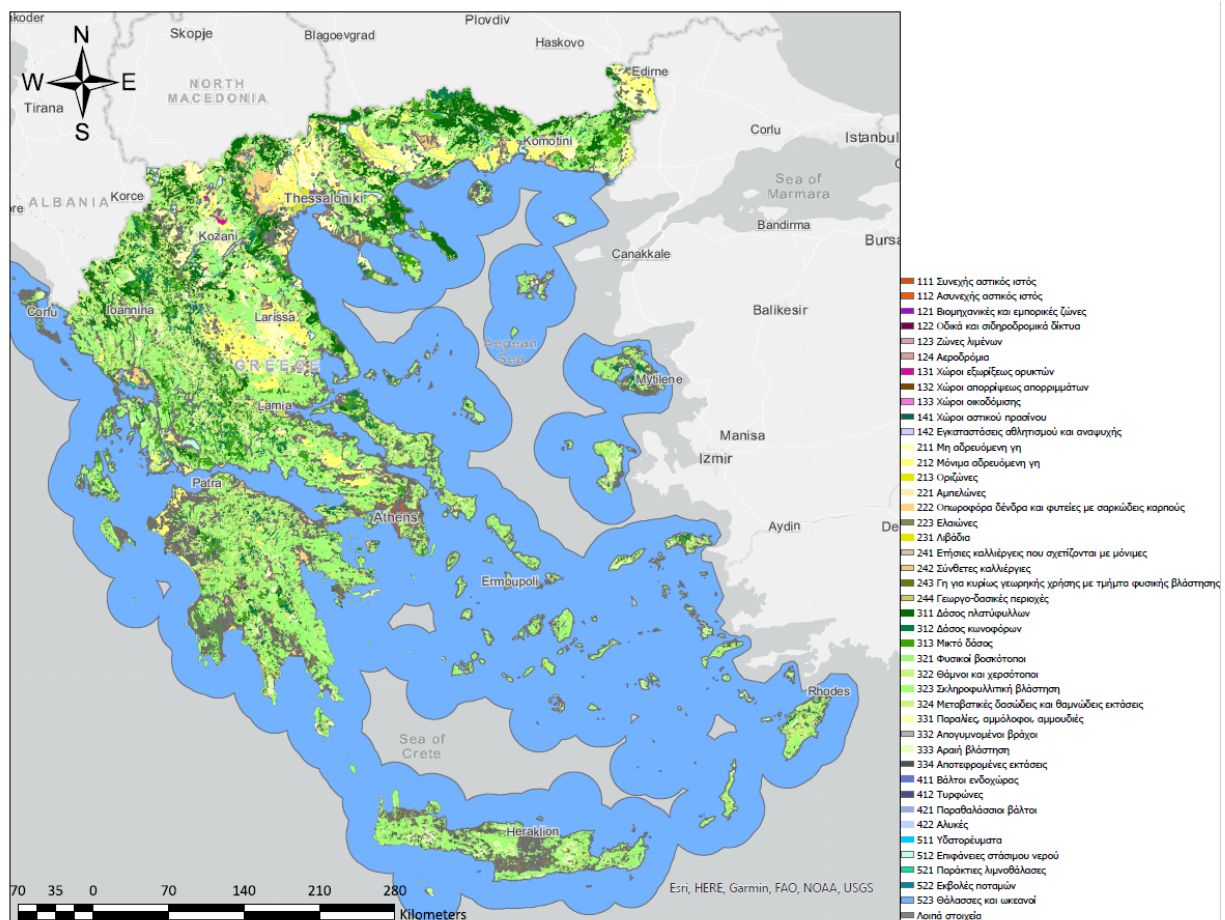


## 5 Απεικόνιση παραγόντων κινδύνου πυρκαγιάς σε Σ.Γ.Π.

### 5.1 Απεικόνιση της καύσιμης ύλης σε Σ.Γ.Π.

#### 5.1.1 Ψηφιακός χάρτης χρήσης γης Corine (Corine Land Use Land Cover)

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα η καύσιμη ύλη αποτελεί το υλικό στο οποίο γίνεται η ανάφλεξη και η ανάπτυξη μιας πυρκαγιάς και συμπεριλαμβάνει όλα τα είδη φυτών και των υπολειμμάτων τους, που υπάρχουν σε μια περιοχή. Η πιο γνώστη αποτύπωση βλάστησης σε Σ.Γ.Π. είναι ο ψηφιακός χάρτης χρήσης γης Corine (Corine Land Use Land Cover) που παρουσιάζεται στην Εικόνα 7. Στο χάρτη εμφανίζονται οι διαφορετικές χρήσεις γης για το έτος 2018 με χρωματική διαβάθμιση. Για τη μελέτη και την αναγνώρισή της βλάστησης, σημαντικά είναι τα πολύγωνα του χάρτη που ξεκινούν με κωδικό 3 και παρουσιάζονται με διαφορετικές αποχρώσεις του πράσινου. Ανάλογα με τη κατηγορία που ανήκει κάθε περιοχή μπορεί να αποδοθεί το είδος της καύσιμης ύλης, σύμφωνα με τις κατηγορίες τις υποενότητας 3.1. Για παράδειγμα σε δασικές περιοχές αναμένεται να υπάρχουν κυρίως υπολείμματα κορμών, ενώ σε βοσκοτόπια κυρίως γρασίδι και θάμνοι. Ο χάρτης χρήσης γης από το Corine έχει αρκετές διαβαθμίσεις, όμως το βασικό μειονέκτημα του είναι πως δεν συμπεριλαμβάνει τις αλλαγές στη κάλυψη της γης μετά το 2018, γεγονός που μπορεί να επιφέρει σημαντικές μεταβολές στα αποτελέσματα ανάλυσης κινδύνου πυρκαγιάς σε μια περιοχή.



Εικόνα 7: Ψηφιακός χάρτης χρήσης γης Corine 2018 για την Ελλάδα.



### 5.1.2 Φασματικοί συνδυασμοί δορυφορικών εικόνων (απεικονίσεις NDVI, Color Infrared)

Ένας άλλος γρήγορος και αξιόπιστος τρόπος αναγνώρισης της βλάστησης είναι ο Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), ο οποίος αξιοποιεί την διαφορά της φασματικής απόκρισης της βλάστησης ανάμεσα στο ορατό κόκκινο (Red) και το εγγύς υπέρυθρο (NIR) (Συμπλήρωμα 2). Ο δείκτης NDVI υπολογίζεται από τη διάφορα της ανακλώμενης ακτινοβολίας ανάμεσα στο ορατό κόκκινο και το εγγύς υπέρυθρο προς την συνολική ανακλώμενη ακτινοβολία σε αυτά τα μήκη κύματος, σύμφωνα με τη σχέση

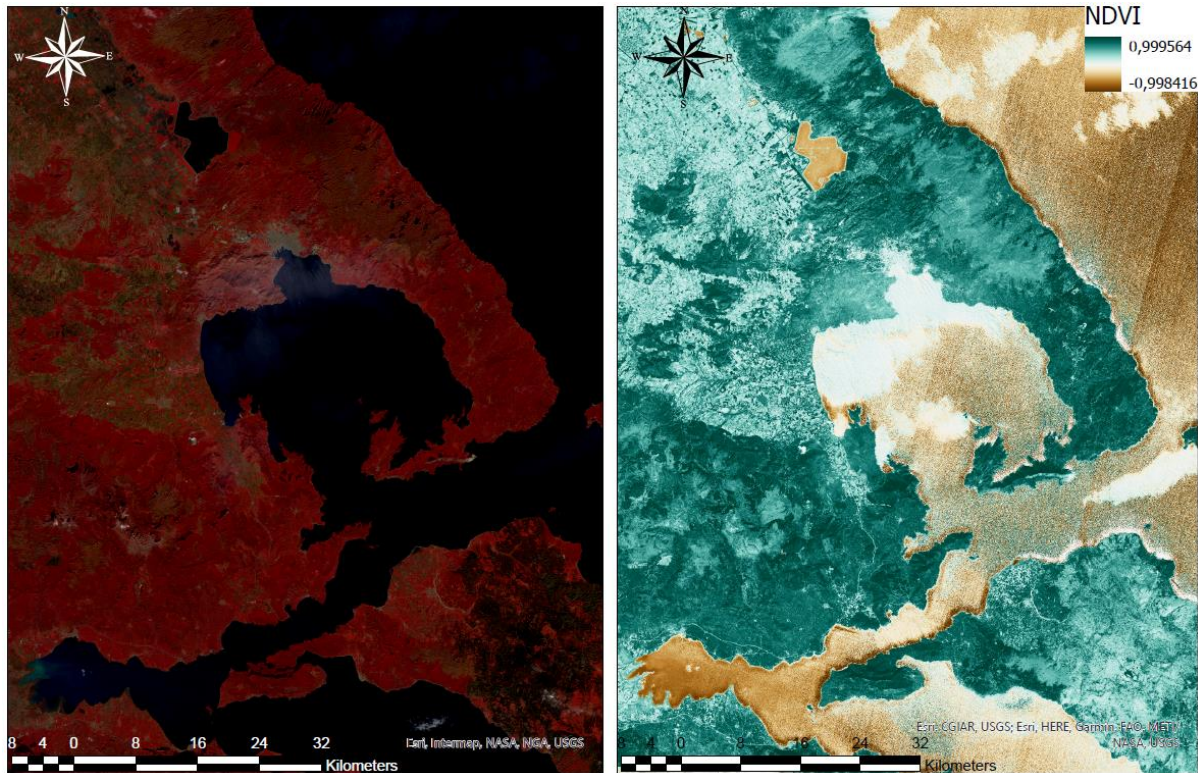
$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \quad (4)$$

Ο δείκτης παίρνει τιμές από -1 έως 1. Τιμές κοντά στο -1 υποδηλώνουν παρουσία νερού, τιμές κοντά στο μηδέν (-0.1 έως 0.1) υποδηλώνουν παρουσία ακάλυπτης γης και τέλος τιμές κοντά στο 1 υποδηλώνουν παρουσία πυκνής βλάστησης<sup>[23]</sup>.

Για τον υπολογισμό του δείκτη βλάστησης NDVI συλλέχθηκαν πολυφασματικές εικόνες του δορυφόρου Sentinel-2 για τη περιοχή που περιλαμβάνει τη Περιφερειακή Ενότητα Μαγνησίας, τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Φθιώτιδας και το βόρειο τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Ευβοίας από τη βάση ανοικτών δεδομένων του Copernicus. Οι πολυφασματικές εικόνες καταγράφηκαν από τον φασματογράφο MSI (Συμπλήρωμα 2) στις 9 Δεκεμβρίου 2021. Οι εικόνες επιλέχθηκαν ώστε η νεφοκάλυψη να είναι ελάχιστη για να είναι ορατές οι περιοχές που απεικονίζονται. Τα δεδομένα που χρειάζονται για τον υπολογισμό του δείκτη NDVI σύμφωνα με τη σχέση (4) αντιστοιχούν στα φασματικά κανάλια του ερυθρού B4 (κεντρικό μ.κ. 665nm) και του εγγύς υπέρυθρου B8 (κεντρικό μ.κ. 833nm). Τα δεδομένα εισήχθησαν στο λογισμικό σε μορφή δεδομένων ψηφιδωτής μορφής χωρικής ανάλυσης 10x10m. Η εφαρμογή της σχέσης (4) στα εικονοστοιχεία της περιοχής μελέτης έγινε με το εργαλείο *Raster Calculator*. Το συγκεκριμένο εργαλείο επιτρέπει την εφαρμογή τοπικών λειτουργιών (local) και συγκεκριμένα λογικών και μαθηματικών πράξεων για κάθε εικονοστοιχείο, ανάλογα με τις χωρικές συντεταγμένες τους<sup>[36]</sup>.

Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται η αποτύπωση του δείκτη NDVI για τη περιοχή που περιλαμβάνει τη Περιφερειακή Ενότητα Μαγνησίας, τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Φθιώτιδας και το βόρειο τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Ευβοίας. Ο υπολογισμός και η αποτύπωση της βλάστησης έγινε με δύο τρόπους με τη βοήθεια λογισμικού Σ.Γ.Π., όπως φαίνεται στις δύο εικόνες δεξιά και αριστερά που περιλαμβάνονται στη Εικόνα 8. Αριστερά έχει αποτυπωθεί η βλάστηση με κόκκινο χρωματισμό (Color Infrared) από το συνδυασμό των φασματικών καναλιών του μπλε B2 (κεντρικό μ.κ. 492,1nm), του ερυθρού B4 (κεντρικό μ.κ. 665nm) και του εγγύς υπέρυθρου B8 (κεντρικό μ.κ. 833nm). Στην δεξιά εικόνα παρουσιάζεται ο υπολογισμός του δείκτη NDVI σύμφωνα με τη σχέση (4) όπου τα φάσματα Red και NIR έχουν αντικατασταθεί από τα φασματικά κανάλια B4 και B8 αντίστοιχα. Η περιοχή επιλέχθηκε καθώς περιλαμβάνει τμήμα της καμένης έκτασης στη περιοχή της βόρειας Εύβοιας που προκλήθηκε από τη καταστροφική πυρκαγιά του Αυγούστου 2021.

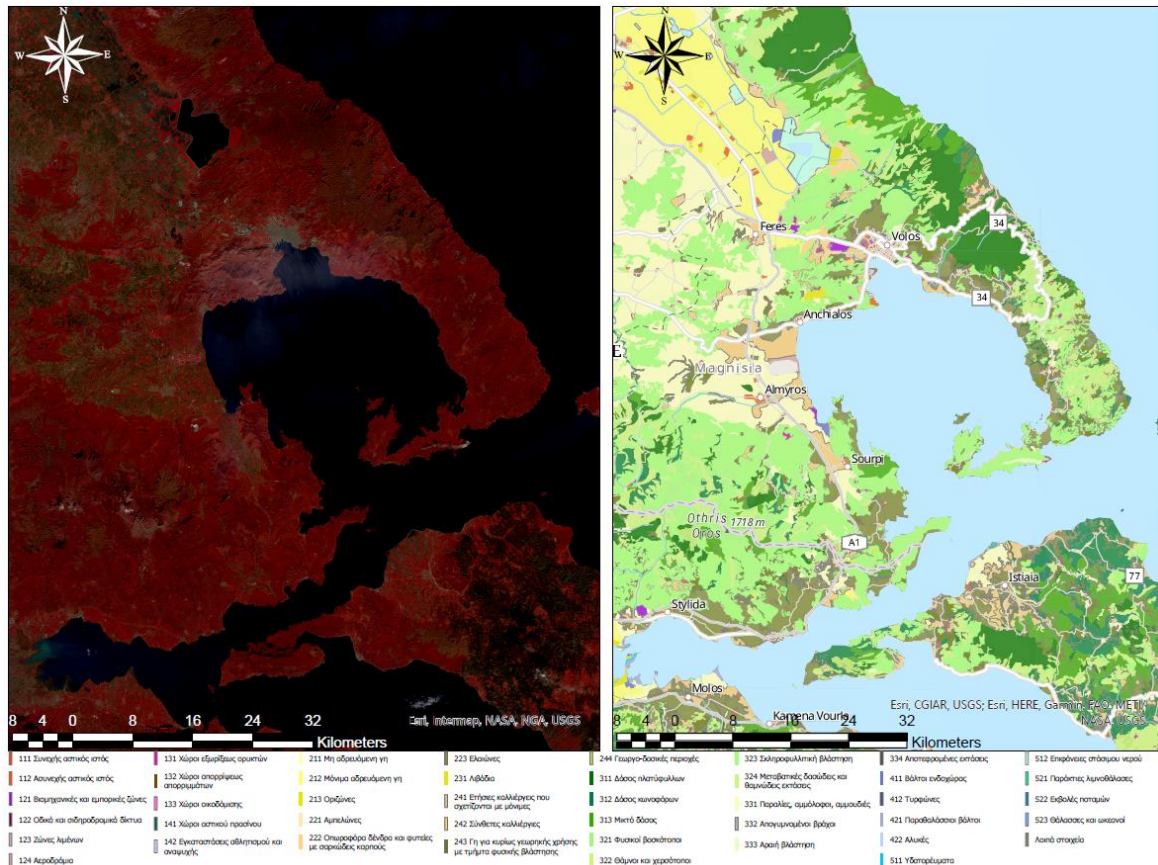




*Εικόνα 8:* Αριστερά έχει αποτυπωθεί η βλάστηση με κόκκινο χρωματισμό (Color Infrared) από το συνδυασμό των φασματικών καναλιών του μπλε B2 (κεντρικό μ.κ. 492,1nm), του ερυθρού B4 (κεντρικό μ.κ. 665nm) και του εγγύς υπέρυθρου B8 (κεντρικό μ.κ. 833nm). Στην δεξιά εικόνα παρουσιάζεται η αποτύπωση του δείκτη NDVI σύμφωνα με τη σχέση (4).

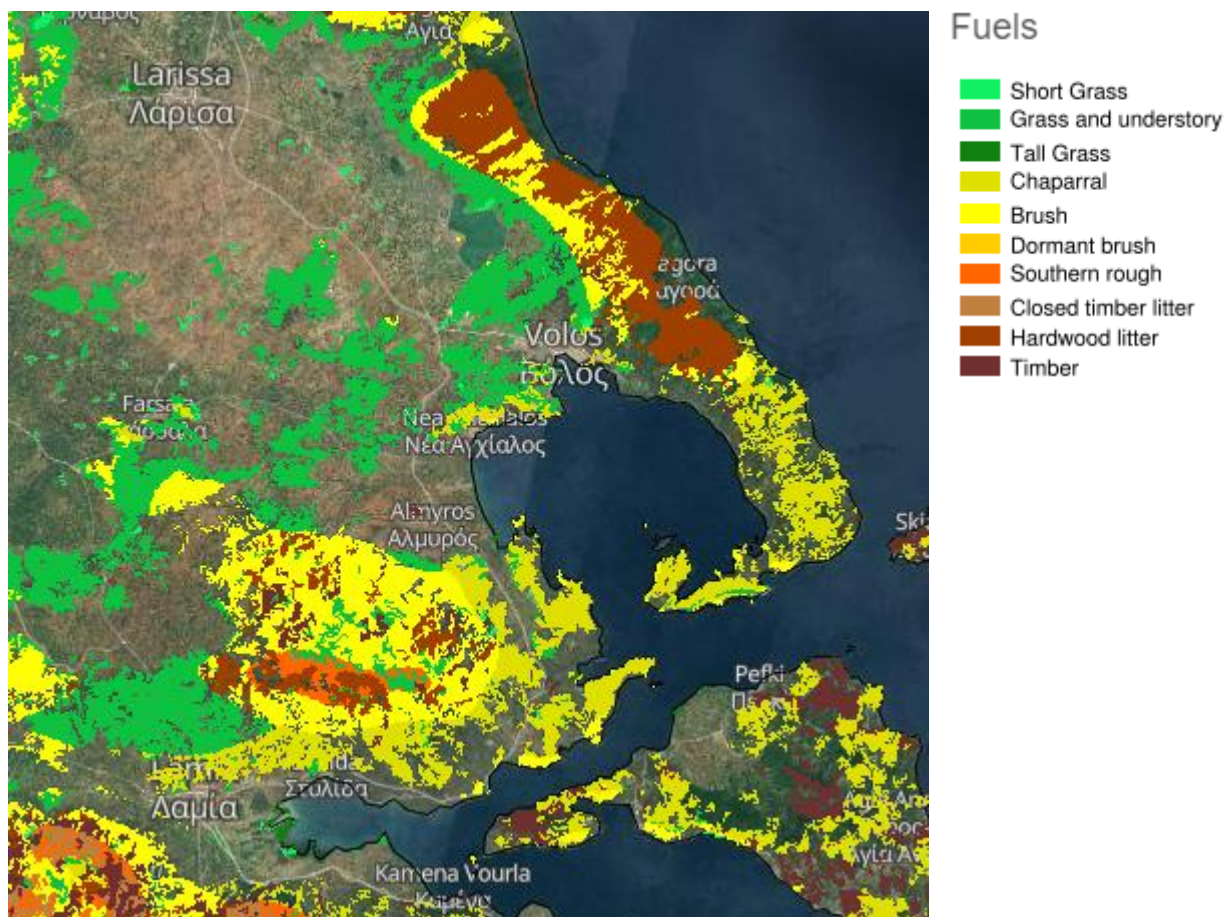
Στην Εικόνα 8 φαίνονται καθαρά οι δασικές εκτάσεις της περιοχής τόσο με κόκκινο χρώμα (αριστερά) όσο και με πράσινο (δεξιά). Συγκεκριμένα, διακρίνονται με έντονο πράσινο χρωματισμό οι δασικές εκτάσεις περιμετρικά του όρους Όθρυς, που βρίσκεται βόρεια του Μαλιακού κόλπου, ενώ στο κέντρο της περιοχής διακρίνεται η κορυφή του βουνού, λόγω της απουσίας βλάστησης. Βορειοανατολικά του Βόλου φαίνεται η δασική περιοχή του Πηλίου. Στη περιοχή του Παγασητικού κόλπου και κυρίως πάνω από τη πόλη του Βόλου υπάρχει ασθενής νεφοκάλυψη που αλλοιώνει τα αποτελέσματα της δεξιάς εικόνας δίνοντας στο νερό λευκό χρώμα, έτσι που η πόλη του Βόλου δείχνει να έχει το ίδιο χρώμα με το νερό του κόλπου. Τέλος και στις δυο εικόνες είναι εμφανείς με άσπρο χρωματισμό οι καμένες εκτάσεις στη περιοχή της βόρειας Εύβοιας.

Με βάση τα αποτελέσματα της απεικόνισης της βλάστησης από τον NDVI στην Εικόνα 9 είναι εμφανείς οι διαφορές στη κάλυψη γης συγκριτικά με τον ψηφιακό χάρτη του Corine 2018. Οι διαφορές είναι αποτέλεσμα της πυρκαγιάς του Αυγούστου 2021 στη βόρεια Εύβοια που τροποποίησε σημαντικά τη κάλυψη της γης στη περιοχή. Αναμενόμενα η μεταβολή διαφοροποιεί σημαντικά και τη παρουσία καύσιμης ύλης. Συγκεκριμένα, στα αριστερά της Εικόνα 9 παρουσιάζεται η βλάστηση με κόκκινο χρωματισμό (Color Infrared), ενώ στα δεξιά παρουσιάζεται η κάλυψη γης σύμφωνα με το Corine 2018. Από τη μία ο χάρτης του Corine έχει πολύ περισσότερες κατηγορίες που αποτυπώνουν διαφορές στη κάλυψη γης και τη καύσιμη ύλη, από την άλλη ο χάρτης του Corine δεν εμφανίζει σημαντικές διαφορές στη κάλυψη γης που έλαβαν χώρα μετά το 2018, όπως η πυρκαγιά στη βόρεια Εύβοια.



**Εικόνα 9:** Διαφορές ανάμεσα στην αποτύπωση της βλάβης με ανάλυση πρόσφατων δορυφορικών εικόνων (9 Δεκεμβρίου 2021) και του ψηφιακού χάρτη χρήσης γης Corine 2018. Στην αριστερή εικόνα παρουσιάζεται η βλάβη με κόκκινο χρωματισμό (Color Infrared), δεξιά παρουσιάζεται η κάλυψη γης σύμφωνα με το χάρτη Corine 2018.

Η αποτύπωση της καύσιμης ύλης είναι διαθέσιμη άμεσα με μορφή ψηφιακού χάρτη και από την ιστοσελίδα του European Forest Fire Information System (EFFIS). Στο χάρτη αποτυπώνονται οι περιοχές ανάλογα με τη καύσιμη ύλη για όλη την Ευρώπη σε 10 κατηγορίες. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται ο χάρτης καύσιμης ύλης σύμφωνα με τον EFFIS για τη περιοχή που περιλαμβάνει τη Περιφερειακή Ενότητα Μαγνησίας, τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Φθιώτιδας και το βόρειο τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Ευβοίας, που μελετήθηκε προηγουμένως. Η περιοχή επιλέχθηκε τόσο για λόγους σύγκρισης με τις Εικόνες 8 και 9.



Εικόνα 10: Χάρτης καύσιμης ύλης 10 κατηγοριών σύμφωνα με τον EFFIS [Πηγή: European Forest Fire Information System (EFFIS)].



## **Συμπλήρωμα 2: Πολυφασματικά δεδομένα των δορυφόρων Sentinel 2 και LANDSAT**

Το δορυφορικό πρόγραμμα Copernicus δημιουργήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission) σε συνεργασία με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) και αποτελεί την συνέχεια του προγράμματος της Παγκόσμιας Παρακολούθησης του Περιβάλλοντος και της Ασφάλειας (Global Monitoring for Environment and Security ή GMES). Στόχος του προγράμματος είναι η παρακολούθηση της επιφάνειας και της ατμόσφαιρας της γης στα πλαίσια της προσπάθειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την διαχείριση της κλιματικής κρίσης. Για τις ανάγκες του προγράμματος ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος αναπτύσσει τους δορυφόρους Sentinel που είναι εφοδιασμένοι με σύγχρονα όργανα παρατήρησης, με τα οποία παρέχουν εκτενείς και προσβάσιμες πληροφορίες για την επιφάνεια και την ατμόσφαιρα της Γης.

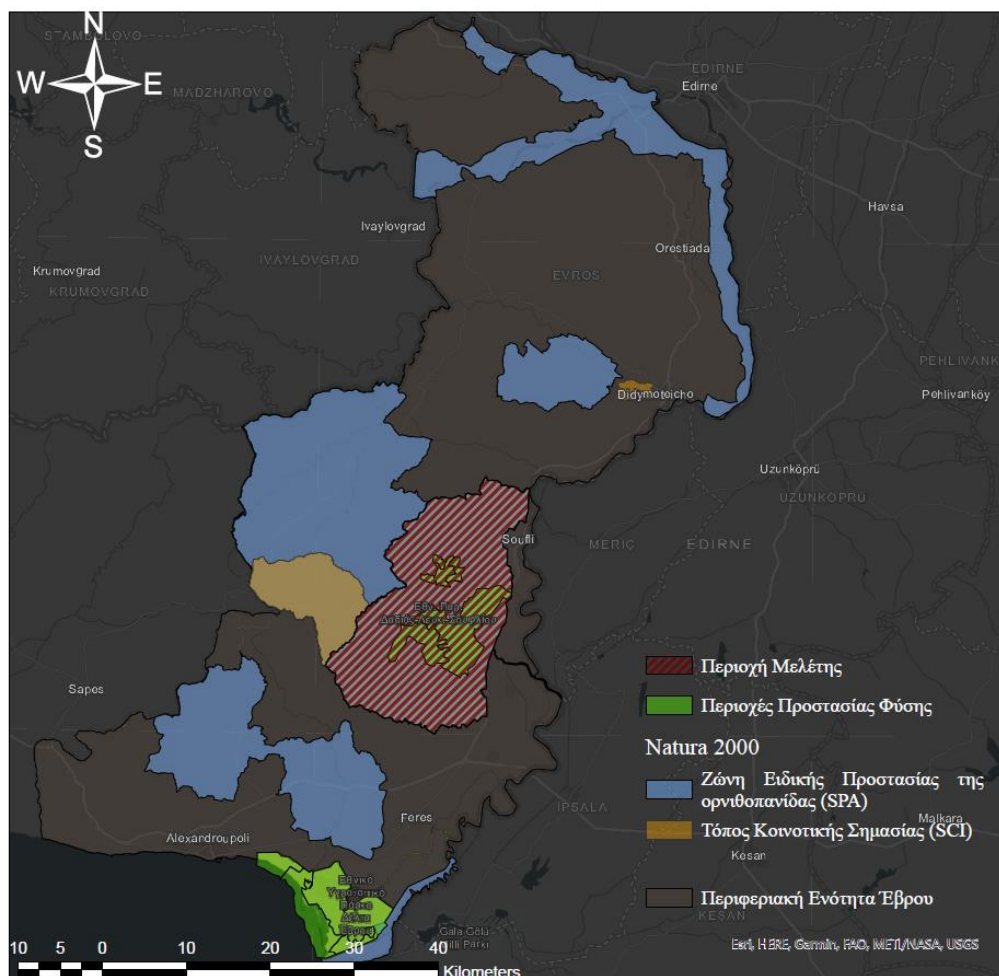
Ο αστερισμός των δορυφόρων **Sentinel-2** αποτελείται από δύο όμοιους δορυφόρους τον Sentinel-2A που τέθηκε σε τροχιά το 2015 και τον Sentinel-2B που τέθηκε σε τροχιά το 2017. Οι δυο δορυφόροι έχουν διαφορά φάσης  $180^\circ$ , βρίσκονται σε ηλιοσύνχρονη, πολική τροχιά σε ύψος 786km και συνδυαστικά καλύπτουν την επιφάνεια της γης σε 5 ημέρες. Διαθέτουν υψηλής ανάλυσης (10m, 20m και 60m) παθητικό πολυφασματογράφο (Multi Spectral Instrument-MSI) που είναι ικανός να καταγράφει πολυφασματικά δεδομένα σε 13 φασματικές ζώνες, στο ορατό (0.4-0.7 $\mu\text{m}$ ), εγγύς υπέρυθρο (0.7-1.4 $\mu\text{m}$ ) και υπέρυθρο μικρού μήκους κύματος (1.4-3 $\mu\text{m}$ ). Στόχος του προγράμματος Sentinel-2 είναι να παρέχει σημαντικά δεδομένα για την γεωργία, τη δασοκομία, την παρατήρηση παράκτιων περιοχών, την παρατήρηση των παγετώνων και την διαχείριση φυσικών κατασκαφών.

Το πρόγραμμα LANDSAT αποτελεί συνέχεια του προγράμματος ERTS της NASA που ξεκίνησε το 1967 με αρχικό στόχο την εκτόξευση δορυφόρων που θα διέθεταν όργανα τηλεπισκόπησης για καταγραφή πληροφοριών σχετικά με τις πλουτοπαραγωγικές πηγές της Γης. Μέχρι σήμερα έχουν τεθεί σε τροχιά οκτώ δορυφόροι, ενώ από αυτούς είναι λειτουργικοί οι δορυφόροι Landsat-7 και Landsat-8. Ο δορυφόρος **Landsat-7** τέθηκε σε σε πολική ηλιοσύνχρονη τροχιά το 1999 σε ύψος 705m με κλίση  $98^\circ$ . Το βασικό όργανο καταγραφής της ακτινοβολίας είναι ο θεματικός χαρτογράφος ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) που διαθέτει οκτώ πολυφασματικά κανάλια. Συγκεκριμένα, ο ETM+ διαθέτει το πολυχρωματικό κανάλι 8 με χωρική διακριτική ικανότητα 15m, το φασματικό κανάλι 6 που καταγράφει το θερμικό υπέρυθρο με διακριτική ικανότητα 60m και τα φασματικά κανάλια 1 έως 5 και 7 που καταγράφουν το οπτικό, εγγύς υπέρυθρο και μέσο υπέρυθρο με διακριτική ικανότητα 30m. Ο δορυφόρος **Landsat-8** τέθηκε σε τροχιά το 2013 σε ύψος 705m με κλίση  $98^\circ$ , παρόμοια με τον Landsat-7. Τα βασικά όργανα καταγραφής είναι ο Operational Land Imager (OLI) και ο Thermal Infrared Sensor (TIRS) που διαθέτουν συνολικά έντεκα φασματικά κανάλια. Ο OLI καταγράφει δεδομένα από εννέα φασματικά κανάλια καλύπτοντας παρόμοια περιοχή του φάσματος με τον ETS+ του Landsat-7 (ορατό, εγγύς υπέρυθρο και μέσο υπέρυθρο) με ίδια διακριτική ικανότητα. Ο TIRS καταγράφει δεδομένα από δύο φασματικά κανάλια στο θερμικό υπέρυθρο (10.3-12.5 $\mu\text{m}$ ) με διακριτική ικανότητα 100m.

### 5.1.3 Εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής εκμάθησης για τη δημιουργία ψηφιακού χάρτη κάλυψης γης

Τα Σ.Γ.Π. δίνουν τη δυνατότητα επεξεργασίας δεδομένων ψηφιδωτής μορφής, με αλγορίθμους μηχανικής εκμάθησης, για την κατηγοριοποίηση των αντικειμένων που απεικονίζονται σε πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες. Όπως προαναφέρθηκε ο χάρτης χρήσης γης Corine 2018 εμφανίζει μεγάλη ποικιλία κατηγοριών γης για το έτος 2018, αναμενόμενα όμως δεν μπορεί να συμπεριλάβει αλλαγές στη κάλυψη γης που έχουν συμβεί μετά το 2018. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της επικαιροποίησης των δεδομένων του Corine 2018, στη συνέχεια του κεφαλαίου θα κατασκευαστεί ψηφιακός χάρτης κάλυψης γης από δορυφορικά δεδομένα του δορυφόρου Sentinel-2, για τη περιοχή μελέτης του Έβρου. Ο Ν. Έβρου και ειδικότερα το Εθνικό Πάρκο του Δάσους της Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου θα αποτελέσει τη περιοχή εφαρμογής της ροής εργασιών.

Η περιοχή μελέτης ορίστηκε στα όρια της περιοχής Natura 2000 με κωδικό GR1110005 που περιλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα του Εθνικού Πάρκου του Δάσους της Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και τις Περιοχές Προστασίας της φύσης A1 και A2<sup>[51]</sup>. Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης συνολικής έκτασης 42500 ha μαζί με τις προστατευόμενες περιοχές που περιλαμβάνει.

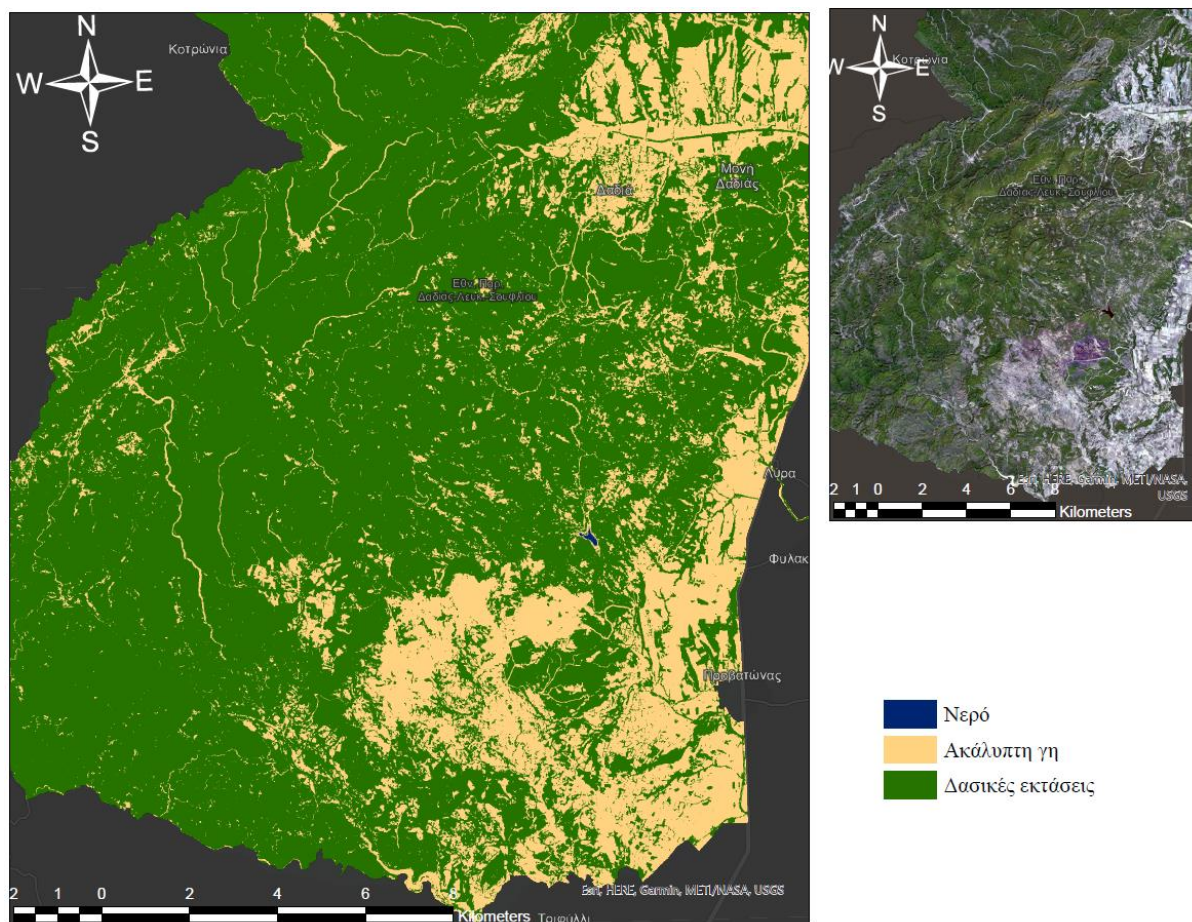


Εικόνα 11: Η περιοχή μελέτης συνολικής έκτασης 42.500 ha που περιλαμβάνει τη περιοχή Natura 2000 με κωδικό GR1110005 και οι περιοχές προστασίας της φύσης A1 και A2 του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.



Για να μελετηθεί η κάλυψη της γης της περιοχής αξιοποιήθηκαν δορυφορικές πολυφασματικές εικόνες από τον δορυφόρο Sentinel 2B. Η επιλογή των εικόνων έγινε με βασικό κριτήριο τη χαμηλή νεφοκάλυψη της περιοχής μελέτης (0% με 1%) και την ώρα λήψης (ημέρα). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η δορυφορική εικόνα έχει υποστεί ατμοσφαιρικές διορθώσεις για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της ατμόσφαιρας. Με βάση τα κριτήρια αυτά, η εικόνα στην οποία έγινε ανάλυση έχει αποτυπωθεί στις 27 Σεπτεμβρίου 2021 την ώρα 09:06. Από τις πολυφασματικές εικόνες στη μελέτη χρειάστηκαν τα φασματικά δεδομένα που αντιστοιχούν στα παράθυρα του ορατού φάσματος (B02, B03, B04) χωρικής ανάλυσης 10m, του εγγύς υπέρυθρου B04 χωρικής ανάλυσης 10m, και του υπέρυθρου μικρού μήκους κύματος (B11, B12) με χωρική ανάλυση 20m. Επειδή η εικόνα είχε μεγαλύτερη έκταση από τη περιοχή μελέτης αποκόπηκαν περιοχές με το κατάλληλο εργαλείο του λογισμικού Σ.Γ.Π.

Σε πρώτο στάδιο, πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου μηχανικής εκμάθησης, έχει μεγάλο ενδιαφέρον να διερευνηθούν περαιτέρω οι δυνατότητες του δείκτη βλάστησης NDVI για τη κατηγοριοποίηση της χρήσης γης καθώς δίνει τη δυνατότητα γρήγορης εκτίμησης της. Από τα φασματικά κανάλια B04 και B08 εφαρμόζοντας την σχέση (4) σε λογισμικό Σ.Γ.Π. αποτυπώθηκε η γενική κατηγοριοποίηση της κάλυψης γης σύμφωνα με τις ιδιότητες του δείκτη βλάστησης NDVI. Όπως έχει αναφερθεί ο δείκτης παίρνει τιμές από -1 έως 1. Οι τιμές κοντά 0 υποδηλώνουν απουσία βλάστησης, τιμές ανάμεσα στο 0.2 και στο 0.5 υποδηλώνουν παρουσία αραιής βλάστησης, οι τιμές μεγαλύτερες του 0.6 πυκνή βλάστηση και οι τιμές κοντά στο -1 παρουσία νερού<sup>[23]</sup>. Με βάση τη κλίμακα αυτή, στη Εικόνα 12 παρουσιάζεται μια πρώτη εκτίμηση της χρήσης γης με 3 κατηγορίες για το νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης, όπου εντοπίζονται οι σημαντικότερες δασικές εκτάσεις. Στη δεξιά εικόνα αποτυπώνεται η ίδια περιοχή στο ορατό φάσμα με το συνδυασμό των φασματικών καναλιών B02, B03 και B04 για λόγους άμεσης σύγκρισης. Από την σύγκριση του χάρτη κάλυψης γης με το ορατό φαίνεται πως ο δείκτης NDVI κάνει μια πολύ καλή γενική αποτύπωση της περιοχής που καλύπτει η βλάστηση, ενώ μπορεί να αναδείξει και τμήματα των δρόμων.



Εικόνα 12: Ψηφιακός χάρτης κάλυψης γης σύμφωνα με τον δείκτη NDVI, 3 κατηγοριών για το νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης. Στη δεξιά εικόνα αποτυπώνεται η ίδια περιοχή στο ορατό φάσμα.

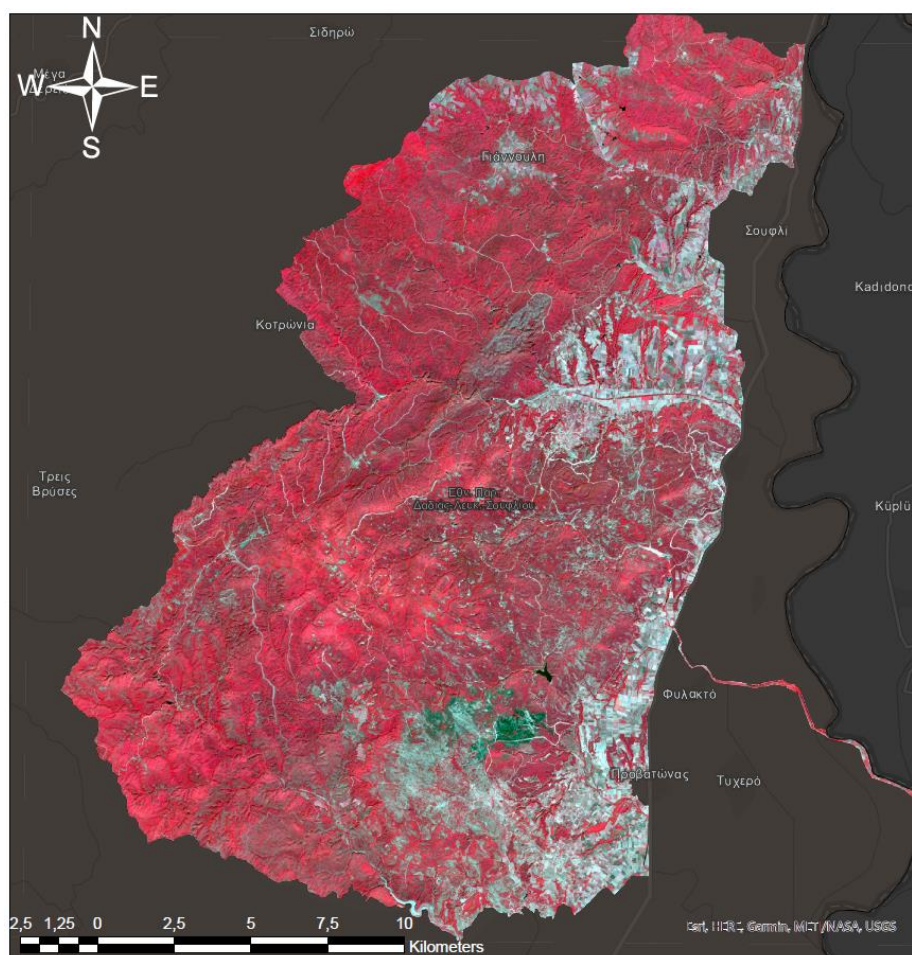
Τα Σ.Γ.Π. παρέχουν τη δυνατότητα να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα στο διαχωρισμό της κάλυψης γης, με την εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής εκμάθησης<sup>[52]</sup>. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες αλγορίθμων που μπορούν να αξιοποιηθούν σε περιβάλλον Σ.Γ.Π. για τη κατηγοριοποίηση της κάλυψης της γης. Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να διαχωριστούν σε κατηγορίες βάση του τρόπου με τον οποίο λαμβάνεται η μάθηση ή του τρόπου με τον οποίο δίνεται ανάδραση στην εκμάθηση στο σύστημα. Στη παρούσα διπλωματική θα γίνει εφαρμογή αλγορίθμων που καλύπτουν τις δύο πιο διαδεδομένες κατηγορίες μάθησης. Η πρώτη μεγάλη κατηγορία είναι οι αλγόριθμοι επιβλεπόμενης εκμάθησης (Supervised Machine Learning ή SML) που χαρακτηρίζουν δεδομένα βάση ενός συνόλου παραδειγμάτων, που “εκπαιδεύουν” τον αλγόριθμο. Πιο συγκεκριμένα για την κατηγοριοποίηση της κάλυψης γης θα εφαρμοστεί ο αλγόριθμος Support Vector Machine (SVM) σε πολυφασματική εικόνα του δορυφόρου Sentinel-2. Η κατηγορία των αλγορίθμων SVM έχει επανειλημμένα επιλεγεί για τη κατηγοριοποίηση δορυφορικών εικόνων με πολύ καλά αποτελέσματα<sup>[64-66]</sup>. Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία είναι οι αλγόριθμοι μη-επιβλεπόμενης εκμάθησης, οι οποίοι δε χρειάζονται σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης (Unsupervised Machine Learning ή UML). Οι αλγόριθμοι αυτοί κατηγοριοποιούν την εικόνα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της.

Η βασική εικόνα πάνω στην οποία έγινε η εφαρμογή των αλγορίθμων παράχθηκε από τον συνδυασμό των φασματικών καναλιών του πράσινου (B03), του κόκκινου (B04) και του εγγύς υπέρυθρου (B08) χωρικής ανάλυσης 10m (Color Infrared). Τα λογισμικά Σ.Γ.Π. δίνουν τη δυνατότητα συνδυασμού των φασματικών καναλιών για την δημιουργία εικόνων που περιέχουν



εξαιρετικά χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την κάλυψη της γης και τη σύστασή της. Με βάση κατάλληλους συνδυασμούς φασματικών καναλιών διαπιστώθηκε η κάλυψη της γης σε ορισμένα σημεία της εικόνας. Στη συνέχεια με βάση αυτές τις περιοχές δημιουργήθηκε η βάση δεδομένων δειγμάτων, πάνω στη οποία εκπαιδεύτηκε ο αλγόριθμος.

Η εικόνα από το συνδυασμό των φασματικών καναλιών (Color Infrared) του πράσινου (B03), του κόκκινου (B04) και του εγγύς υπέρυθρου (B08) αποτέλεσε τα δεδομένα εισόδου για τον αλγόριθμο SVM. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός μπορεί να αποτυπώσει με μεγάλη ακρίβεια τη βλάστηση αλλά και τις διαβαθμίσεις της<sup>[67]</sup> και έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν από πολλές μελέτες για τη κατηγοριοποίηση της κάλυψης της γης<sup>[64-66]</sup>. Επίσης, μπορεί να διαχωρίσει το νερό, την ακάλυπτη γη και διάφορες διαβαθμίσεις της βλάστησης, ανάλογα με τις ιδιότητες ανάκλασης και εκπομπής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από το φύλλωμα των δέντρων. Στην Εικόνα 13 εμφανίζεται ο συνδυασμός των φασμάτων του πράσινου (B03), του κόκκινου (B04) και του εγγύς υπέρυθρου (B08), όπου η πυκνή βλάστηση με πλατιά φύλλα αποτυπώνεται με πολύ έντονο ανοικτό ροζ χρώμα, οι πιο σκούρες αποχρώσεις του ροζ αναπαριστούν μικτές δασικές εκτάσεις και το ασθενές ροζ χρώμα υποδηλώνει θαμνώδεις εκτάσεις ή χαμηλή βλάστηση. Το έδαφος αποτυπώνεται με αποχρώσεις του κυανού και λευκού, ενώ το νερό με μαύρο χρώμα<sup>[53]</sup>.



*Εικόνα 13: Ο συνδυασμός color Infrared των φασμάτων του πράσινου (B03), του κόκκινου (B04) και του εγγύς υπέρυθρου (B08) πάνω στην οποία έγινε η εφαρμογή των αλγορίθμων μηχανικής.*



### 5.1.3.1 Εφαρμογή αλγόριθμου επιβλεπόμενης εκμάθησης Support Vector Machine

Η λειτουργία ενός αλγόριθμου επιβλεπόμενης μηχανικής εκμάθησης προϋποθέτει ένα σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης. Στη προκειμένη περίπτωση το ζητούμενο είναι ο διαχωρισμός της κάλυψης γης με βάση τον συνδυασμό των φασμάτων του πράσινου (B03), του κόκκινου (B04) και του εγγύς υπέρυθρου (B08). Από την Εικόνα 13 μπορούν να διαχωριστούν 3 κατηγορίες βλάστησης ανάλογα με την ένταση του κόκκινου χρώματος, επομένως επιλέχθηκαν συνολικά 6 κατηγορίες κάλυψης γης για να κατηγοριοποιηθεί ο αλγόριθμος:

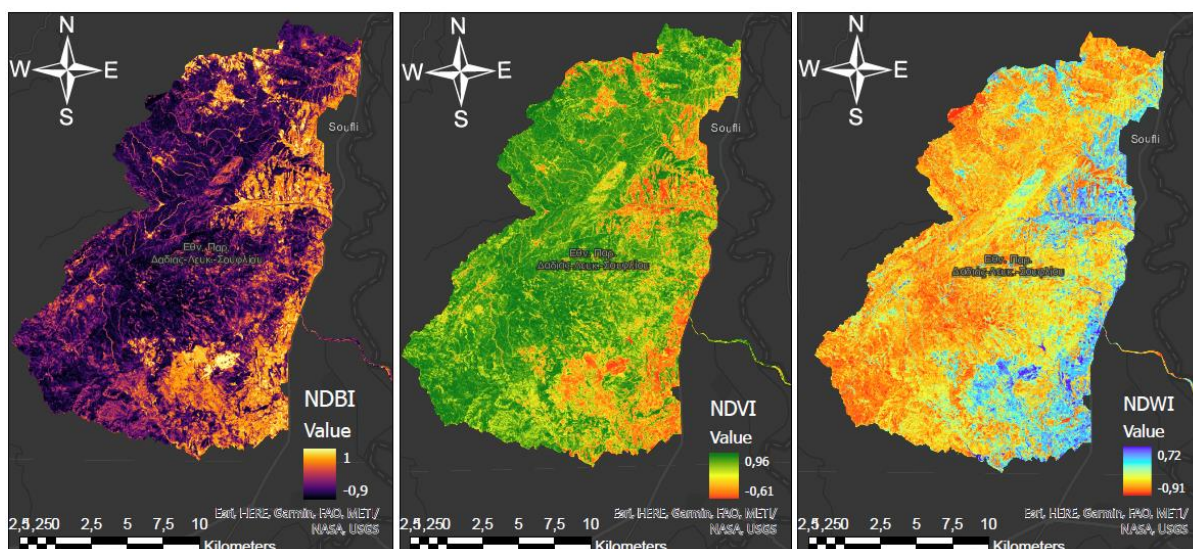
- Νερό
- Ασυνεχής αστικός ιστός
- Μη αρδευόμενη γη
- Θαμνώδεις εκτάσεις και χαμηλή βλάστηση
- Δάσος πλατύφυλλων
- Μικτό δάσος

Οι ονομασίες των κατηγοριών δόθηκαν με βάση το χάρτη Corine 2018 της περιοχής και με βάση τα είδη φωτών που περιλαμβάνει το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου<sup>[55]</sup>.

Το σύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης αποτελείται από μικρά τμήματα της Εικόνας 13, τα οποία περιέχουν μόνο μια από τις 6 προηγούμενες κατηγορίες. Η εγκυρότητα των δεδομένων εκπαίδευσης επηρεάζει σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα του αλγόριθμου, επομένως για να διασφαλιστεί η σωστή αποτύπωση των εικονιζόμενων περιοχών κατασκευάστηκαν τρία βοηθητικά επίπεδα, που απεικονίζουν διαφορετικούς δείκτες. Συγκεκριμένα, οι περιοχές που καλύπτονται από νερό επιβεβαιώθηκαν με τον δείκτη NDWI, η βλάστηση με τον δείκτη NDVI και οι περιοχές που δεν περιέχουν βλάστηση με τον δείκτη NDBI (Normalized Difference Built-up Index). Ο δείκτης NDBI υπολογίζεται από το εγγύς υπέρυθρο και το υπέρυθρο μικρού μήκους κύματος σύμφωνα με τη σχέση

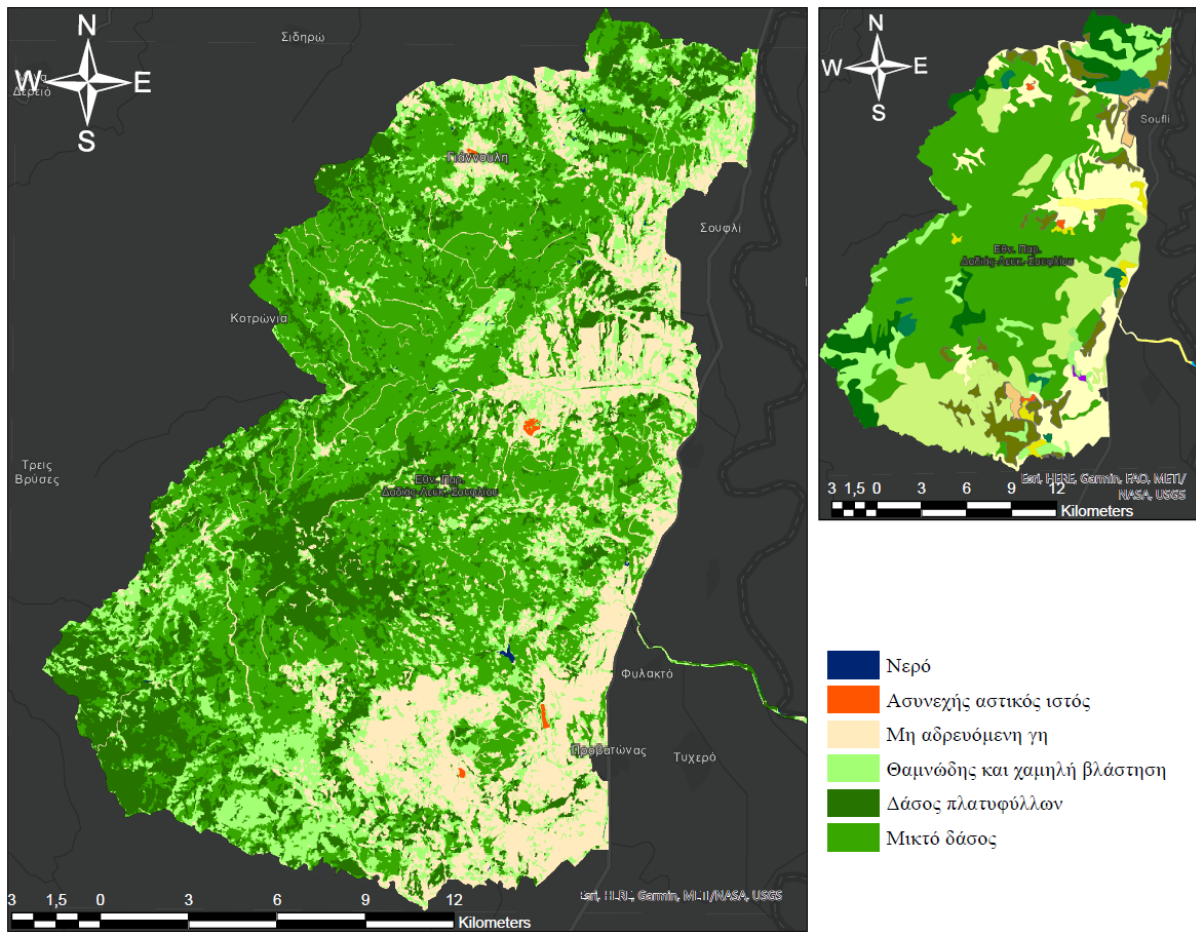
$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$$

και δίνει τη δυνατότητα καλύτερης απεικόνισης ακάλυπτης γης και κυρίως ανθρώπινων κατασκευών. Στην Εικόνα 14 παρουσιάζονται οι απεικονίσεις των δεικτών NDBI (αριστερά), NDVI (κέντρο) και NDWI (δεξιά) με βάση τις οποίες ελέγχθηκε η εγκυρότητα των εικόνων εκπαίδευσης του αλγόριθμου.



*Εικόνα 14: Οι απεικονίσεις των δεικτών NDBI (αριστερά), NDVI (κέντρο) και NDWI (δεξιά) με βάση τις οποίες ελέγχθηκε η εγκυρότητα των εικόνων εκπαίδευσης του αλγορίθμου.*

Τα δεδομένα εκπαίδευσης εισήχθησαν στον αλγόριθμο μηχανικής εκμάθησης SVM στο περιβάλλον του Σ.Γ.Π., ο οποίος αποτύπωσε τη κάλυψη γης σύμφωνα με τις 6 κατηγορίες που είχαν οριστεί. Στη συνέχεια έγινε επανέλεγχος και διορθώσεις στο επίπεδο δεδομένων που αποτύπωσε ο αλγόριθμος, πάλι με τη βοήθεια των δεικτών NDBI, NDVI και NDWI. Μετά τις διορθώσεις επαναλήφθηκε η διαδικασία και διαμορφώθηκε το τελικό αποτέλεσμα της κάλυψης γης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 15, όπου οι κατηγορίες έχουν απεικονιστεί σε χρωματικές διαβαθμίσεις που συμβαδίζουν με το χάρτη Corine 2018.



Εικόνα 15: Ο χάρτης κάλυψης γης, όπως αποτυπώθηκε από το αλγόριθμο μηχανικής εκμάθησης SVM (αριστερά). Οι κατηγορίες έχουν αποτυπωθεί σε χρωματικές διαβαθμίσεις που συμβαδίζουν με το χάρτη Corine 2018 (δεξιά).

Τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά, Με την εφαρμογή του αλγόριθμου SVM αποδόθηκαν οι περιοχές που καλύπτονται από δάσος πλατύφυλλων, μικτό δάσος και θαμνώδης βλάστηση που αντιστοιχούν στους κωδικούς του Corine 311, 313 και 322 με μεγάλη ακρίβεια. Αυτό αποδεικνύεται και από την ανάλυση ακρίβειας που παρουσιάζεται στο Παράρτημα I. Συγκεκριμένα ο συντελεστής ακρίβειας (Kappa coefficient) του μοντέλου είναι  $k=0.87$ , ενδεικτικά η τέλεια ακρίβεια του μοντέλου θα αντιστοιχούσε σε  $k=1$ <sup>[85]</sup>.

Στον χάρτη αποτυπώνονται ως μη αρδευόμενη γη οι περιοχές που αντιστοιχούν στο κωδικό 211 του Corine 2018 και ο συνεχής αστικός ιστός που συμπεριλαμβάνει τους κωδικούς 112 και 121. Στη χαμηλή βλάστηση περιλαμβάνονται και οι περιοχές των καλλιεργειών που περιείχαν βλάστηση τη περίοδο που έγινε η λήψη της δορυφορικής εικόνας. Επίσης, στο χάρτη της κάλυψης γης διακρίνονται οι δρόμοι που χαρακτηρίζονται ως μη αρδευόμενη γη, με τις χαρακτηριστικές γραμμές ανάμεσα στις δασικές εκτάσεις. Ο χάρτης αποτυπώνει και τη παρουσία νερού, κάτι που δεν φαίνεται στο χάρτη του Corine 2018. Η αποτύπωση της παρουσίας νερού σε μια περιοχή είναι σημαντική για τη μελέτη του κινδύνου πυρκαγιάς, καθώς αποτελεί φυσικό εμπόδιο για την ανάπτυξη των πυρκαγιών. Οι 6 κατηγορίες διαβαθμίζονται με μεγάλη χωρική ευκρίνεια 10x10m, η οποία καθορίστηκε από τα δορυφορικά δεδομένα του Sentinel-2. Αντίθετα ο χάρτης Corine 2018, παρουσιάζει μεγαλύτερη ποικιλία κατηγοριών καθώς περιλαμβάνει καλλιέργειες και γεωργικές εκτάσεις. Η ακριβής έκταση των καλλιεργήσιμων εκτάσεων είναι δύσκολο να κατηγοριοποιηθεί από μια δορυφορική εικόνα, καθώς βλάστηση που περιέχουν μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με το

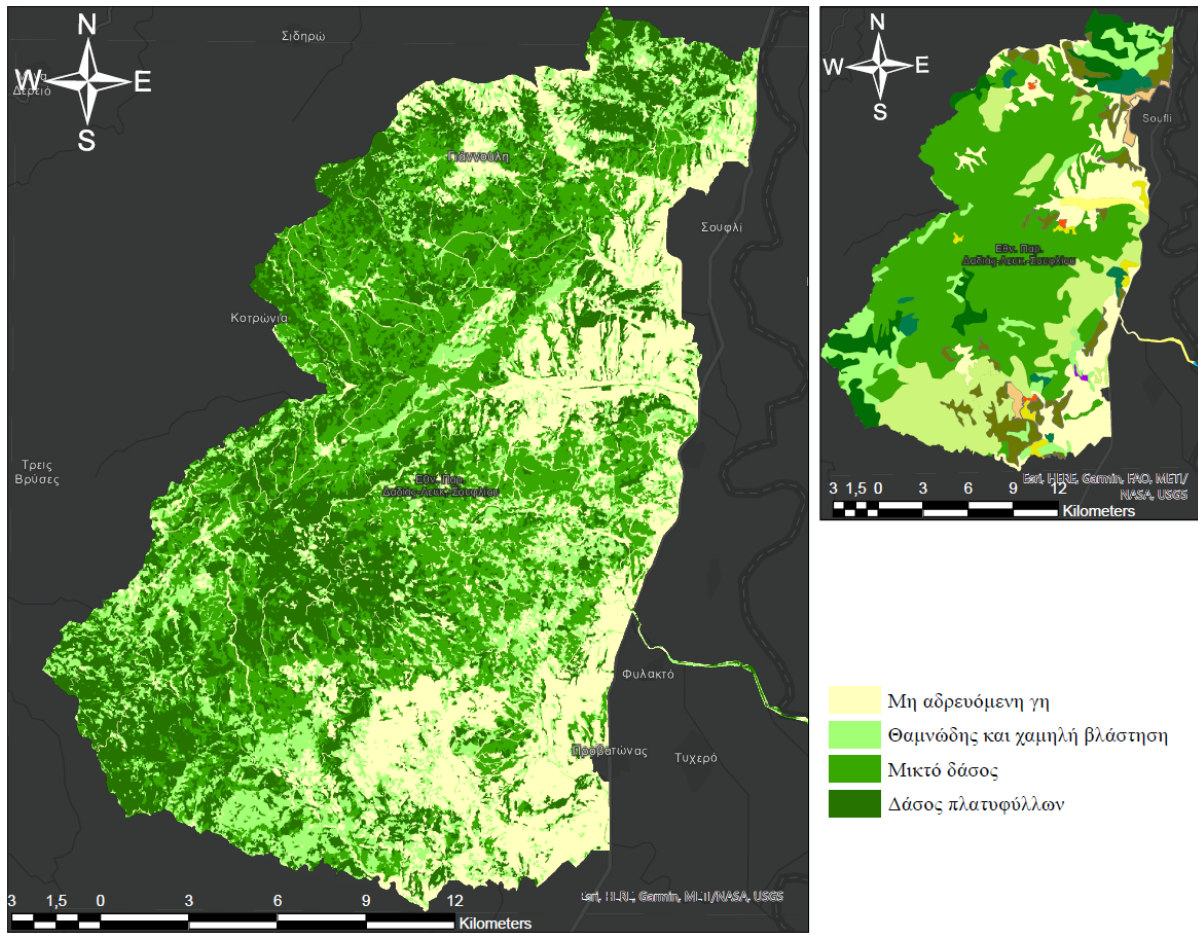


στάδιο που βρίσκεται καλλιέργεια, στη διάρκεια του έτους. **Εν κατακλείδι με την ανάλυση της δορυφορικής εικόνας του συνδυασμού των φασματικών καναλιών του πράσινου (B03), του κόκκινου (B04) και του εγγύς υπέρυθρου (B08) με αλγόριθμο επιβλεπόμενης μηχανικής εκμάθησης SVM επιτεύχθηκε ένα πολύ καλός διαχωρισμός του είδους της βλάστησης, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τις περιοχής.** Η μεθοδολογία αυτή δίνει τη δυνατότητα επικαιροποίησης της κάλυψης, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη μελέτη κινδύνου πυρκαγιών και του σχεδιασμού μετρίασής του.

#### 5.1.3.2 Εφαρμογή αλγόριθμου μη-επιβλεπόμενης εκμάθησης (Unsupervised Machine Learning)

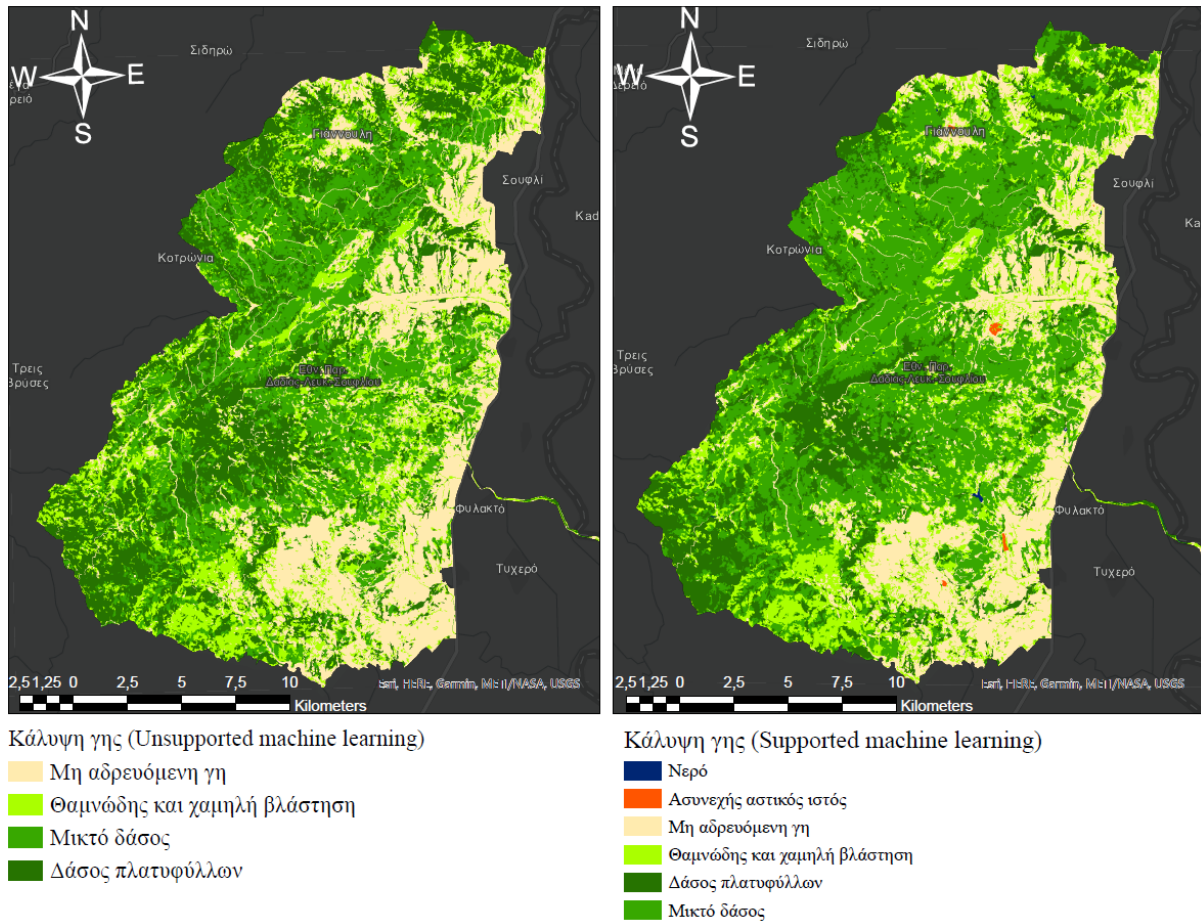
Ο αλγόριθμος μη-επιβλεπόμενης μηχανικής εκμάθησης επιτρέπει την γρήγορη κατασκευή ενός χάρτη κάλυψης γης, με το μειονέκτημα της μικρότερης ακριβείας των διαβαθμίσεων. Αυτό συμβαίνει καθώς ο αλγόριθμος διαχωρίζει την εικόνα σε ομοιογενή τμήματα χωρίς όμως να χρειάζονται δεδομένα εκπαίδευσης από το χρήστη, που βοηθούν σημαντικά στην αναγνώριση κατηγοριών μικρής έκτασης, όπως το νερό και ο αστικός ιστός. Η διαδικασία είναι παρόμοια με τη προηγούμενη υποενότητα, χωρίς το στάδιο της διαδικασίας συλλογής δεδομένων εκπαίδευσης.

Ο αλγόριθμος διαχώρισε την εικόνα των φασματικών καναλιών του πράσινου (B03), του κόκκινου (B04) και του εγγύς υπέρυθρου (B08) σε 5 τμήματα τα οποία στη συνέχεια διαχωρίστηκαν σύμφωνα με τις κατηγορίες της προηγούμενης υποενότητας<sup>[55]</sup>. Το τελικό αποτέλεσμα του χάρτη κάλυψης γης, όπως αποδόθηκε από τον αλγόριθμο μη-εκπαιδευμένης μηχανικής μάθησης, παρουσιάζεται στην Εικόνα 16. Στην ίδια εικόνα εμφανίζεται και ο χάρτης κάλυψης γης Corine 2018 για λογούς συγκρίσεων. Στο τελικό αποτέλεσμα υπάρχουν μόνο 4 κατηγορίες, καθώς ο αλγόριθμος διαβάθμισε το έδαφος σε δύο κατηγορίες οι οποίες στη συνέχεια συγχωνεύθηκαν. Κάθε μια από τις κατηγορίες που συγχωνεύθηκαν, περιλάμβανε της περιοχές ακάλυπτης γης της Εικόνα 13 που αντιστοιχούν σε κυανό και λευκό χρώμα.



**Εικόνα 16:** Ο χάρτης κάλυψης γης, όπως αποδόθηκε από τον αλγόριθμο μη-εκπαιδευμένης μηχανικής μάθησης. Στην δεξιά εικόνα εμφανίζεται και ο χάρτης κάλυψης γης του Corine 2018 για λόγους συγκρίσεων.

Οι διαβαθμίσεις αναμεσα στη βλάστηση, έχουν αποτυπωθεί αρκετά καλά, παρουσιάζουν όμως πιο έντονη “τραχύτητα” σε σχέση με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου επιβλεπομένης εκμάθησης. Επίσης, ο αλγόριθμος δεν αναγνώρισε τις περιοχές που καλύπτονταν από νερό και τις περιοχές με αραιό αστικό ιστό, εξαιτίας της μικρής τους επιφάνειας σε σχέση με το μέγεθος της περιοχής μελέτης. **Ο αλγόριθμος μη-εκπαιδευμένης μηχανικής εκμάθησης, με δεδομένη τη ταχύτητα των αποτελεσμάτων, αποτύπωσε ικανοποιητικά τη κάλυψη της γης. Οι διαβαθμίσεις ανάμεσα στα είδη της βλάστησης που μπόρεσε να αποτυπώσει είναι πολύ σημαντικές για τη αναγνώριση της καύσιμης ύλης της περιοχής. Το μεγάλο προτέρημα του αλγορίθμου είναι η ταχύτητα των αποτελεσμάτων, κάτι που μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμο σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, που η ταχύτητα στις αποφάσεις είναι καθοριστική.** Στην Εικόνα 17 παρουσιάζονται μαζί τα αποτελέσματα του αλγορίθμου εκπαιδευόμενης μάθησης (δεξιά) και του αλγορίθμου μη-εκπαιδευόμενης εκμάθησης (αριστερά) όπου είναι εμφανείς οι διαφορές τους.



*Εικόνα 17: Συγκριτική εικόνα των τελικών αποτελεσμάτων της κάλυψης γης όπως αποτυπώθηκε από τον αλγόριθμο εκπαιδευόμενης μάθησης SVM (δεξιά) και τον αλγόριθμο μη-εκπαιδευόμενης εκμάθησης (αριστερά).*

## 5.2 Απεικόνιση της περιεκτικότητας σε υγρασία της καύσιμης ύλης σε Σ.Γ.Π.

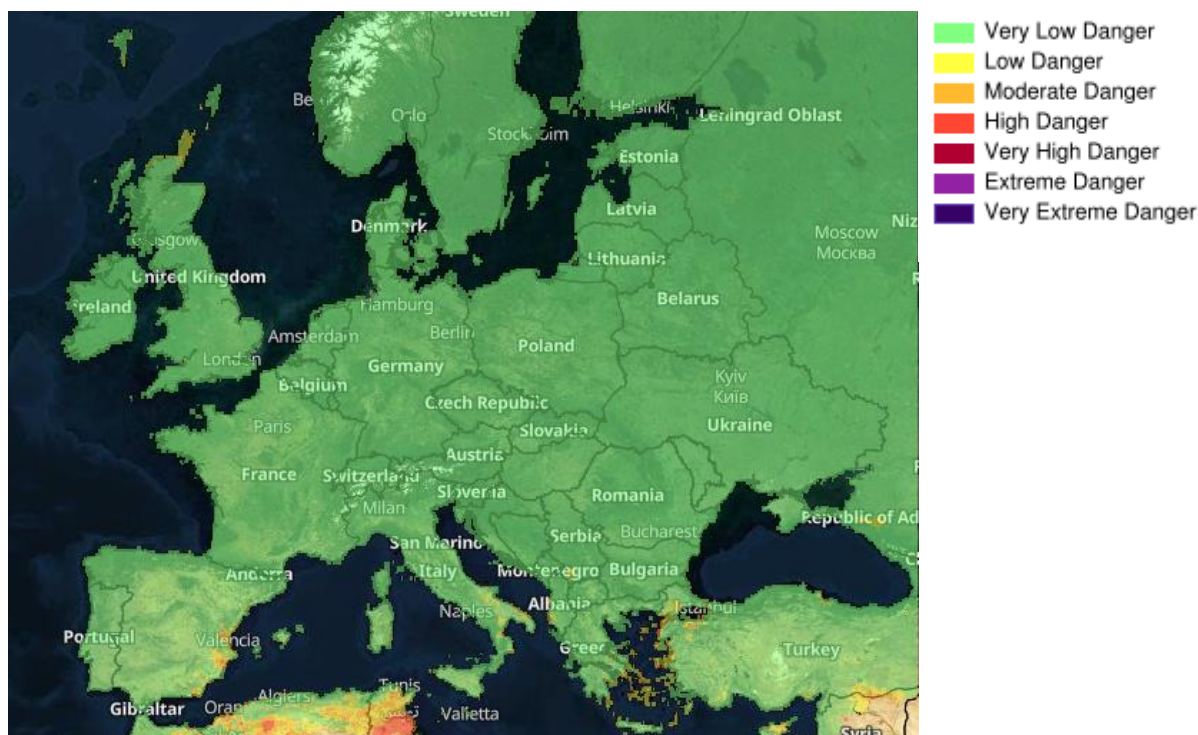
### 5.2.1 Δείκτης Forest Fire Weather Index (FWI) από το European Forest Fire Information System (EFFIS)

Ο FWI, όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.1, είναι ένας δείκτης που αποτυπώνει τον κίνδυνο πυρκαγιάς, με βάση την υγρασία της καύσιμης ύλης συνεκτιμώντας και την αναμενόμενη συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Όπως φαίνεται, στο Πίνακα 3 για τον υπολογισμό του δείκτη χρειάζονται πρόσφατα μετεωρολογικά δεδομένα και προβλέψεις για τις παραμέτρους της θερμοκρασίας, της βροχόπτωσης, της σχετικής υγρασίας και του ανέμου. Με τα δεδομένα αυτά ο FWI αποτυπώνεται σε μορφή ψηφιακού χάρτη με χωρική ανάλυση 8 έως 10 km στην ιστοσελίδα του EFFIS. Ο FWI υπολογίζεται από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προγνώσεων (ECMWF) και παρέχει προβλέψεις 1 έως 9 ημέρων. Παράλληλα, προβλέψεις παρέχονται και από το MeteoFrance με χωρική ανάλυση 10km για διάστημα 1 έως και 3 ημέρες<sup>[24]</sup>. Ο δείκτης παρουσιάζεται σε χρωματική κλίμακα 6+1 διαβαθμίσεων ανάλογα με την επικινδυνότητα της περιοχής σύμφωνα με τον Πίνακα 4.

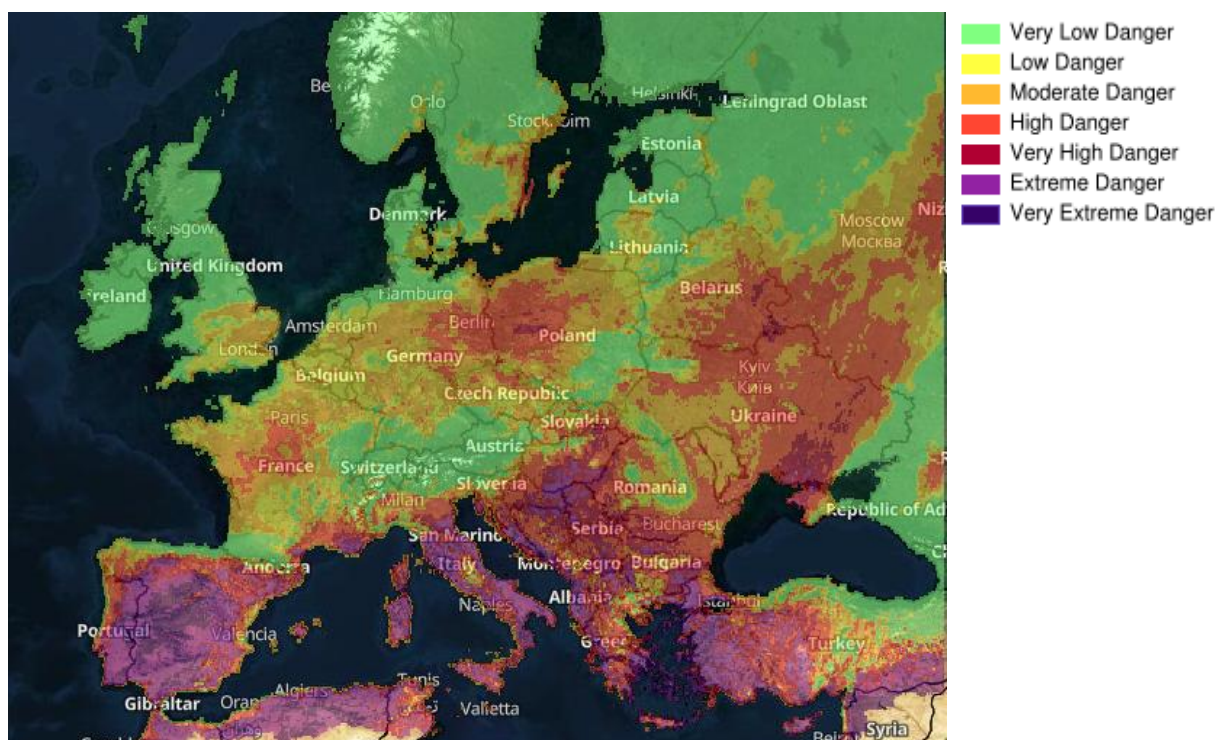
Διαβάθμιση Κινδύνου Πυρκαγιάς	Fire Weather Index (FWI)
Πολύ χαμηλός	< 5.2
Χαμηλός	5.2 - 11.2
Μέτριος	11.2 - 21.3
Υψηλός	21.3 - 38.0
Πολύ Υψηλός	38.0 - 50.0
Ακραίος	50.0 ≤

*Πίνακας 4: Κλίμακα 6 διαβαθμίσεων του δείκτη Fire Weather Index (FWI), ανάλογα με τον κίνδυνο πυρκαγιάς. [Πηγή: European Forest Fire Information System (EFFIS)]*

Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται ο ευρωπαϊκός ψηφιακός χάρτης επικινδυνότητας πυρκαγιάς του δείκτη FWI για την ημερομηνία 26 Δεκεμβρίου 2021 από το MeteoFrance με χωρική ανάλυση 10km. Όπως είναι αναμενόμενο, η επικινδυνότητα είναι πολύ χαμηλή σε όλη την Ευρώπη εξαιτίας της χρονικής περιόδου. Για λόγους σύγκρισης, στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται ο ίδιος χάρτης για την ημερομηνία της 15 Αυγούστου 2021, όπου ο κίνδυνος πυρκαγιάς σε πολλές χώρες, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, είναι πολύ υψηλός, όπως φαίνεται από τη χρωματική κλίμακα κινδύνου του υπομνήματος.



Εικόνα 18: Ο ευρωπαϊκός ψηφιακός χάρτης επικινδυνότητας πυρκαγιάς του δείκτη FWI για την ημερομηνία 26 Δεκεμβρίου 2021 από το MeteoFrance με χωρική ανάλυση 10km. [Πηγή: European Forest Fire Information System (EFFIS)].



Εικόνα 19: Ο ευρωπαϊκός ψηφιακός χάρτης επικινδυνότητας πυρκαγιάς του δείκτη FWI για την ημερομηνία 15 Αυγούστου 2021 από το MeteoFrance με χωρική ανάλυση 10km., όπου ο κίνδυνος πυρκαγιάς σε πολλές χώρες και στην Ελλάδα είναι πολύ υψηλός [Πηγή: European Forest Fire Information System (EFFIS)].



### 5.2.2 Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας (Topographic Wetness Index ή TWI)

Ο τοπογραφικός δείκτης υγρασίας (TWI) δείχνει τις περιοχές που το νερό τείνει να συγκεντρώνεται εξαιτίας της μορφολογίας του εδάφους. Αναμενόμενα, οι περιοχές κοντά στα σημεία που ο δείκτης TWI παρουσιάζει μεγάλες τιμές περιέχουν καύσιμη ύλη με σχετικά μεγαλύτερη περιεκτικότητα υγρασίας, συγκριτικά με τις πιο απομακρυσμένες. Ο υπολογισμός του TWI γίνεται από τοπογραφικά δεδομένα και συγκεκριμένα από δεδομένα ψηφιακού χάρτη υψομέτρου (Digital Elevation Model ή DEM). Στα πλαίσια της διπλωματικής ο δείκτης TWI υπολογίστηκε από την ανάλυση του DEM της βάσης δεδομένων του Copernicus με χωρική ανάλυση εικονοστοιχείων 25x25m. Από το τμήμα E50N20 απομονώθηκε η περιοχή μελέτης του Έβρου. Ο υπολογισμός του TWI έγινε με τη βοήθεια της σχέσης (1b) της Ενότητας 3.1

$$TWI = \ln \frac{a}{\tan b}$$

όπου ο παράγοντας a εκφράζει την επιφάνεια των λεκανών απορροής από ένα σημείο ανά πλάτος ροής και ο παράγοντας b τη κλίση του εδάφους. Οι απαραίτητες αναλύσεις για τη τελική απεικόνιση του επίπεδου πληροφορίας δεδομένων κανονικοποιημένης ψηφιδωτής (raster) του TWI έγινε σε λογισμικό Σ.Γ.Π., στις οποίες διατηρήθηκε το αρχικό σύστημα προβολής του DEM, ETRS89 ETRS LAEA. Στο DEM, πριν χρησιμοποιηθεί στις αναλύσεις, έγινε εξομάλυνση του, για να αφαιρεθούν τυχόν λάθη εικονοστοιχείων κορυφών (peak) και καταβόθρας (sink).

#### Υπολογισμός παράγοντα a

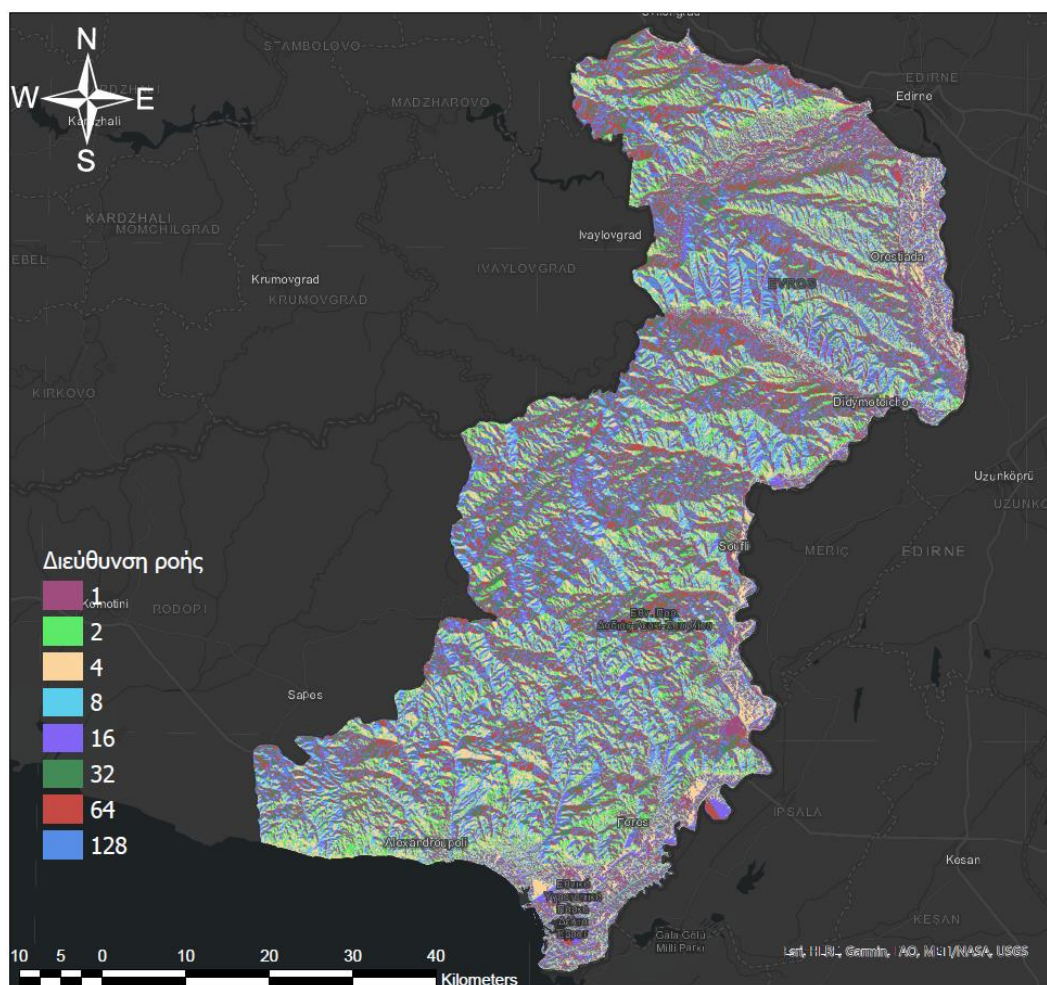
Για τον υπολογισμό του παράγοντα a παρεμβλήθηκαν αρκετά ενδιάμεσα βήματα. Αρχικά υπολογίστηκε, από το DEM, η **διεύθυνση ροής** υδάτων της περιοχής με το ομώνυμο εργαλείο του λογισμικού *Flow Direction*. Το εργαλείο *Flow Direction* εφαρμόζει μια λειτουργία γειτονίας (focal) στα εικονοστοιχεία, με τελικό αποτέλεσμα τη διεύθυνση ροής. Η διεύθυνση ροής είναι ένα επίπεδο πληροφορίας δεδομένων ψηφιδωτής μορφής που δείχνει τη προτιμητέα ροή του νερού από κάθε εικονοστοιχείο (cell) προς τα 8 γειτονικά εικονοστοιχεία, σύμφωνα με τη κωδικοποίηση του Πίνακα 5. Η κωδικοποίηση γίνεται σε αριθμούς που είναι δυνάμεις του 2<sup>[26]</sup>.

32	64	128
16	cell	1
8	4	2

Πίνακας 5: Πίνακας που δείχνει τη προτιμητέα ροή του νερού από κάθε εικονοστοιχείο προς τα 8 γειτονικά, με κωδικοποίηση που γίνεται σε αριθμούς που είναι δυνάμεις του 2. [Πηγή: ESRI]

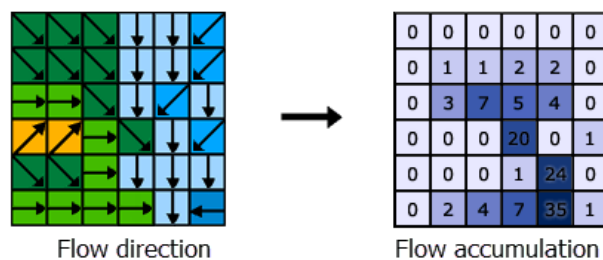
Για παράδειγμα εάν ένα εικονοστοιχείο έχει την τιμή 64 τότε το νερό τείνει να κινηθεί προς το βορά, ενώ εάν ένα εικονοστοιχείο έχει τιμή 2 τότε το νερό τείνει να κινηθεί προς το εικονοστοιχείο του Πίνακα 5 που έχει τη τιμή 2, δηλαδή νοτιοανατολικά. Η διεύθυνση κίνησης του νερού υπολογίζεται σύμφωνα με τις διαφορές των τιμών των εικονοστοιχείων του DEM, από τα εικονοστοιχεία υψηλού υψομέτρου προς τα εικονοστοιχεία χαμηλού υψομέτρου.

Στην Εικόνα 20 παρουσιάζεται το τελικό επίπεδο της διεύθυνσης ροής. Ο χρωματισμός των εικονοστοιχείων αντιστοιχεί στη κωδικοποίηση του Πίνακα 5, όπως παρουσιάζεται και στο υπόμνημα.



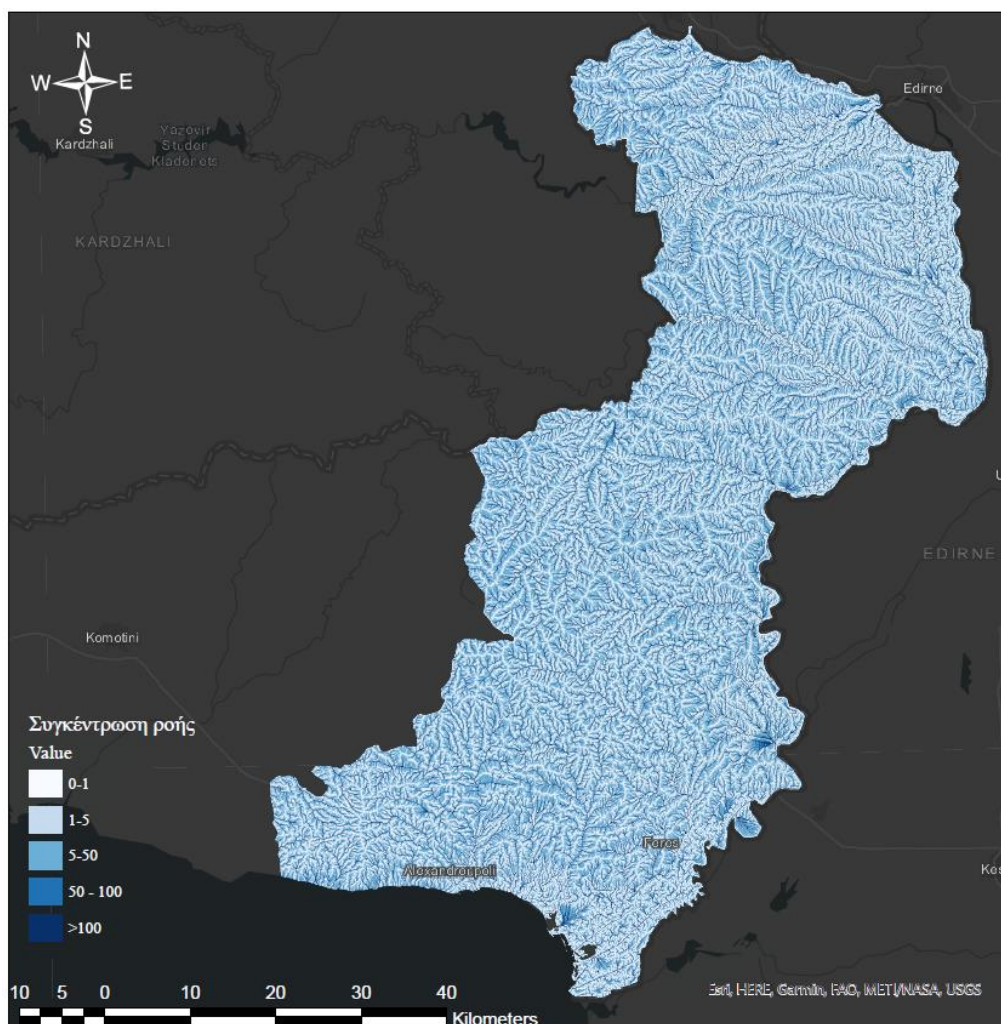
Εικόνα 20: Το επίπεδο πληροφορίας της διεύθυνσης ροής, όπου ο χρωματισμός των εικονοστοιχείων αντιστοιχεί στη κωδικοποίηση του Πίνακα 5, όπως παρουσιάζεται στο υπόμνημα.

Στη συνέχεια από τη διεύθυνση ροής υπολογίστηκαν οι περιοχές **συσσώρευσης ροής** με το ομώνυμο εργαλείο του λογισμικού *Flow Accumulation*. Το *Flow Accumulation* εφαρμόζει μια λειτουργία γειτονίας (focal) στα εικονοστοιχεία, δίνοντάς τους τιμές ανάλογα με τον αριθμό των προηγούμενων εικονοστοιχείων που ρέουν προς αυτό<sup>[26]</sup>. Το αποτέλεσμα της λειτουργίας *Flow Accumulation* είναι ένα επίπεδο πληροφορίας δεδομένων ψηφιδωτής μορφής που δείχνει τα εικονοστοιχεία που συγκεντρώνεται η ροή νερού σύμφωνα με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Στην Εικόνα 21 παρατίθεται ένα παράδειγμα υπολογισμού των εικονοστοιχείων συσσώρευσης ροής, όπου στα αριστερά είναι το επίπεδο της διεύθυνσης ροής, στο οποίο η ροή των υδάτων παρουσιάζεται με βέλη και δεξιά το αποτέλεσμα της ανάλυσης συσσώρευσης ροής.



Εικόνα 21: Παράδειγμα υπολογισμού των εικονοστοιχείων συσσώρευσης ροής από τη διεύθυνση ροής. [Πηγή: ESRI].

Το τελικό επίπεδο της συγκέντρωσης ροής παρουσιάζεται στην Εικόνα 22. Με σκούρα μπλε απόχρωση έχουν αποδοθεί τα εικονοστοιχεία που συγκεντρώνεται η ροή νερού σύμφωνα με τη διεύθυνση ροής των υδάτων.



Εικόνα 22: Το επίπεδο δεδομένων ψηφιδωτής μορφής της συγκέντρωσης ροής, όπου με σκούρα μπλε απόχρωση έχουν αποδοθεί τα εικονοστοιχεία που συγκεντρώνεται η ροή νερού σύμφωνα με τη διεύθυνση ροής των υδάτων..

Για το τελικό υπολογισμό του παράγοντα  $a$  χρειάζεται να γίνει **ανατίμηση** των πεδίων του επιπέδου της συσσώρευσης ροής και παράλληλα να συμπεριληφθεί η χωρική ανάλυση των εικονοστοιχείων του DEM. Η ανατίμηση είναι απαραίτητη, καθώς τα εικονοστοιχεία του επιπέδου της συσσώρευσης ροής περιέχουν την τιμή μηδέν και εάν αντικατασταθούν στη σχέση (1b) θα πρέπει να υπολογιστεί η τιμή  $\ln(0)$  που δεν ορίζεται, επομένως σε κάθε εικονοστοιχείο με εφαρμόζουμε την σχέση

$$a = (\text{Συσσώρευση ροής} + 1) * 25$$

Το ανατιμημένο επίπεδο της συσσώρευσης ροής αποτελεί και τον τελικό παράγοντα  $a$  για το κάθε εικονοστοιχείο.



## Υπολογισμός της κλίσης b

Η **κλίση του εδάφους** υπολογίζεται από το DEM με το ομώνυμο εργαλείο *Slope* και το τελικό επίπεδο πληροφορίας δεδομένων της κλίσης αποδόθηκε σε μοίρες. Η κλίση του εδάφους είναι πολύ σημαντικό επίπεδο πληροφορίας και χρησιμοποιείται για διάφορους υπολογισμούς και αναλύσεις. Πέρα από τον υπολογισμό του δείκτη TWI, η κλίση του εδάφους αυτόνομα είναι σημαντικός παράγοντας κινδύνου πυρκαγιάς.

Το εργαλείο *Slope* εφαρμόζει μια λειτουργία γειτονίας (focal), υπολογίζοντας για κάθε εικονοστοιχείο το μέγιστο ρυθμό μεταβολής της τιμής του ύψους προς τα γειτονικά εικονοστοιχεία. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα εικονοστοιχεία του DEM και το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα επίπεδο πληροφορίας που αποτυπώνει τη κλίση του εδάφους. Συγκεκριμένα η κλίση υπολογίζεται από τη σχέση

$$\text{Slope(Degrees)} = \arctan \left( \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} \right) * \frac{180}{\pi}$$

Εάν υποθέσουμε πως το κεντρικό εικονοστοιχείο ενδιαφέροντος, που θα υπολογιστεί η κλίση, είναι το ψ τότε με τα γειτονικά εικονοστοιχεία σχηματίζεται το πλέγμα 3x3 του Πίνακα 6. Στη περίπτωση αυτή η μεταβολή dz/dx υπολογίζεται από τη σχέση

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\frac{(c + 2f + i) * 4}{\text{weight1}} - \frac{(a + 2d + g) * 4}{\text{weight2}}}{8 * \text{cellsize}(x)}$$

Όπου c, f, i, a, d και g αντικαθίστανται από τις τιμές του υψομέτρου των αντίστοιχων εικονοστοιχείων του DEM σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 6, όπου:

cellsize(x) είναι η χωρική ανάλυση του εικονοστοιχείου στη διεύθυνση x και τα βάρη weight1 και weight2 δίνονται από τις σχέσεις

Weight1= (c+2\*f+i), όπου τα εικονοστοιχεία c, f και i παίρνουν τιμές 1 ή 0 ανάλογα εάν είναι έγκυρα ή όχι

Weight2= (a+2\*d+g), όπου τα εικονοστοιχεία a, d και g παίρνουν τιμές 1 ή 0 ανάλογα εάν είναι έγκυρα ή όχι

Παρόμοια υπολογίζεται η μεταβολή dz/dy για τη διεύθυνση y αντικαθιστώντας στη σχέση τα κατάλληλα εικονοστοιχεία.

$$\frac{dz}{dy} = \frac{\frac{(g + 2h + i) * 4}{\text{weight3}} - \frac{(a + 2b + c) * 4}{\text{weight4}}}{8 * \text{cellsize}(y)}$$

Τα βάρη Weight3 και Weight4 υπολογίζονται εντελώς ανάλογα με αυτά της διεύθυνσης x.

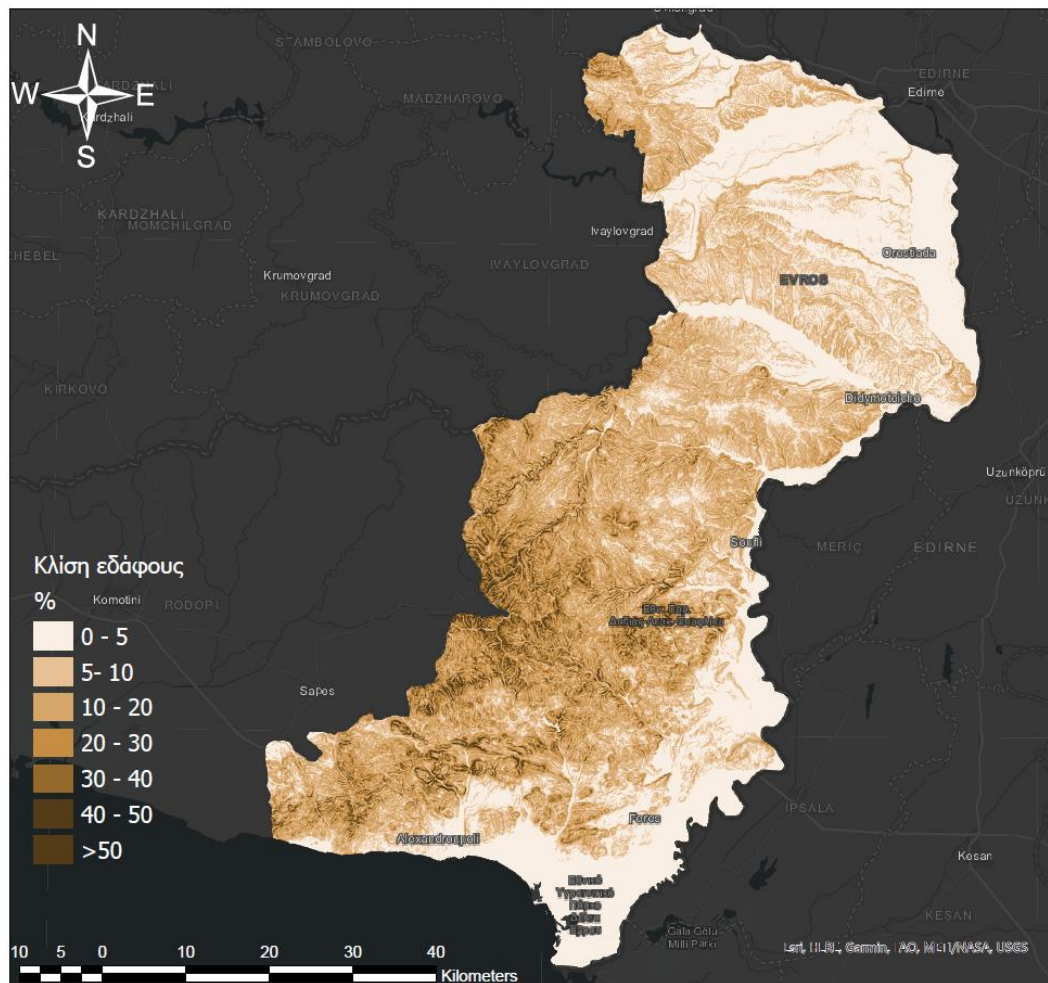
a	b	c
d	ψ	f
g	h	i

**Πίνακας 6:** Το κεντρικό εικονοστοιχείο ενδιαφέροντος ψ μαζί με τα γειτονικά εικονοστοιχεία που σχηματίζουν το πλέγμα 3x3 [Πηγή: ESRI]

Από την ανάλυση του DEM προέκυψε το επίπεδο της κλίσης σε μοίρες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 23. Στη συνέχεια οι μοίρες μετατράπηκαν σε ποσοστό για λόγους παρουσίασης σύμφωνα με την απλή σχέση μετατροπής

$$\text{percent (\%)} = 100 * \tan\left(\frac{\pi}{180} * \text{degree}\right)$$

Τα σκουρόχρωμα εικονοστοιχεία αντιστοιχούν σε περιοχές με μεγάλες κλίσεις ενώ τα ανοιχτόχρωμα εικονοστοιχεία αντιστοιχούν σε περιοχές με μικρές κλίσεις, σύμφωνα με το υπόμνημα.



Εικόνα 23: Το επίπεδο της κλίσης του εδάφους (Slope), για την περιοχή μελέτης.

Στη συνέχεια χρειάζεται να μετατραπούν οι μοίρες σε ακτίνια ώστε να μπορούν να εισαχθούν στη σχέση (1b). Η μετατροπή των μοιρών σε ακτίνια δίνεται από την απλή σχέση

$$\text{rad} = \frac{\pi}{180} \text{degree} \quad (6)$$

Τέλος, σύμφωνα με τη σχέση (1b) η κλίση βρίσκεται στο παρονομαστή του κλάσματος, αυτό συνεπάγεται ότι δεν μπορεί να πάρει τη τιμή 0 καθώς  $\tan(0)=0$ , που οδηγεί στην απροσδιόριστη μορφή:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \ln x = \infty$$

όπου  $x=a/\tan b$ .



Για να αποφευχθεί αυτό, θα εφαρμοστεί η εντολή προϋπόθεσης (*condition*), παράλληλα με τον υπολογισμό της εφαπτομένης, για να αποδοθεί η τιμή εφαπτομένης 0,005 στα εικονοστοιχεία που έχουν τιμή κλίσης 0. Συγκεκριμένα εφαρμόζεται η λογική συνθήκη

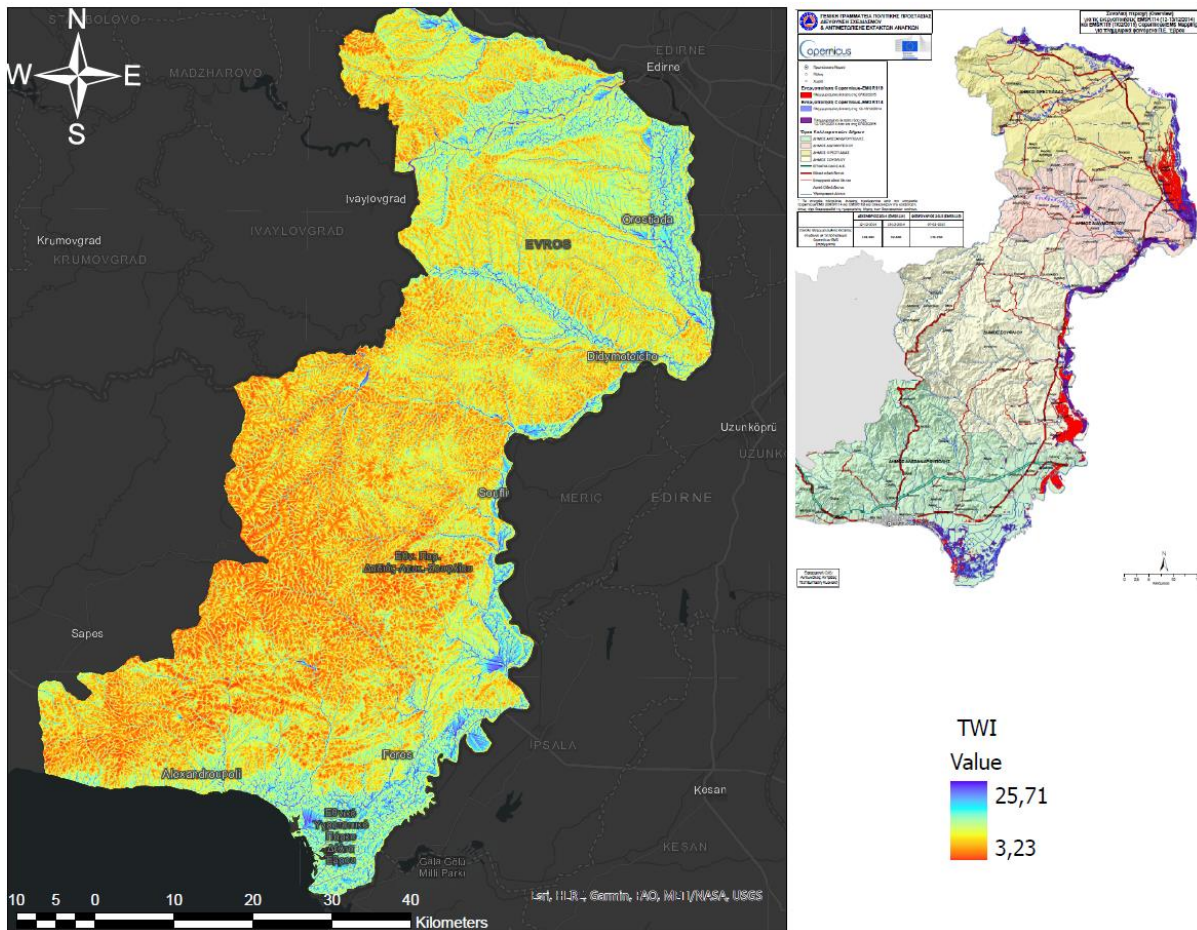
$$\text{Tan b} = (\text{Slope} > 0, \tan(\text{slope}), 0.005)$$

Με αυτό το τρόπο στα εικονοστοιχεία που έχουν κλίση μεγαλύτερη του μηδέν θα αποδοθεί η τιμή της εφαπτομένης του εικονοστοιχείου ( $\tan(\text{Slope})$ ), ενώ για όσα εικονοστοιχεία δεν ικανοποιούν το κριτήριο, δηλαδή έχουν τιμή μηδέν, θα αποδοθεί η τιμή 0,005.

### Υπολογισμός TWI

Έχοντας πλέον υπολογίσει τους παράγοντες  $a$  και  $\tan b$ , εφαρμόζεται η σχέση (1b) με το κατάλληλο εργαλείο του λογισμικού, σε κάθε εικονοστοιχείο. Το αποτέλεσμα του υπολογισμού είναι ο τοπογραφικός δείκτης υγρασίας (TWI). Το τελευταίο βήμα της διαδικασίας είναι να ομαλοποιηθούν τα αποτελέσματα του TWI με την εφαρμογή φίλτρου low pass. Το φίλτρο μειώνει τις ακραίες διακυμάνσεις ανάμεσα στα εικονοστοιχεία, υπολογίζοντας τη μέση τιμή των 8 γειτονικών. Το φίλτρο low pass εφαρμόστηκε στα εικονοστοιχεία με τη βοήθεια του εργαλείου *filter*. Το *filter* εφαρμόζει μια κεντρική λειτουργία στα εικονοστοιχεία, κατά την οποία εξομαλύνονται οι τιμές του επίπεδου πληροφοριών δεδομένων ψηφιδωτής μορφής. Στην Εικόνα 24 παρουσιάζεται ο τοπογραφικός δείκτης υγρασίας (TWI), που παίρνει τιμές από 3,2 έως 25,7 σύμφωνα με τη χρωματική κλίμακα του υπομνήματος. Τα μπλε εικονοστοιχεία υποδηλώνουν περιοχές μεγάλης συσσώρευσης νερού, ενώ τα κόκκινα εικονοστοιχεία υποδηλώνουν “στεγνές” περιοχές<sup>[27]</sup>. Παράλληλα στην Εικόνα 24 (δεξιά) παρουσιάζεται ο χάρτης της Γενικής Γραμματείας Πολιτικής Προστασίας Σχεδιασμού και Αντιμετώπισης Έκτακτων Αναγκών που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της αποτίμησης των πλημμυρισμένων εκτάσεων για τα έτη 2014 και 2015. Στο χάρτη της Πολιτικής Προστασίας απεικονίζεται με ακρίβεια το υδρογραφικό δίκτυο του νομού και για λόγους σύγκρισης με τα αποτελέσματα του δείκτη TWI έχει συμπεριληφθεί στην Εικόνα 24.

Από τη σύγκριση του υδρογραφικού δικτύου σύμφωνα με το TWI και αυτό που εμφανίζεται στον χάρτη της Γενικής Γραμματείας Πολιτικής Προστασίας Σχεδιασμού και Αντιμετώπισης Έκτακτων Αναγκών μπορούν να εξαχθούν δυο βασικά συμπεράσματα. Αρχικά, μετά από προσεκτική σύγκριση των δυο απεικονίσεων φαίνεται πως ο δείκτης TWI απεικονίζει με μεγάλη ακρίβεια το υδρογραφικό δίκτυο του νομού επιβεβαιώνοντας την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων του υπολογισμού. Επίσης, με το δείκτη TWI έχουν απεικονιστεί με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια οι πληγείς περιοχές από μια εντελώς διαφορετική φυσική καταστροφή, τις πλημμύρες. Η διαπίστωση αυτή από τη μια αναδεικνύει τη σημασία της απεικόνισης των πληροφοριών σε χάρτες, από την άλλη προβάλλει τις πολυχρηστικές δυνατότητες των επιπέδων πληροφορίας απεικονισμένα σε Σ.Γ.Π.



*Εικόνα 24:* Το τελικό, ομαλοποιημένο επίπεδο πληροφοριών δεδομένων ψηφιδωτής μορφής του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας (TWI) για την περιοχή του νομού Έβρου (αριστερά). Στη δεξιά εικόνα παρουσιάζεται ο χάρτης της Γενικής Γραμματείας Πολιτικής Προστασίας Σχεδιασμού και Αντιμετώπισης Έκτακτων Αναγκών που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της αποτίμησης των πλημμυρισμένων εκτάσεων για τα έτη 2014 και 2015 όπου απεικονίζεται το υδρογραφικό δίκτυο του νομού Έβρου για λόγους σύγκρισης.

Το πλεονέκτημα του δείκτη TWI είναι πως υπολογίζεται από το DEM. Τα ψηφιακά δεδομένα DEM είναι εύκολα προσβάσιμα και αμετάβλητα για μεγάλα χρονικά διαστήματα, έτσι μπορεί να προσεγγιστεί η υγρασία του εδάφους κοντά σε επιφανείς που καλύπτονται από νερό, σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η τακτική πρόσβαση σε μετεωρολογικά δεδομένα. Μειονέκτημα του είναι η σαφώς μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με δείκτες όπως ο FWI που ενσωματώνει τα μεταβαλλόμενα μετεωρολογικά δεδομένα.

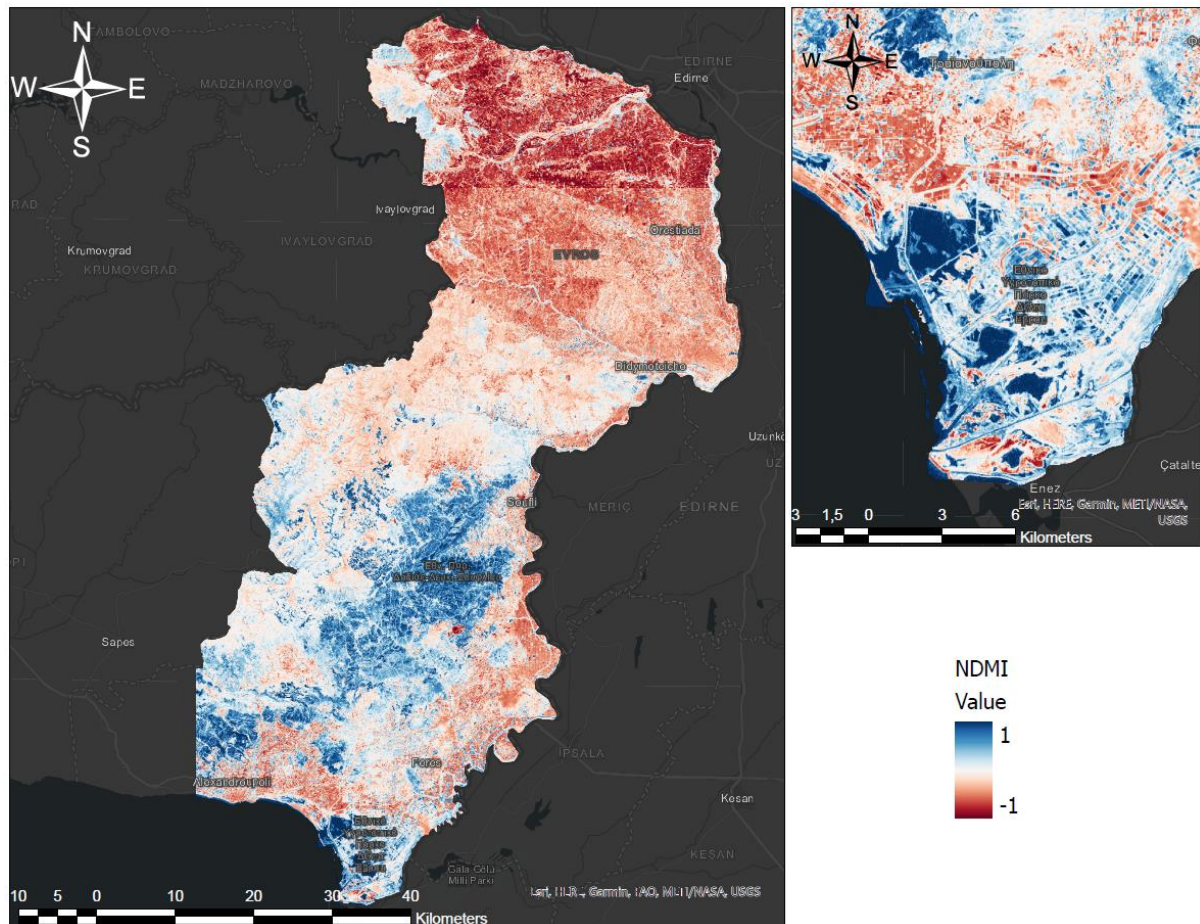


### 5.2.3 Δείκτες υγρασίας NDMI και NDWI

Ο δείκτης **Normalized Difference Moisture Index (NDMI)**, όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.2, λειτουργεί περισσότερο ως δείκτης αναγνώρισης του φυλλώματος της βλάστησης και του νερού. Για τον υπολογισμό του δείκτη χρειάζονται πολυφασματικά δεδομένα τηλεπισκόπησης και συγκεκριμένα δεδομένα στα φασματικά παράθυρα του κοντινού υπέρυθρου (Near Infrared ή NIR) και του υπέρυθρου μικρού μήκους κύματος (Short Wave Infrared ή SWIR). Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής αξιοποιήθηκαν πρόσφατα πολυφασματικά δεδομένα του Sentinel-2A, όπως καταγράφηκαν από τον πολυφασματογράφο MSI. Η πρόσβαση των δεδομένων, όπως και προηγούμενος, έγινε από την ανοικτή βάση δεδομένων του Copernicus και η επιλογή τους έγινε με βασικό κριτήριο τη χαμηλή νεφοκάλυψη (0 έως 1%). Επειδή η περιοχή μελέτης δεν απεικονίζονταν σε μια ενιαία πολυφασματικά εικόνα, έγινε λήψη δυο εικόνων με διαφορά 10 ημερών. Η εικόνα μικρού τμήματος τη βορείας περιοχής της Περιφερειακής Ενότητας του Έβρου είχε ληφθεί στις 21 Νοεμβρίου 2021 και η εικόνα του μεγαλύτερου τμήματος της Περιφερειακής Ενότητας του Έβρου είχε ληφθεί τη 1 Δεκεμβρίου 2021.

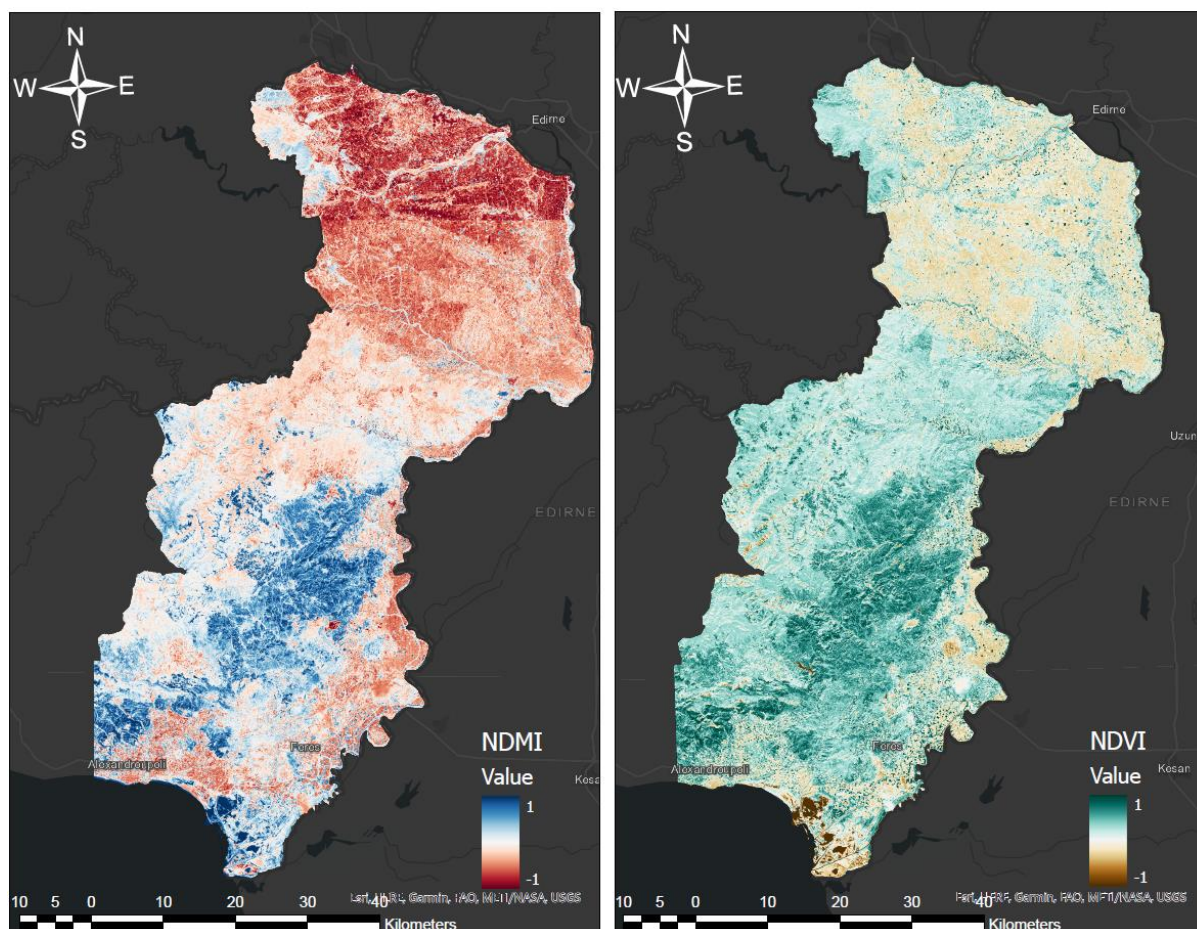
Στη συνέχεια από τις πολυφασματικές εικόνες, επιλέχθηκαν τα δεδομένα στα φασματικά παράθυρα του κοντινού υπέρυθρου (B8A) και του υπέρυθρου μικρού μήκους κύματος (B12) χωρικής ανάλυσης 20m, από τις οποίες απομονώθηκε η περιοχή μελέτης με τη βοήθεια του εργαλείου *Clip Raster*. Το *Clip Raster* είναι ένα από τα βασικότερα εργαλεία των Σ.Γ.Π. που εφαρμόζει μια λειτουργία αποκοπής, έτσι ώστε να διαχωριστούν οι οντότητες από ένα άλλο επίπεδο (επίπεδο επεξεργασίας), στα όρια των οντοτήτων του επιπέδου αποκοπής<sup>[36]</sup>. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το επίπεδο αποκοπής είναι τα όρια του νομού Έβρου και το επίπεδο επεξεργασίας είναι τα επίπεδα των φασματικών καναλιών B8A και B12. Ο υπολογισμός του δείκτη NDMI έγινε από τη σχέση (2), όπου στη θέση του NIR αντικαταστάθηκε το επίπεδο της φασματικής ζώνης B8A και στη θέση του SWIR το επίπεδο της φασματικής ζώνης B12. Η απεικόνιση του δείκτη NDMI παρουσιάζεται στην Εικόνα 25, όπου το μπλε χρώμα απεικονίζει εικονοστοιχεία που αντιστοιχούν σε φύλλωμα βλάστησης ή επιφάνειάς που καλύπτεται από νερό, σύμφωνα με τη διαβαθμισμένη χρωματική κλίμακα του υπομνήματος. Στην δεξιά εικόνα παρουσιάζεται λεπτομέρεια της περιοχής μελέτης, όπου απεικονίζεται το Εθνικό Πάρκο στο Δέλτα Έβρου. Στη περιοχή είναι ορατές τόσο οι επιφάνειες που καλύπτονται από νερό όσο και οι καλλιέργειες με τα χαρακτηριστικά πολύγωνα.





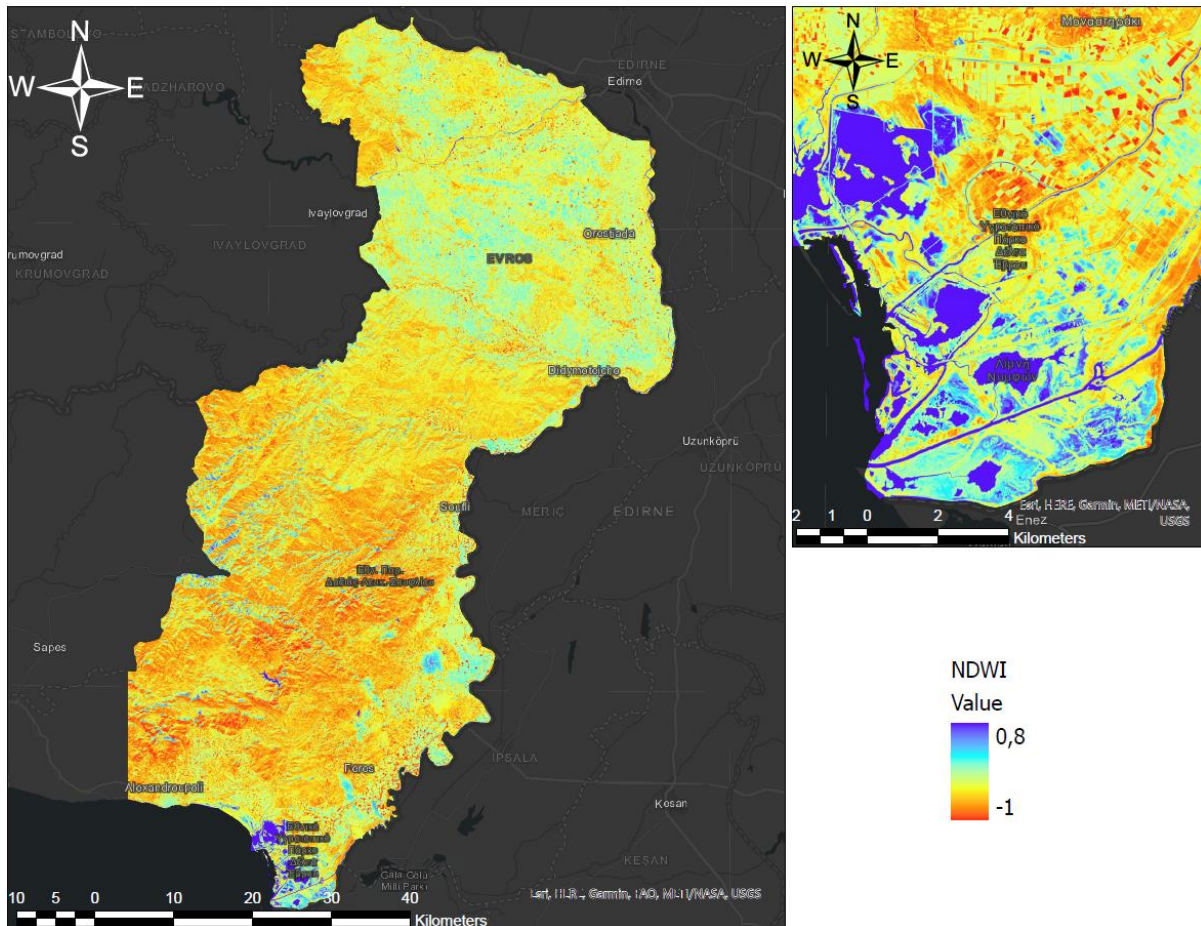
Εικόνα 25: Απεικόνιση του δείκτη Normalized Difference Moisture Index (NDMI) από ανάλυση πολυφασματικών δεδομένων του δορυφόρου Sentinel-2 για τη περιοχή του νομού Έβρου. Στη δεξιά εικόνα παρουσιάζεται το Εθνικό Πάρκο Δέλτα Έβρου, όπου είναι ορατές τόσο οι επιφάνειες που καλύπτονται από νερό όσο και οι καλλιέργειες.

Ο δείκτης NDMI μπορεί μαζί με το νερό να αποτυπώσει τη βλάστηση αναδεικνύοντας περιοχές όπου υπάρχει καύσιμη ύλη, που διαθέτει έντονο πράσινο φύλλωμα. Η απεικόνιση της περιοχής από τον NDMI έχει αρκετά κοινά με τον δείκτη NDVI, που αναλύθηκε προηγούμενος. Για αυτό το λόγο, στη Εικόνα 26 παρουσιάζεται η σύγκριση των δεικτών NDVI (δεξιά) και NDMI (αριστερά). Ο δείκτης NDVI υπολογίστηκε με παρόμοια μεθοδολογία με αυτή που εφαρμόστηκε για τον δείκτη NDMI. Από τις ίδιες πολυφασματικές εικόνες επιλέχθηκαν δεδομένα από τα φάσματα του ορατού κόκκινου (B4) και του εγγύς υπέρυθρου (B8), χωρικής ανάλυσης 10m. Οι περιοχές της βλάστησης σύμφωνα με την απεικόνιση του δείκτη NDVI εμφανίζονται με έντονο πράσινο χρώμα κοντά στη τιμή 1, ενώ με καφέ χρώμα απεικονίζεται το νερό κοντά στη τιμή -1. Οι πράσινες περιοχές συμπίπτουν με τις περιοχές βλάστησης που απεικονίζει ο NDMI με μπλε χρώμα, κυρίως στη περιοχή του Εθνικού Πάρκου Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.



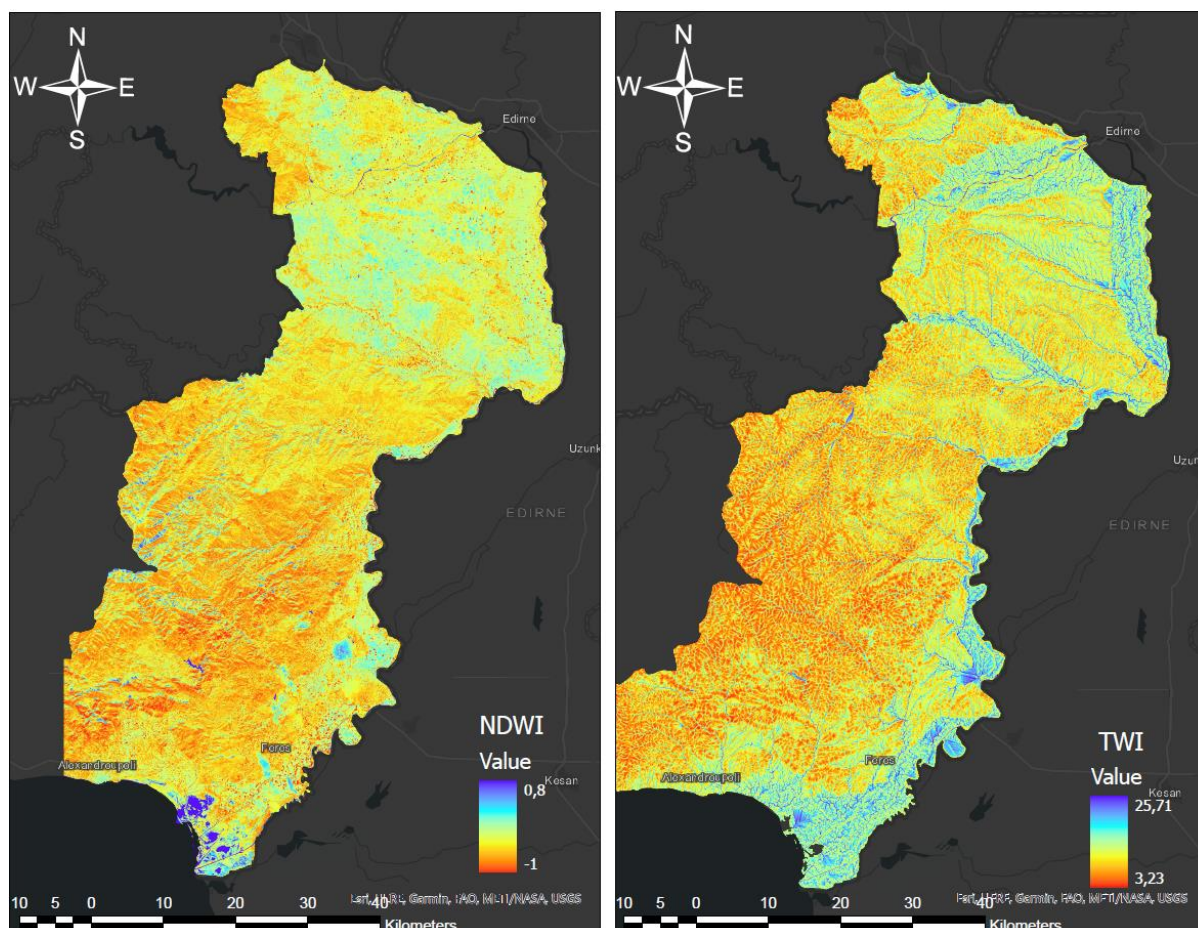
Εικόνα 26: Σύγκριση των δεικτών NDVI (δεξιά) και NDMI (αριστερά), όπως απεικονίζουν την περιοχή μελέτης για τις ίδιες ημερομηνίες.

Ο δείκτης **Normalized Difference Water Index (NDWI)** δίνει τη δυνατότητα αποτύπωσης του νερού που βρίσκεται στην επιφάνεια της γης. Ο δείκτης NDWI υπολογίστηκε με παρόμοια μεθοδολογία με αυτή που εφαρμόστηκε για τους προηγούμενους δείκτες της ενότητας και από τις ίδιες πολυφασματικές εικόνες του δορυφόρου Sentinel-2 της περιοχής του νομού Έβρου (21 Νοεμβρίου 2021 και 1 Δεκεμβρίου 2021). Σύμφωνα με τη σχέση (3) για τον υπολογισμό του NDWI χρειάζονται δεδομένα από τα φασματικά παράθυρα του πράσινου (GREEN) και του εγγύς υπέρυθρου (NIR). Τα δεδομένα αυτά αντιστοιχούν στις φασματικές ζώνες B03 και B08 του πολυφασματογράφου MSI. Τα αποτελέσματα του επίπεδου πληροφοριών δεδομένων κανονικοποιημένης ψηφιδωτής μορφής του δείκτη NDWI παρουσιάζονται στην Εικόνα 27. Οι περιοχές που καλύπτονται από νερό έχουν τιμή κοντά στο 0,8 και παρουσιάζονται με έντονο μπλε χρώμα, ενώ οι άνυδρες περιοχές έχουν τιμές κοντά στο -1 και αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα, σύμφωνα με τη διαβαθμισμένη χρωματική κλίμακα του υπομνήματος. Στη δεξιά εικόνα παρουσιάζεται λεπτομέρεια της περιοχής μελέτης, όπου είναι ορατές οι λίμνες του Εθνικού Πάρκου στο Δέλτα Έβρου.



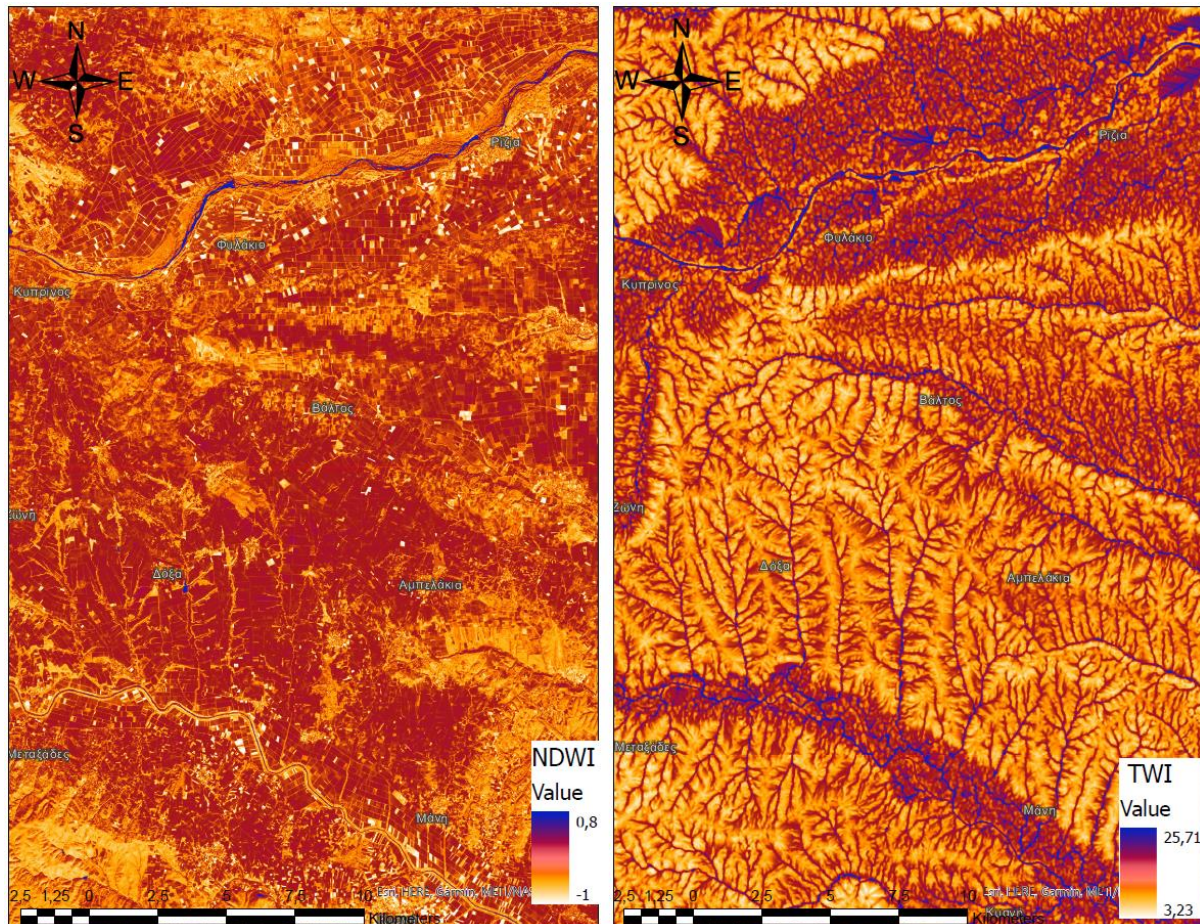
Εικόνα 27: Η απεικόνιση του δείκτη NDWI για την περιοχή μελέτης. Στη δεξιά εικόνα παρουσιάζεται η λεπτομέρεια της περιοχής μελέτης, όπου απεικονίζονται οι λίμνες του Εθνικού Πάρκου Δέλτα Έβρου.

Στο σημείο αυτό έχει ενδιαφέρον να συγκριθεί η πραγματική αποτύπωση των επιφανειών του νερού, για μια δεδομένη χρονική στιγμή, όπως αποτυπώθηκε από τον δείκτη NDWI, με τη εκτίμηση της συγκέντρωσης νερού από τη κλίση του εδάφους, όπως αποτυπώθηκε από τον δείκτη TWI. Στην Εικόνα 28 παρουσιάζονται τα επίπεδα πληροφοριών του δείκτη NDWI (δεξιά) και TWI (αριστερά). Στις δύο απεικονίσεις τα κόκκινα εικονοστοιχεία αντιστοιχούν σε ξηρές περιοχές, ενώ τα έντονα μπλε εικονοστοιχεία αντιστοιχούν σε περιοχές που καλύπτονται από νερό.



Εικόνα 28: Σύγκριση των επιπέδων πληροφορίας δεδομένων κανονικοποιημένης ψηφιδωτής μορφής του δείκτη NDWI (δεξιά) και TWI (αριστερά).

Η εκτίμηση του TWI συμπίπτει αρκετά με δείκτη NDWI, ιδιαίτερα για στην ορεινή περιοχή γύρω από το Εθνικό Πάρκο Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου. Οι μεγαλύτερες διαφορές εντοπίζονται στο βόρειο τμήμα του νομού. Η περιοχή είναι πεδινή και υπάρχουν μεγάλες εκτάσεις καλλιεργειών. Η χρήση της γης στη περιοχή, όπως είναι αναμενόμενο, μεταβάλλει σημαντικά τα αποτελέσματα της πραγματικής παρουσίας νερού από τη πρόβλεψη που δίνει ο δείκτης TWI. Στην Εικόνα 29 έχουν αποτυπωθεί η γεωγραφική έκταση ανάμεσα στους ποταμούς Άρδα και Ερυθροπόταμο. Για την απεικόνιση των περιοχών έχει χρησιμοποιηθεί διαφορετική χρωματική απόχρωση που αποτυπώνει με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια τη παρουσία νερού, ενώ στη αριστερή εικόνα αναδεικνύονται οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις με τα χαρακτηριστικά πολύγωνα που σχηματίζουν.



Εικόνα 29: Η γεωγραφική έκταση ανάμεσα στους ποταμούς Άρδα και Ερυθροπόταμο όπως αποτυπώνεται από το δείκτη NDWI και του TWI.

### 5.3 Απεικόνιση ανάγλυφου σε Σ.Γ.Π.

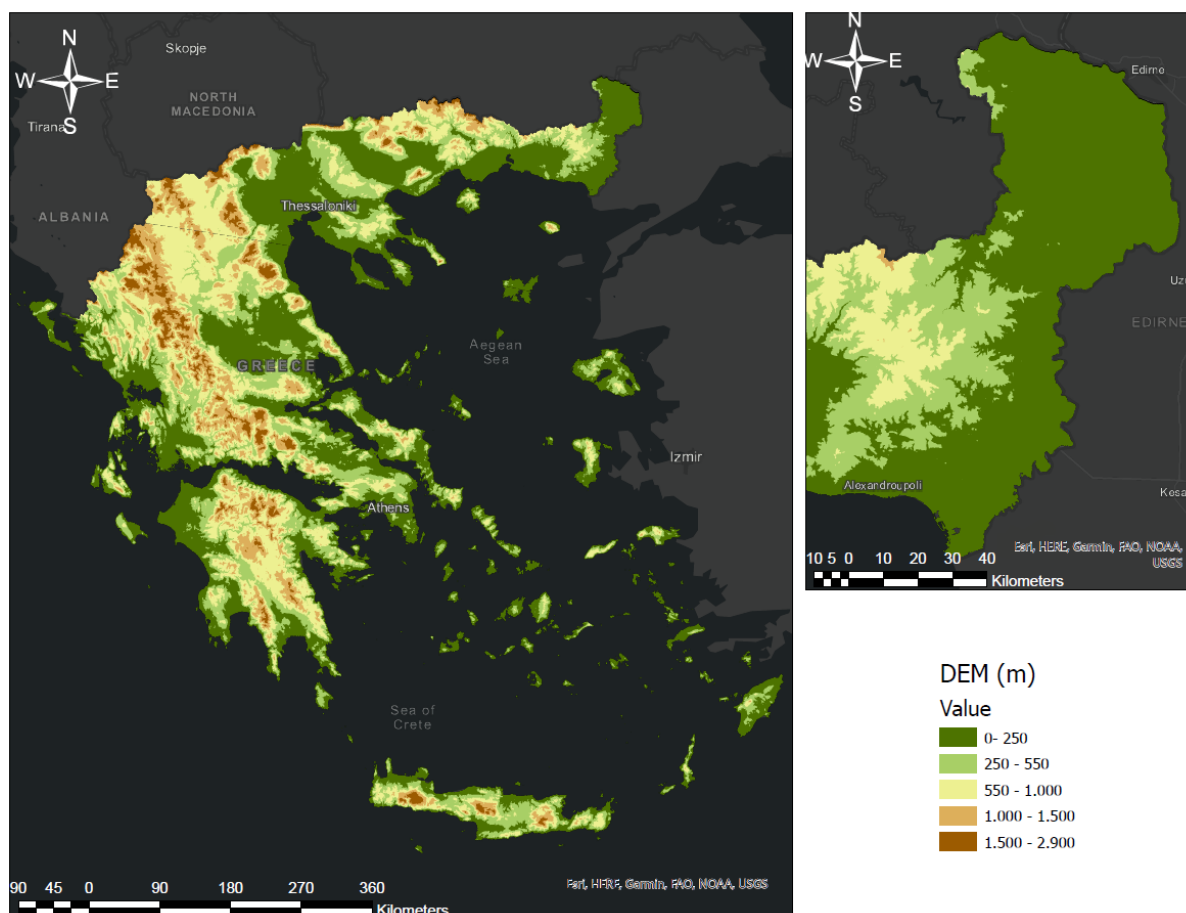
Η τοπογραφία μιας περιοχής επιδρά σημαντικά στον κίνδυνο πυρκαγιάς με τρεις βασικές παραμέτρους το υψόμετρο (elevation), την κλίση του εδάφους (slope) και τον προσανατολισμό του εδάφους (aspect). Οι παράμετροι αυτοί διαμορφώνουν τον κίνδυνο πυρκαγιάς τόσο από το τρόπο που χωροθετείται η καύσιμη ύλη όσο και από την επίδραση τους στην περιεκτικότητα της καύσιμης ύλης σε υγρασία. Περιοχές σε χαμηλό υψόμετρο ή πλάγιες προσανατολισμένες στα νότια και δυτικά δέχονται μεγαλύτερο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας συγκριτικά με τους άλλους προσανατολισμούς (βόρειο ημισφαίριο)<sup>[17]</sup>, με αποτέλεσμα η καύσιμη ύλη στις περιοχές αυτές να εμφανίζει μικρότερη περιεκτικότητα υγρασίας. Η αποτύπωση των τοπογραφικών παραγόντων κινδύνου πυρκαγιάς σε Σ.Γ.Π γίνεται συνήθως με την ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Digital Elevation Model ή DEM) της περιοχής.

Για την ανάλυση του υψόμετρου, της κλίσης του εδάφους και του προσανατολισμού του εδάφους σε όλη την Ελλάδα έγινε από τα δεδομένα του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της Ευρώπης που προέρχονται από την ιστοσελίδα του Copernicus. Τα επίπεδα πληροφορίας δεδομένων κανονικοποιημένης ψηφιδωτής μορφής που περιέχουν την Ελλάδα είναι δύο και έχουν κωδικούς E50N20 (βόρειο τμήμα Ελλάδας) και E50N10 (νότιο τμήμα Ελλάδας). Τα δεδομένα είναι χωρικής ανάλυσης 25x25m και το σύστημα συντεταγμένων του DEM είναι το ETRS89 ETRS LAEA.



### 5.3.1 Απεικόνιση ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM)

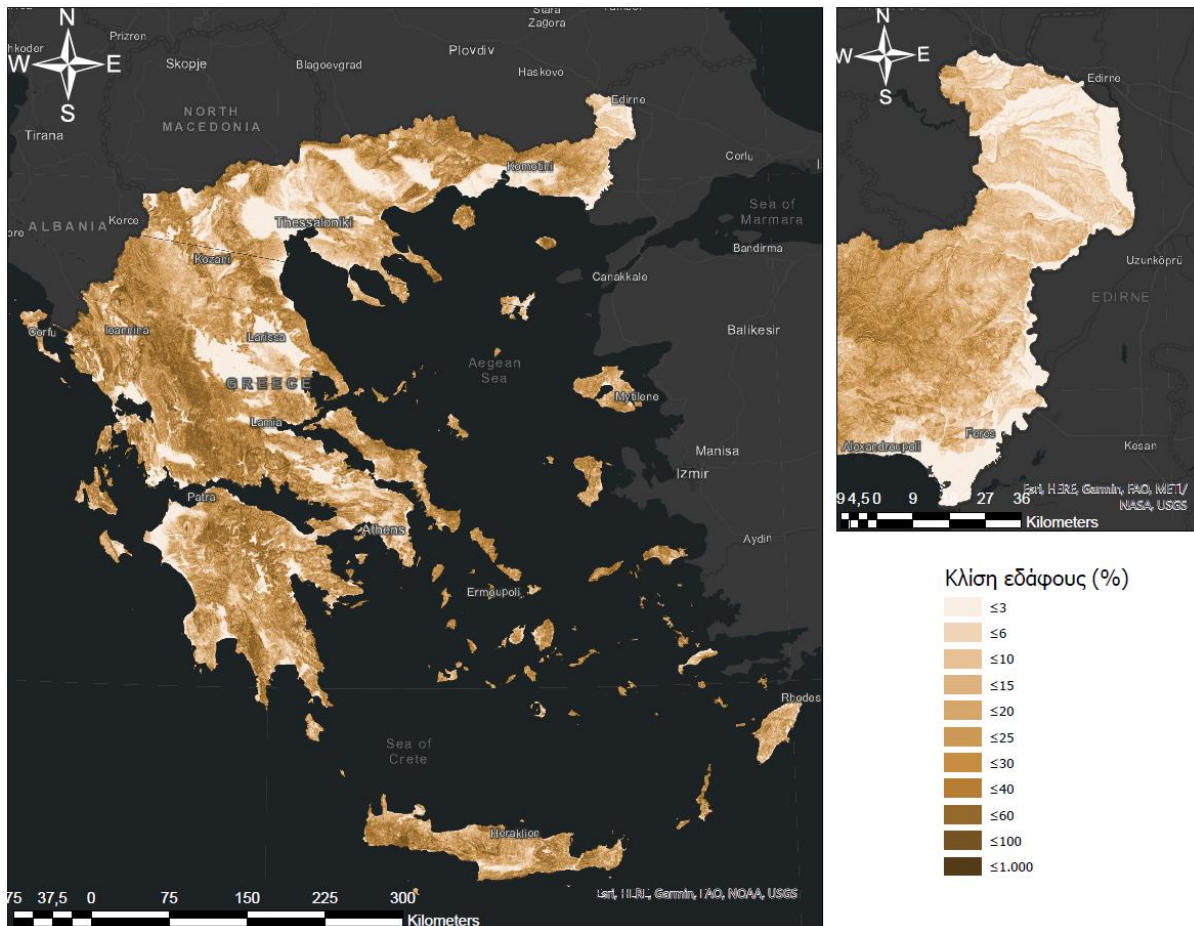
Η απεικόνιση του DEM σε Σ.Γ.Π. δεν χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση, πέρα από την αποκοπή του τμήματος ενδιαφέροντος, που στην προκειμένη περίπτωση είναι η Ελλάδα. Το DEM της Ελλάδας παρουσιάζεται στην Εικόνα 30, όπου το υψόμετρο αναγράφεται σε μέτρα. Στην Εικόνα 30 οι περιοχές υψηλού υψομέτρου εμφανίζονται με εικονοστοιχεία έντονου καφέ χρώματος, ενώ οι περιοχές χαμηλού υψομέτρου εμφανίζονται με εικονοστοιχεία πράσινων αποχρώσεων σύμφωνα με τη χρωματική κλίμακα 5 διαβαθμίσεων του υπομνήματος. Στην λεπτομέρεια της εικόνας δεξιά έχει αποτυπωθεί η περιοχή του νομού Έβρου της προηγούμενης ενότητας για λόγους πληρότητας και συγκρίσεων.



Εικόνα 30: Το DEM της Ελλάδας αποτυπωμένο σε Σ.Γ.Π. σε μέτρα (m). Στην λεπτομέρεια της εικόνας δεξιά έχει αποτυπωθεί η περιοχή μελέτης του νομού Έβρου. [Πηγή: Copernicus, EU-DEM]

### 5.3.2 Απεικόνιση της κλίσης του εδάφους (slope)

Η μεθοδολογία του υπολογισμού της κλίσης του εδάφους αναλύθηκε στη Υποενότητα 5.2.2, στα πλαίσια του υπολογισμού του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας (TWI). Η διαδικασία είναι ακριβώς η ίδια μόνο που στη περίπτωση αυτή η ανάλυση καλύπτει μεγαλύτερη έκταση. Η κλίση του εδάφους της Ελλάδας σε ποσοστό παρουσιάζεται την Εικόνα 31, όπου τα σκουρόχρωμα εικονοστοιχεία αντιστοιχούν σε περιοχές με μεγάλες κλίσεις ενώ τα ανοιχτόχρωμα εικονοστοιχεία αντιστοιχούν σε περιοχές με μικρές κλίσεις, σύμφωνα με το υπόμνημα. Στην λεπτομέρεια της Εικόνα 31 δεξιά έχει αποτυπωθεί η περιοχή μελέτης του νομού Έβρου ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση με την Εικόνα 23. Αναμενόμενα τα αποτελέσματα είναι ίδια.



Εικόνα 31: Η κλίση του εδάφους (Slope) για την Ελλάδα (αριστερά) και το νομό Έβρου (δεξιά).

### 5.3.3 Απεικόνιση του προσανατολισμού του εδάφους (aspect)

Ο **προσανατολισμός του εδάφους** υπολογίζεται από τα δεδομένα του DEM. Το αποτέλεσμα του υπολογισμού είναι η χρωματική διαβάθμιση των εικονοστοιχείων ανάλογα με τη διεύθυνση της κλίσης. Ο υπολογισμός έγινε για κάθε εικονοστοιχείο με τη βοήθεια του ομώνυμου εργαλείου *Aspect*. Το εργαλείο εφαρμόζει μια λειτουργία γειτονίας (focal), υπολογίζοντας για κάθε εικονοστοιχείο το γειτονικό του προς το οποίο εμφανίζει το μέγιστο ρυθμό μεταβολής της τιμής του ύψους. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα εικονοστοιχεία του DEM και το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα επίπεδο πληροφορίας δεδομένων ψηφιδωτής μορφής που δείχνει το προσανατολισμό του εδάφους. Εάν υποθέσουμε πως το κεντρικό εικονοστοιχείο ενδιαφέροντος, που θα υπολογιστεί ο προσανατολισμός του εδάφους είναι το ψ, τότε μαζί με τα γειτονικά εικονοστοιχεία έχουμε τη μορφή του Πίνακα 7, όπου στα γειτονικά εικονοστοιχεία έχουν δοθεί ονόματα από τα γράμματα του αγγλικού αλφαβήτου σχηματίζοντας ένα πλέγμα 3x3.

a	b	c
d	ψ	f
g	h	i

Πίνακας 7: Το κεντρικό εικονοστοιχείο ενδιαφέροντος ψ μαζί με τα γειτονικά εικονοστοιχεία στα οποία έχουν δοθεί ονόματα από τα γράμματα του αγγλικού αλφαβήτου. [Πηγή: ESRI]

Για το εικονοστοιχείο ψ χρειάζεται να υπολογιστεί η εφαπτομένη του λόγου των ρυθμών μεταβολής κατά τις διευθύνσεις -x και y. Ο ακριβής υπολογισμός γίνεται από τη σχέση



$$\text{Aspect} = \frac{180}{\pi} * \arctan\left(\frac{-dz/dx}{dz/dy}\right)$$

Ο υπολογισμός των ρυθμών μεταβολής γίνεται με παρόμοιο τρόπο με αυτό που παρουσιάστηκε κατά την ανάλυση της κλίσης του εδάφους στην Υποενότητα 5.2.2. Συγκεκριμένα για τη διεύθυνση x

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\frac{(c + 2f + i) * 4}{\text{weight1}} - \frac{(a + 2d + g) * 4}{\text{weight2}}}{8}$$

Όπου c, f, i, a, d και g αντικαθίστανται από τις τιμές του υψομέτρου των αντίστοιχων εικονοστοιχείων του DEM σύμφωνα με τον Πίνακα 7 και τα βάρη weight1 και weight2 δίνονται από τις σχέσεις

Weight1= (c+2\*f+i) όπου τα εικονοστοιχεία c, f και i παίρνουν τιμές 1 ή 0 ανάλογα εάν είναι έγκυρα ή όχι

Weight2= (a+2\*d+g) όπου τα εικονοστοιχεία a, d και g παίρνουν τιμές 1 ή 0 ανάλογα εάν είναι έγκυρα ή όχι

Παρόμοια υπολογίζεται και η μεταβολή dz/dy για τη διεύθυνση y αντικαθιστώντας στις σχέσεις τα κατάλληλα εικονοστοιχεία.

$$\frac{dz}{dy} = \frac{\frac{(g + 2h + i) * 4}{\text{weight3}} - \frac{(a + 2b + c) * 4}{\text{weight4}}}{8}$$

Όπου τα βάρη Weight3 και Weight4 υπολογίζονται εντελώς ανάλογα με αυτά της διεύθυνσης x.

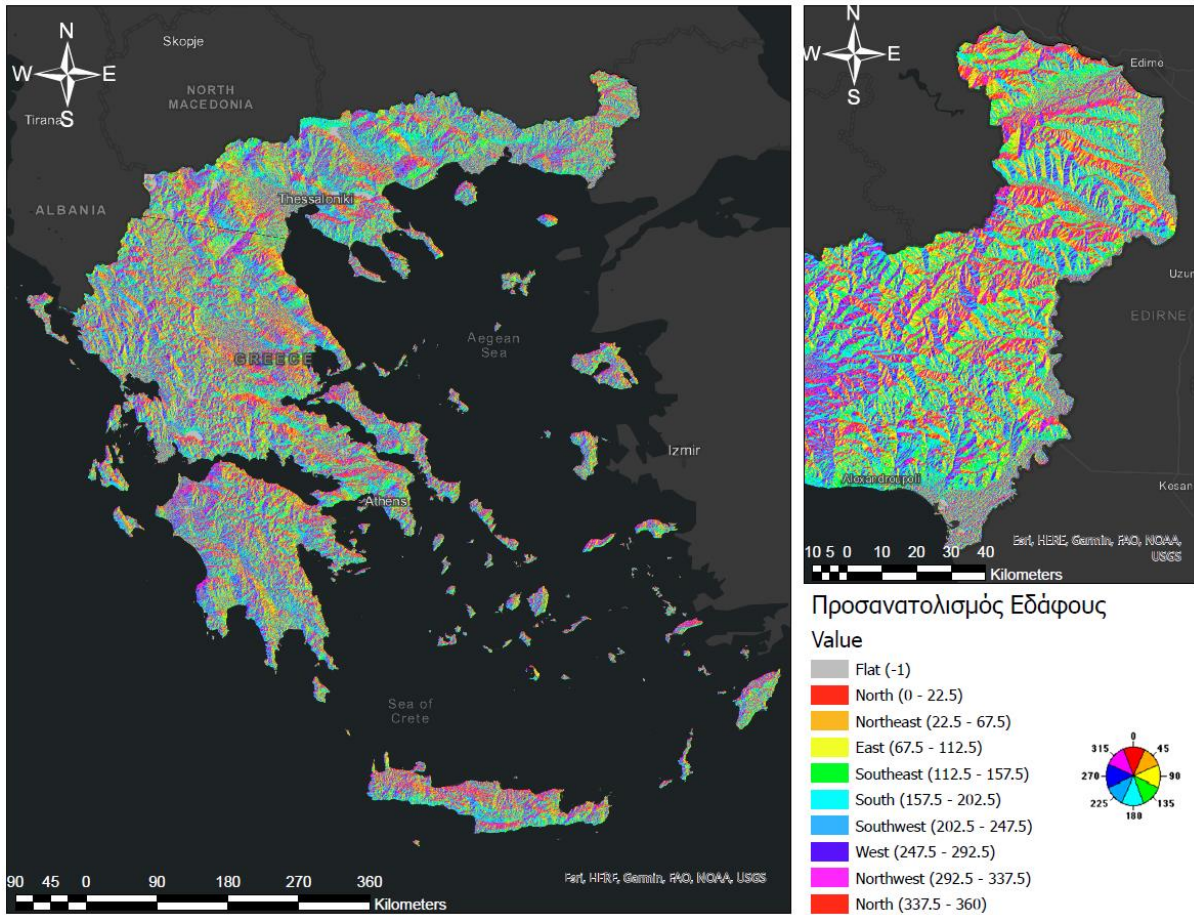
Στη συνέχεια τα αποτελέσματα του υπολογισμού του προσανατολισμού μεταφράζονται σε τιμές κατεύθυνσης πυξίδας που περνούν τιμές από 0 έως 360 μοίρες σύμφωνα με την Εικόνα 32<sup>[35]</sup>. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε ένα εικονοστοιχείο του DEM της Ελλάδας.



*Εικόνα 32: Η χρωματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης προσανατολισμού του εδάφους, όπου οι τελικές τιμές μεταφράζονται σε κατευθύνσεις πυξίδας που περνούν τιμές από 0 έως 360 μοίρες [Πηγή: ESRI]*

Η τελική απεικόνιση του επιπέδου πληροφορίας δεδομένων ψηφιδωτής μορφής του προσανατολισμού του εδάφους παρουσιάζεται στην Εικόνα 33. Η χρωματική διαβαθμισή αντιστοιχεί σε μοίρες κατευθύνσεων πυξίδας σύμφωνα με το υπόμνημα. Στην λεπτομέρεια της εικόνας δεξιά έχει αποτυπωθεί η περιοχή του νομού Έβρου.





Εικόνα 33: Ο προσανατολισμός του εδάφους (Aspect) για την Ελλάδα (αριστερά) και το νομό Έβρου (δεξιά).



## 5.4 Απεικόνιση των Κλιματικών-Μετεωρολογικών παραγόντων κινδύνου σε Σ.Γ.Π.

Οι βασικότεροι κλιματικοί-μετεωρολογικοί παράγοντες κινδύνου είναι η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η συχνότητα των βροχοπτώσεων και η ξηρασία. Η μείωση των βροχοπτώσεων σε συνδυασμό με τη ξηρασία επιδρούν έμμεσα στο κίνδυνο πυρκαγιάς αλλάζοντας τη κατάσταση της καύσιμης ύλης. Αντίθετα, η θερμοκρασία και ο άνεμος επιδρούν άμεσα και έμμεσα. Η υψηλή θερμοκρασία του εδάφους ευνοεί την ανάφλεξη της καύσιμης ύλης (άμεση επίδραση), ενώ παράλληλα επιδρά αρνητικά στη κατάσταση της καύσιμης ύλης μειώνοντας την υγρασία (έμμεση επίδραση). Ο άνεμος κατά κύριο λόγο καθορίζει τη κατεύθυνση διάδοσης της πυρκαγιάς, συντηρεί τη φωτιά παρέχοντας οξυγόνο, δημιουργεί συνθήκες ανάφλεξης (άμεση επίδραση) και συμβάλει στη μείωση της υγρασίας της καύσιμης ύλης (έμμεση επίδραση)<sup>[16,17]</sup>.

Η παρούσα ενότητα θα εστιάσει στη απεικόνιση των άμεσων μετεωρολογικών (μικρής και μέσης χρονικής και χωρικής κλίμακας) παραγόντων κινδύνου, δηλαδή της θερμοκρασίας (από τη θερμική ακτινοβολία) και του ανέμου. Οι παράγοντες της θερμοκρασίας και του ανέμου μεταβάλλονται δυναμικά τόσο μέσα στη μέρα όσο και κατά τη διάρκεια του έτους. Η πρόβλεψή τους αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία που γίνεται με ατμοσφαιρικά μοντέλα, ενώ η καταγραφή τους γίνεται κυρίως από μετεωρολογικούς σταθμούς.

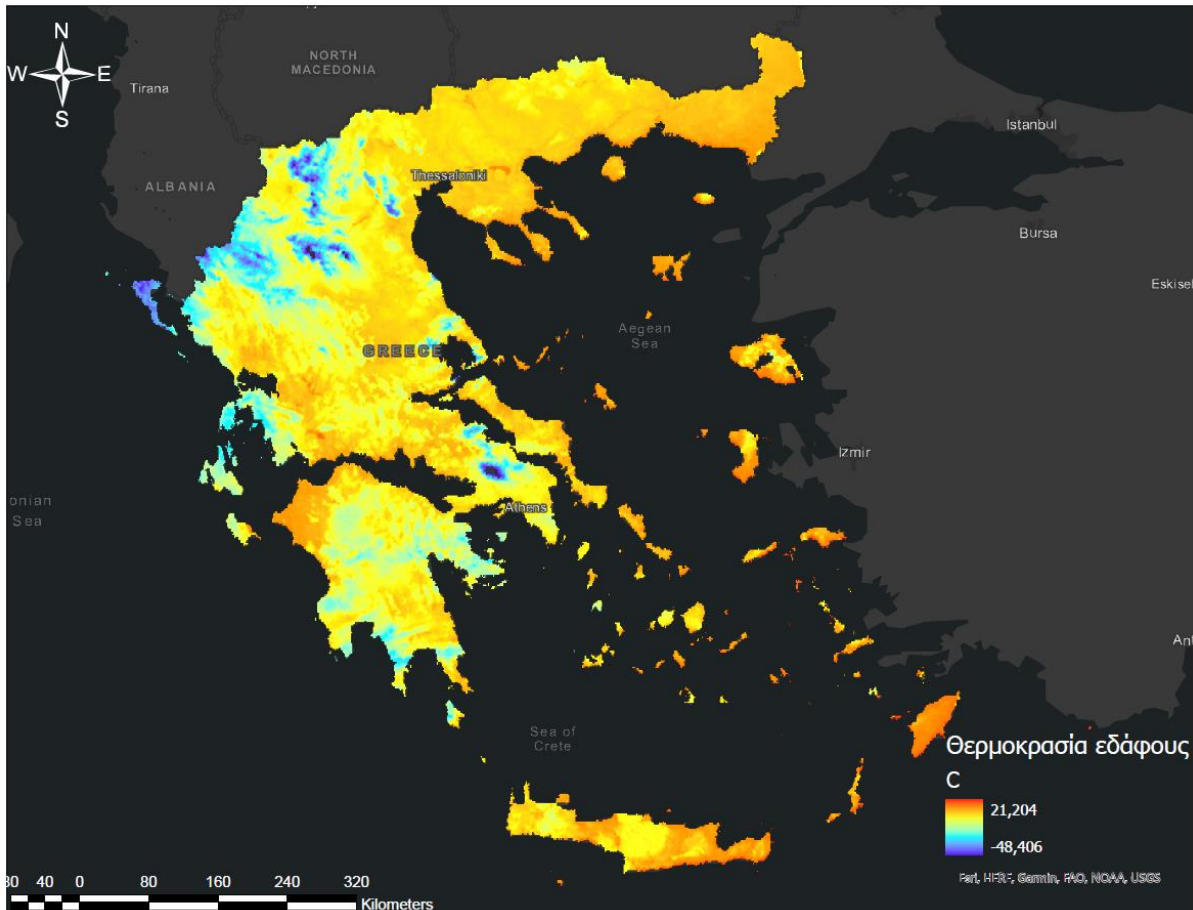
### 5.4.1 Απεικόνιση της θερμικής ακτινοβολίας από δορυφορικά δεδομένα

Οι δορυφορικές εικόνες δίνουν τη δυνατότητα απεικόνισης της επιφανειακής θερμοκρασίας που οφείλεται στην υπέρυθη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σχετικά μεγάλου μήκους κύματος ( $0.1\mu\text{m} < \lambda < 100\mu\text{m}$ ). Συγκεκριμένα, ο δορυφόρος Sentinel-3 του προγράμματος Copernicus δίνει τη δυνατότητα άμεσης απεικόνισης της επιφανειακής θερμοκρασίας (από θερμική ακτινοβολία) σε Σ.Γ.Π. από τις μετρήσεις του ραδιόμετρου Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR) χωρικής ανάλυσης 1km (Συμπλήρωμα 3). Ο SLSTR διαθέτει 11 κανάλια που συλλέγουν δεδομένα διαφορετικού μήκους κύματος, διασφαλίζοντας τη συνέχεια των δεδομένων που παράγει. Τα 9 κανάλια λειτουργούν στα μήκη κύματος  $0,555\mu\text{m}$  (S1),  $0,660\mu\text{m}$  (S2),  $0,870\mu\text{m}$  (S3),  $1,375\mu\text{m}$  (S4),  $1,6\mu\text{m}$  (S5),  $2,25\mu\text{m}$  (S6),  $3,74\mu\text{m}$  (S7),  $10,8\mu\text{m}$  (S8) και  $12\mu\text{m}$  (S9). Παράλληλα, διαθέτει 2 κανάλια στα μήκη κύματος  $3,7\mu\text{m}$  (F1) και  $10,8\mu\text{m}$  (F2), που συμβάλουν στη παρακολούθηση των πυρκαγιών<sup>[105]</sup>.

Στο κεφάλαιο μελετήθηκαν δορυφορικές εικόνες του Sentinel-3 που απεικονίζουν την επιφάνεια της Ελλάδας σε διαφορετικές εποχές του χρόνου (Χειμώνα και Καλοκαίρι). Η πρόσβαση στις δορυφορικές εικόνες έγινε από τη βάση δεδομένων του Copernicus Land Monitoring. Βασικό κριτήριο της επιλογής των εικόνων ήταν το χαμηλό ποσοστό νεφοκάλυψης, ώστε να απεικονίζεται όσο το δυνατόν καλύτερα η επιφάνεια της γης. Η χειμερινή εικόνα λήφθηκε στις 10 Δεκέμβριου 2021 την ώρα 20:07 και οι καλοκαιρινές εικόνες στις 7 Αυγούστου 2021 την ώρα 20:09 και στις 9 Αυγούστου 2021 την ώρα 08:39. Οι δορυφορικές εικόνες προβάλλονται σε Σ.Γ.Π. με τη μορφή επιπέδων πληροφορίας δεδομένων ψηφιδωτής μορφής. Από την ευρύτερη περιοχή απεικόνισης των δεδομένων του Sentinel-3, απομονώθηκε η Ελλάδα με τη βοήθεια του κατάλληλου εργαλείου. Στα δεδομένα μετατράπηκαν οι μετρήσεις από Kelvin σε βαθμούς κελσίου με την απλή σχέση  $T(^{\circ}\text{C})=T(\text{K})-273.15$ .

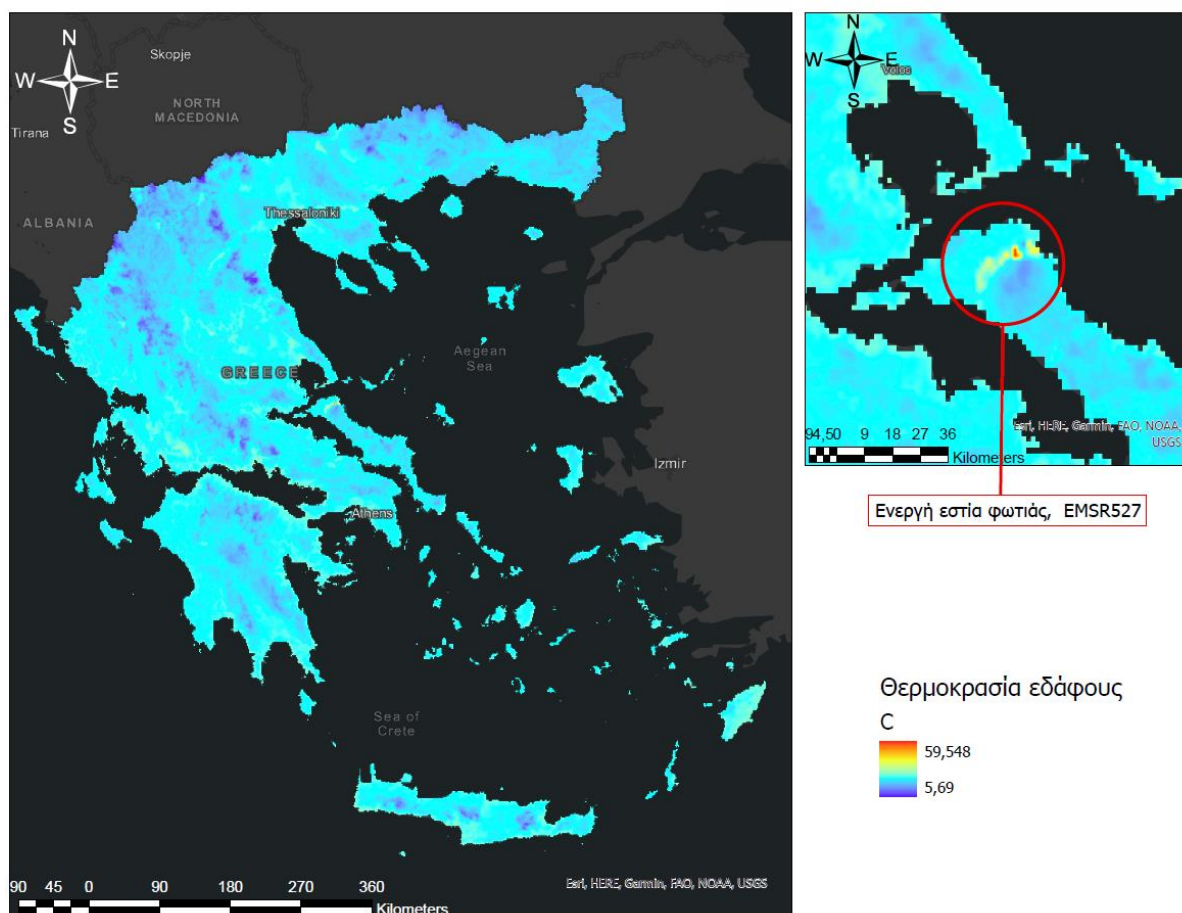
Στην Εικόνα 34 παρουσιάζεται η αποτύπωση της θερμοκρασίας του εδάφους (θερμική ακτινοβολία) στις 10 Δεκέμβριου 2021 την ώρα 20:07, όπως την κατέγραψε ο δορυφόρος Sentinel-3. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα, με τη μέγιστη να

φτάνει τους 21.204 °C. Οι ψυχρές θερμοκρασίες αποτυπώνονται με μπλε χρώμα και η ελάχιστη φτάνει τους -48,406 °C σύμφωνα με το υπόμνημα. Η ακραία χαμηλή τιμή οφείλεται στη παρουσία ψυχρών νεφών που είναι ορατά στον χάρτη με έντονο μπλε χρώμα.



Εικόνα 34: Αποτύπωση της θερμοκρασίας του εδάφους, από τη θερμική ακτινοβολία, της Ελλάδας στις 10 Δεκέμβριου 2021 την ώρα 20:07, όπως την κατέγραψε ο δορυφόρος Sentinel-3.

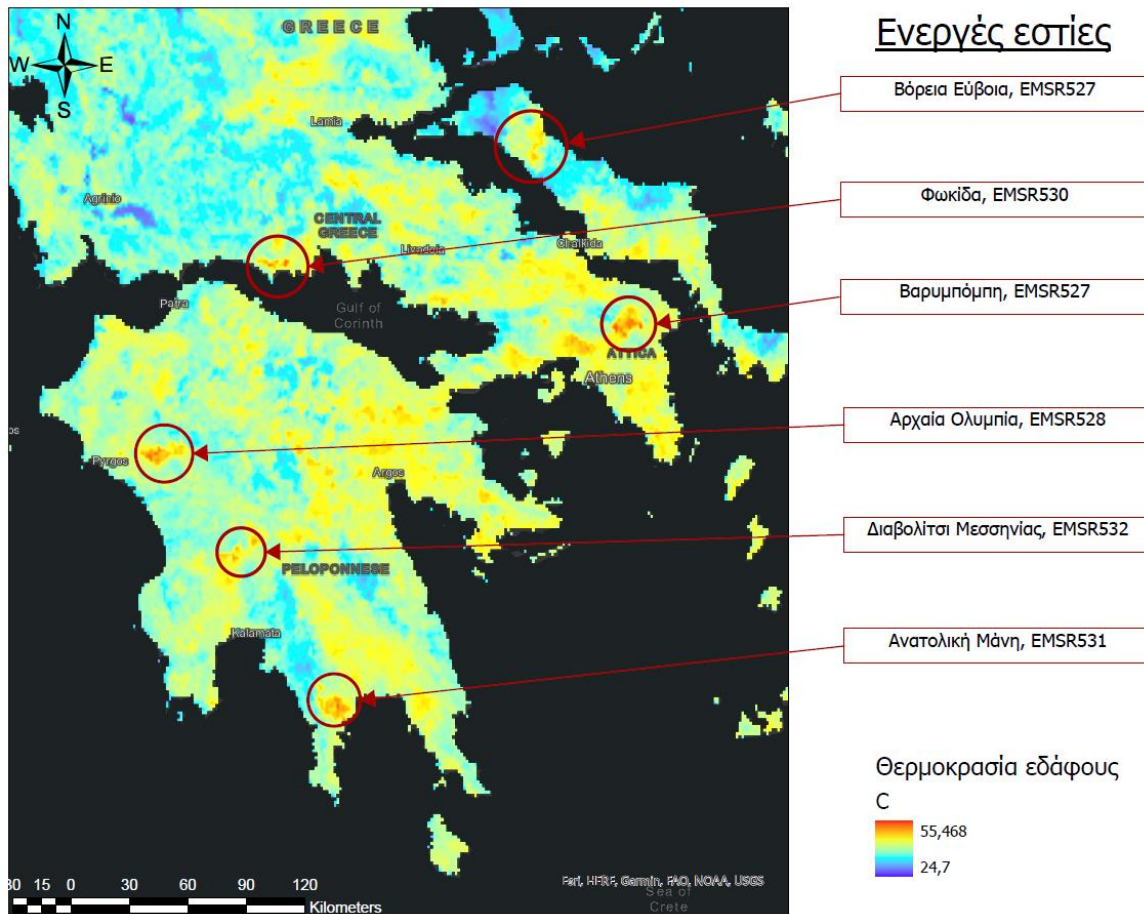
Στην Εικόνα 35 παρουσιάζεται η αποτύπωση της θερμοκρασίας του εδάφους, από τη θερμική ακτινοβολία, της Ελλάδας στις 7 Αυγούστου 2021 την ώρα 20:09, όπως την κατέγραψε ο δορυφόρος Sentinel-3. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα, με τη μέγιστη να φτάνει τους 59.548 °C. Οι ψυχρές θερμοκρασίες απεικονίζονται με μπλε χρώμα και η ελάχιστη φτάνει τους 5.69 °C. Οι ακραίες υψηλές τιμές θερμοκρασίας αντιστοιχούν στην ενεργή εστία φωτιάς στη βόρεια Εύβοια με κωδικό ενεργοποίησης EMSR527 της διαχείρισης εκτάκτων αναγκών του Copernicus (EMSR), όπως φαίνεται στην εστιασμένη δεξιά εικόνα<sup>[40]</sup>.



*Εικόνα 35: Αποτύπωση της θερμοκρασίας του εδάφους, από τη θερμική ακτινοβολία, της Ελλάδας στις 7 Αυγούστου 2021 την ώρα 20:09, όπως την κατέγραψε ο δορυφόρος Sentinel-3.*

Στην Εικόνα 36 παρουσιάζεται η αποτύπωση της θερμική ακτινοβολία, για ένα τμήμα της Ελλάδας στις 9 Αυγούστου 2021 την ώρα 08:39. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα, με τη μέγιστη να φτάνει τους 55,468 °C. Οι ψυχρές θερμοκρασίες αποτυπώνονται με μπλε χρώμα και η ελάχιστη φτάνει τους 24,7 °C. Οι ακραίες υψηλές τιμές θερμοκρασίας αντιστοιχούν σε διάφορες ενεργές εστίες πυρκαγιών στην Ελλάδα. Συγκεκριμένα στην Εικόνα 36 δεξιά<sup>[40]</sup> εμφανίζονται οι πυρκαγιές:

- στη βόρεια Εύβοια με κωδικό ενεργοποίησης EMSR527 της διαχείρισης εκτάκτων αναγκών του Copernicus (EMSR)
- στη Βαρυμπόμπη με κωδικό ενεργοποίησης EMSR527
- στη Φωκίδα με κωδικό ενεργοποίησης EMSR530
- στη Αρχαία Ολυμπία με κωδικό ενεργοποίησης EMSR528
- στο Διαβολίτσι Μεσσηνίας με κωδικό ενεργοποίησης EMSR532
- στην ανατολική Μάνη με κωδικό ενεργοποίησης EMSR531.



Εικόνα 36: Αποτύπωση της θερμοκρασίας του εδάφους, από τη θερμική ακτινοβολία και των ενεργών εστιών πυρκαγιών για ένα τμήμα της Ελλάδας στις 9 Αυγούστου 2021 την ώρα 08:39, όπως την κατέγραψε ο δορυφόρος Sentinel-3. [Πηγή: Emergency Response Coordination Centre (ERCC), ECHO Daily Map of 06 August 2021]

### Συμπλήρωμα 3: Δεδομένα των δορυφόρων Sentinel 3

Ο αστερισμός των δορυφόρων **Sentinel-3** αποτελείται από τον Sentinel-3A που τέθηκε σε τροχιά το 2016 και τον Sentinel-3B που τέθηκε σε τροχιά το 2018, ενώ στο πρόγραμμα αναμένεται να ενταχθούν στο μέλλον οι δορυφόροι Sentinel-3C και Sentinel-3D. Οι δύο δορυφόροι βρίσκονται σε ηλιοσύνχρονη πολική τροχιά σε ύψος 800km και είναι εφοδιασμένοι με μια ποικιλία αισθητήρων

- **SLSTR** (Sea and Land Surface Temperature Radiometer)
- **OLCI** (Ocean and Land Color Instrument)
- **SRAL** (Synthetic Aperture Radar Altimeter)
- **DORIS** (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)
- **MWR** (Microwave Radiometer)



#### 5.4.2 Απεικόνιση του ανέμου με εφαρμογή χωρικής παρεμβολής

Τα μετεωρολογικά δεδομένα είναι πιο εύκολα προσβάσιμα από μετεωρολογικούς σταθμούς που είναι τοποθετημένοι σε διάφορα σημεία της χώρας. Επομένως, τα δεδομένα αυτά μπορούν να αναπαρασταθούν με γεωγραφικά καθορισμένα σημεία που αποτυπώνουν πληροφορίες για μετεωρολογικές παραμέτρους. Οι πληροφορίες αυτές μπορεί να είναι μελλοντικές προβλέψεις, μέσες τιμές ή μετρήσεις που έχουν γίνει στο παρελθόν. Όλα αυτά τα δεδομένα είναι εξαιρετικά σημαντικά για τη διαχείριση κινδύνου των πυρκαγιών, η μορφή όμως που είναι συνήθως προσβάσιμα (σημειακά) δεν είναι εύκολο να ενσωματωθούν σε μοντέλα διαχείρισης και αναγνώρισης κινδύνου. Επομένως, έχει μεγάλη σημασία η μελέτη μοντέλων με τα οποία μπορεί να εκτιμηθεί μια συνεχή επιφάνεια τιμών, των μετρολογικών παραμέτρων, που καλύπτει μια συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος.

Στο παρόν κεφάλαιο θα εφαρμοστεί χωρική παρεμβολή για να εκτιμηθεί το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου της Ελλάδας με βάση σημειακές μετρήσεις της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου, ανεμολογικών ιστών που βρίσκονται σε διάφορα σημεία της χώρας. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από τη βάση δεδομένων της Ρυθμιστική Αρχής ενέργειας (ΡΑΕ). Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις προέρχονται από ανεμολογικούς ιστούς που είναι τοποθετημένοι σε διάφορα σημεία της χώρας και βρίσκονται σε ύψος μικρότερο των 45m από το έδαφος<sup>[41]</sup>. Η παρούσα μελέτη αποτελεί μια ενδεικτική εφαρμογή της χωρικής παρεμβολής για την εκτίμηση του μέσου προφίλ της ταχύτητας του ανέμου της Ελλάδας. Στόχος είναι να αναγνωριστούν οι περιοχές υψηλών ταχυτήτων του ανέμου, οι οποίες δυνητικά θα βρίσκονται σε μεγαλύτερο κίνδυνο πυρκαγιών.

Η ταχύτητα του ανέμου, μέσα στο οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας (ΑΟΣ), μεταβάλλεται σημαντικά με το ύψος. Επομένως, χρειάζεται να μετασχηματιστούν τα δεδομένα του ανέμου σε τιμές που θα είχαν σε ένα ενιαίο ύψος. Όπως έχει αναφερθεί η επιφάνεια του εδάφους επηρεάζει σημαντικά την οριζόντια κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου στο κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας (ΑΟΣ). Η σχέση που συνδέει τον άνεμο με το ύψος στο ΑΟΣ είναι λογαριθμική (εμπειρική), όμως στη περίπτωση που έχουμε μετρήσεις άνω των 10m μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια διαφορετική εμπειρική σχέση που συνδέει τα δυο μεγέθη. Συγκεκριμένα η οριζόντια κατανομή του ανέμου δίνεται από την σχέση (7).

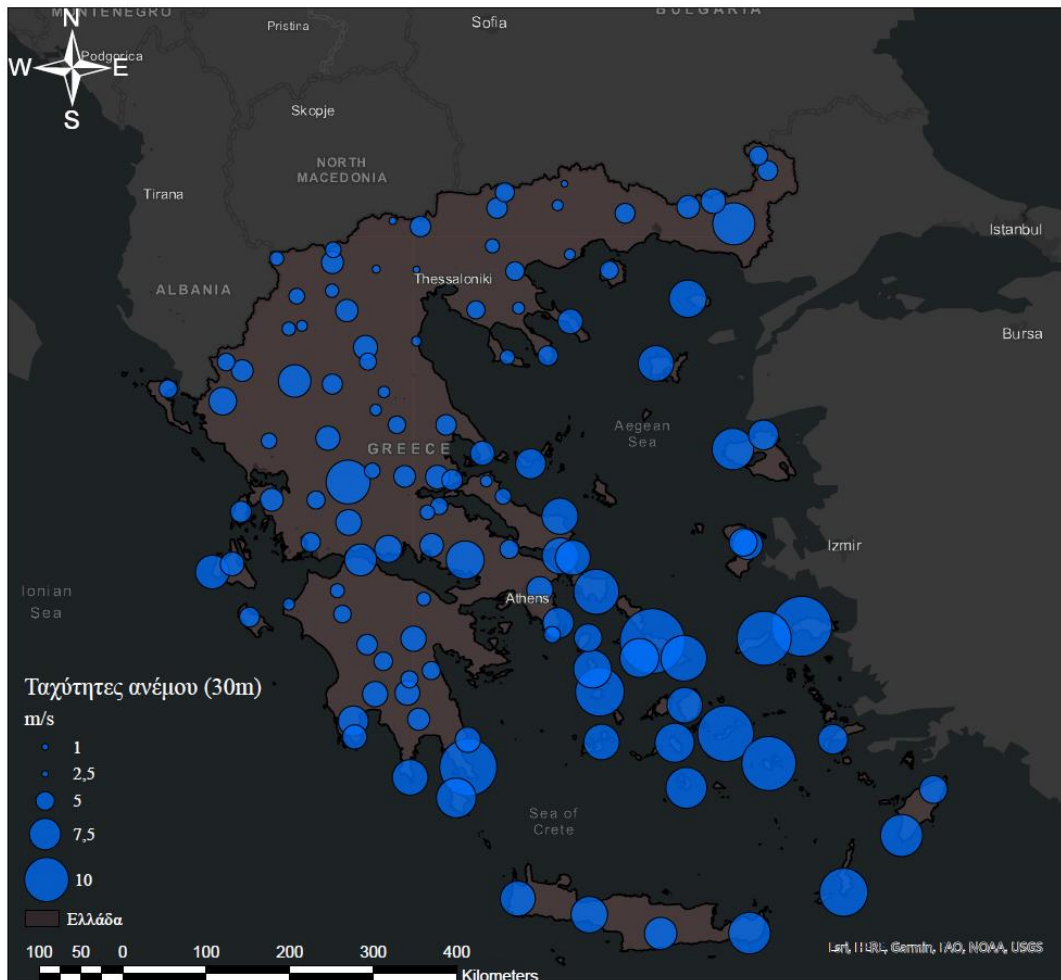
$$v(z) = v(z_0) \left( \frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (7)$$

Όπου,  $v(z)$  είναι η ζητούμενη ταχύτητα του ανέμου σε ύψος  $z$  από την επιφάνεια της θάλασσας  $v(z_0)$  είναι η γνώστη ταχύτητα σε ύψος  $z_0$

και  $\alpha$  ο εμπειρικός παράγοντας  $\alpha=1/7$

οι ταχύτητες του ανέμου των δεδομένων ανάχθηκαν σε ύψος 30m σύμφωνα με τη σχέση (7) με το κατάλληλο εργαλείο του λογισμικού με το οποίο οι τιμές πολλαπλασιάστηκαν με τους κατάλληλους συντελεστές  $\left( \frac{z}{z_0} \right)^\alpha$ .

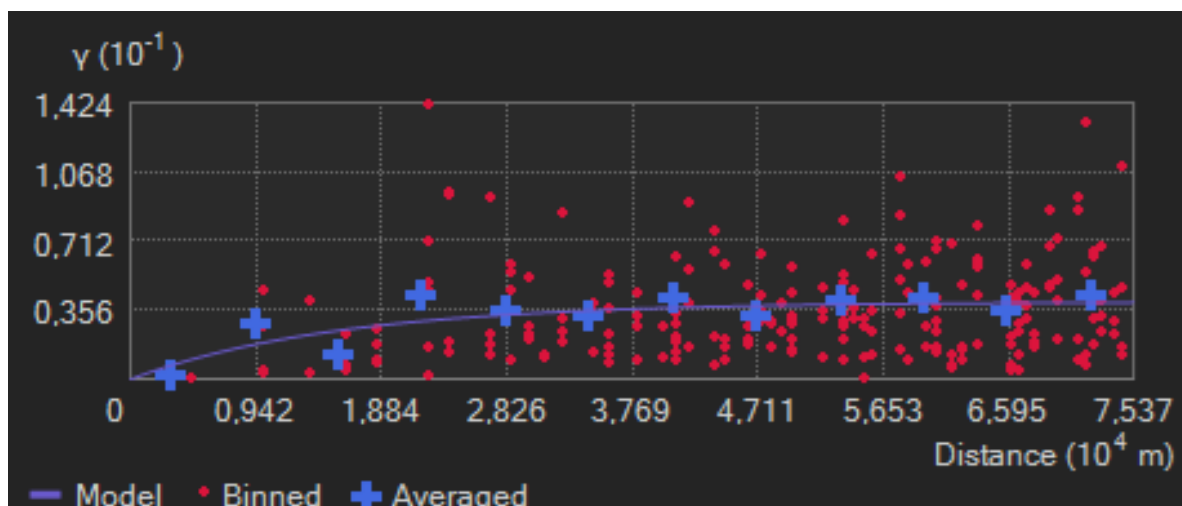
Στην Εικόνα 37 αποτυπώνονται οι θέσεις των ανεμολογικών ιστών που είναι τοποθετημένοι σε διάφορα σημεία της χώρας και η μέση ταχύτητα του ανέμου που καταγράψαν, με διαβαθμισμένη κλίμακα μεγέθους. Η ακτίνα των κύκλων διαβαθμίζεται ανάλογα με τη ταχύτητα του ανέμου.



Εικόνα 37: Οι θέσεις των ανεμολογικών ιστών, που είναι τοποθετημένοι σε διάφορα σημεία της χώρας και η μέση ταχύτητα του ανέμου που καταγράψαν, με διαβαθμισμένη κλίμακα μεγέθους. [Πηγή: ΡΑΕ, Γεωπληροφοριακός χάρτης]

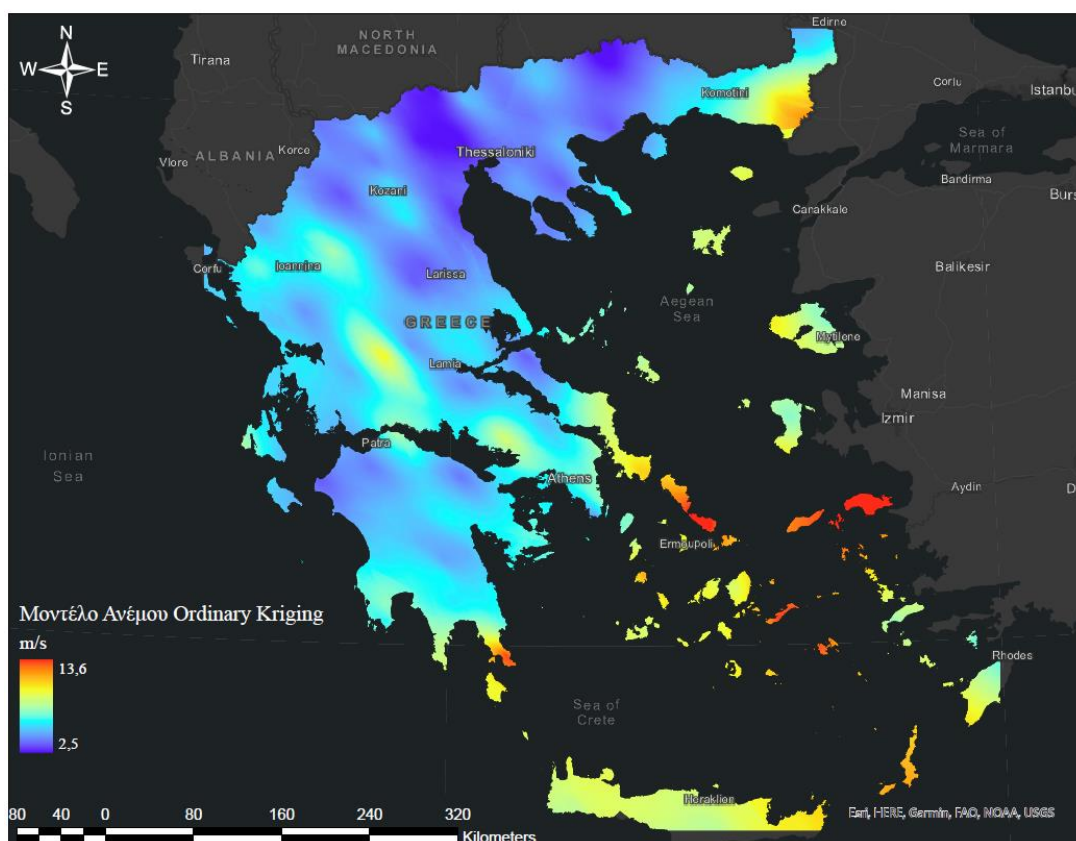
Όπως έχει αναφερθεί, για την απεικόνιση και ανάλυση του κινδύνου πυρκαγιών πολλές φορές είναι αναγκαία επίπεδα πληροφορίας που καλύπτουν όλη την επιφάνεια της περιοχής μελέτης, με συνεχή τρόπο, είτε με τη μορφή διανυσματικών πολυγωνικών επιπέδων είτε με τη μορφή επιπέδων ψηφιδωτής μορφής. Ο ακριβής υπολογισμός των προβλέψεών τους γίνεται με την ανάλυση των μη γραμμικών εξισώσεων που περιγράφουν τη δυναμική της ατμόσφαιρας (Ενότητα 3.3). Η ανάλυση των εξισώσεων αυτών είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που κατά κύριο λόγο διεξάγεται από εξειδικευμένα μοντέλα πρόγνωσης. Για να προσεγγιστεί το προφίλ του ανέμου σε ύψος 30m θα εφαρμοστεί στα δεδομένα των ανεμολογικών ιστών μια μεθοδολογία χωρικής παρεμβολής και συγκεκριμένα η μέθοδος **Ordinary Kriging**.

Με τη βοήθεια του λογισμικού προσαρμόστηκαν τα βάρη  $w_i$  σύμφωνα με τη καλύτερη δυνατή επιλογή βαριογράμματος (σφαιρικό μοντέλο). Στο Γράφημα 1 παρουσιάζεται το ημιβαριογράμματος του μοντέλου, με συνεχή γραμμή, που προσεγγίζει τα μπλε σημεία του ημιβαριογράμματος σύμφωνα με τα δεδομένα του δείγματος. Το βήμα (lag size) που υπολογίστηκαν τα σημεία του ημιβαριογράμματος από το δείγμα είναι  $h=6280m$ . Τα βασικά στοιχεία του ημιβαριογράμματος η διασπορά (nugget) και οριακή τιμή (still) έχουν τιμές  $\gamma(0)=0.004$  και  $\gamma(h)=0,036$ , αντίστοιχα. Για τη προσαρμογή του ημιβαριογράμματος λήφθηκε υπόψη η σχετικά μικρή ανισοτροπία του δείγματος (Παράρτημα II).



Γράφημα 1: Το ημιβαριόγραμμα του μοντέλου, με συνεχή γραμμή, που προσεγγίζει τα μπλε σημεία του ημιβαριογράμματος από δεδομένα του δείγματος.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου Kriging για το προφίλ του μέσου ανέμου της Ελλάδας αποτυπώνονται στην Εικόνα 38. Οι περιοχές που εκτιμάται ότι εμφανίζουν υψηλές ταχύτητες ανέμων εμφανίζονται με κόκκινο και κίτρινο χρώμα ενώ οι περιοχές που εκτιμάται ότι παρουσιάζουν χαμηλές ταχύτητες με μπλε αποχρώσεις.



Εικόνα 38: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου Kriging για το προφίλ του μέσου ανέμου της Ελλάδας σύμφωνα με τα σημειακά δεδομένα από ανεμολογικούς ιστούς της εικόνας 37. Οι περιοχές που εκτιμάται ότι εμφανίζουν υψηλές ταχύτητες ανέμων εμφανίζονται με κόκκινο και κίτρινο χρώμα ενώ οι περιοχές που εκτιμάται ότι παρουσιάζουν μικρές τιμές ταχυτήτων με μπλε αποχρώσεις.

Για να εκτιμηθεί κατά ποσό το μοντέλο έχει αναπαραστήσει σωστά το προφίλ ταχυτήτων του ανέμου, έγινε στατιστικός έλεγχος σφαλμάτων (cross validation). Αρχικά υπολογίστηκε το



κανονικοποιημένο σφάλμα πρόβλεψης (Standardized Prediction Error ή MSPE) σύμφωνα με τη σχέση

$$MSPE = \frac{\sum_{i=1}^{123} \frac{[\hat{v}(x_i) - v(x_i)]}{\varepsilon(x_i)}}{123}$$

Όπου

$v(x_i)$  είναι η τιμή του ανέμου στη θέση  $i$  από το δείγμα,

$\hat{v}(x_i)$  είναι η τιμή του ανέμου στη θέση  $i$  σύμφωνα με τη πρόβλεψη του μοντέλου

$\varepsilon(x_i)$  είναι το σφάλμα που αντιστοιχεί στη θέση  $i$ .

Το MSPE υπολογίστηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Σ.Γ.Π. και είναι πρακτικά μηδενικό,  $MSPE = -0,05$ . Για να θεωρηθεί ένα μοντέλο έγκυρο το MSPE θα πρέπει να είναι αρκετά μικρό κάτι που ισχύει στη προκειμένη περίπτωση<sup>[98]</sup>

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root of the Mean Square Error ή RMSE) και το μέσο κανονικοποιημένο σφάλμα (Average Standard Error ή ASE), με βάση τις σχέσεις

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{123} [\hat{v}(x_i) - v(x_i)]^2}{123}}$$

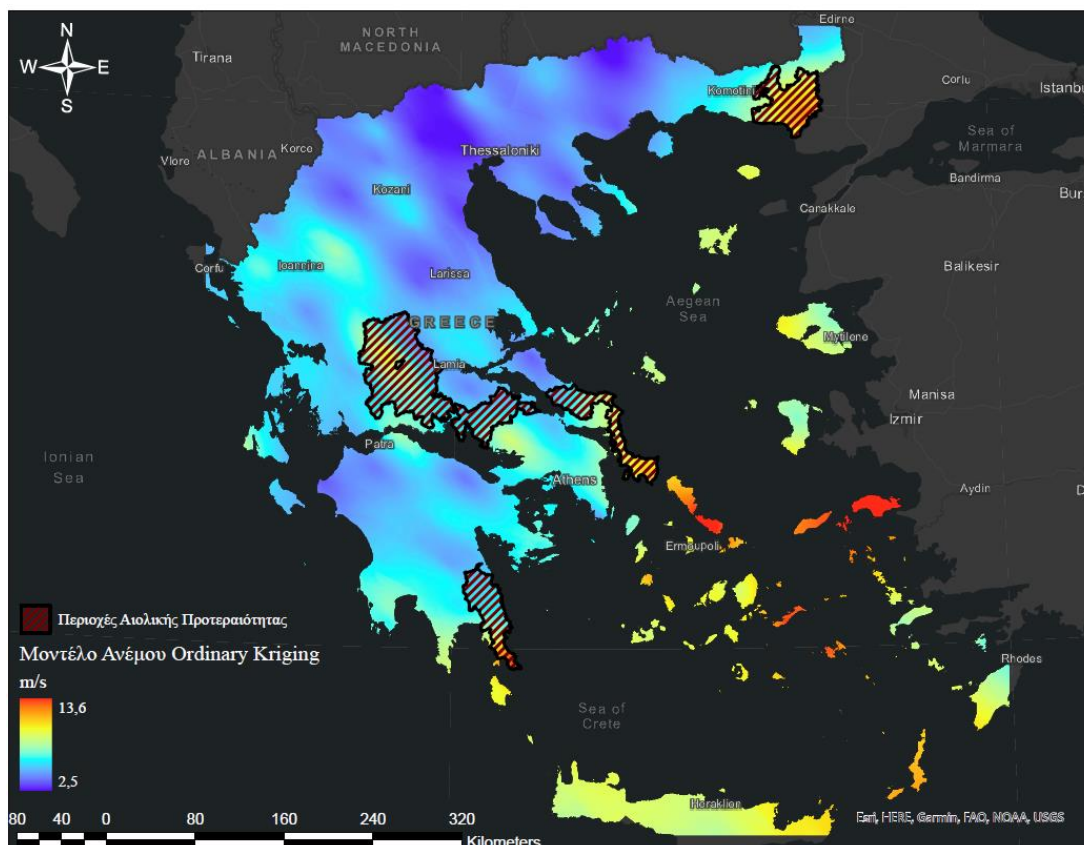
$$ASE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{123} \varepsilon(x_i)^2}{123}}$$

Σύμφωνα με το μοντέλο ανέμου Ordinary Kriging το  $RMSE = 1,5$  και το  $ASE = 1,4$ . Για να είναι έγκυρο το μοντέλο θα πρέπει το ASE και το RMSE να είναι αρκετά μικρότερα από τη μέση τιμή του δείγματος. Για την περίπτωση του δείγματος των δεδομένων από τους ανεμολογικούς ιστούς η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι  $\langle v \rangle = 6,5 \text{ m/s}$ . Επομένως, πράγματι ισχύει ότι

$$RMSE, ASE \ll \langle v \rangle$$

Παράλληλα τα δύο σφάλματα είναι περίπου ίσα<sup>[98]</sup>. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα το μοντέλο ταχυτήτων ανέμου για το ύψος των 30m είναι έγκυρο.

Το μοντέλο έχει καταφέρει με επιτυχία να αποτυπώσει τις περιοχές υψηλών ταχυτήτων ανέμου. Οι περιοχές υψηλού αιολικού δυναμικού της ηπειρωτικής Ελλάδας σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία έχουν διαχωριστεί σε τρεις περιοχές που ονομάζονται Περιοχές Αιολικής Προτεραιότητας (ΠΑΠ)<sup>[50]</sup>. Το μοντέλο Kriging έχει αναγνωρίσει τις περιοχές αυτές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 39.



Εικόνα 39: Σύγκριση ανάμεσα στις Περιοχές Αιολικής Προτεραιότητας σύμφωνα με την Ελληνική και τα αποτελέσματα για το προφίλ ταχυτήτων ανέμου σύμφωνα με το μοντέλο χωρικής παρεμβολής Kriging.

Η πραγματική ακρίβεια του προφίλ ταχυτήτων ανέμου σε ύψος 30 μέτρων για την Ελλάδα είναι άμεσα συνδεδεμένη με τα ανεμολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό. Με βάση τη πυκνότητα των σημειακών πηγών το μοντέλο αποτυπώνει τη γενική συμπεριφορά της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα του επίπεδου ψηφιδωτής μορφής χαρακτηρίζονται από αρκετά μικρή χωρική ανάλυση. Επομένως στο προφίλ του ανέμου δεν αποτυπώνεται τα τοπικά φαινόμενα μικρής χωρικής κλίμακας. Περισσότερες σημειακές πηγές θα μπορούσαν να βοηθήσουν σε μια λεπτομερέστερη απεικόνιση της ταχύτητας του ανέμου.

Η εφαρμογή παρόμοιων μοντέλων χωρικής παρεμβολής για τον υπολογισμό των επιπέδων πληροφορίας δεδομένων μετεωρολογικών παραμέτρων σε συστήματα Σ.Γ.Π. είναι εξαιρετικά χρήσιμη. Τα αποτελέσματα των μοντέλων χωρικής παρεμβολής μπορούν να παραχθούν σχετικά γρήγορα και να οπτικοποιηθούν με σαφή τρόπο, επιτρέποντας έτσι τη γρήγορη λήψη αποφάσεων, εκτίμησης κινδύνου και λήψη μέτρων πρόληψης σε περιπτώσεις που υπάρχει πρόσβαση σε σημειακά δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών. Στη παρούσα διπλωματική έγινε μια ενδεικτική εφαρμογή για τον υπολογισμό του μέσου ανέμου στην Ελλάδα, παρόμοια μπορούν να υπολογιστούν η θερμοκρασία, οι βροχοπτώσεις και η ξηρασία με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια<sup>[47]</sup>.

## 5.5 Απεικόνιση παραγόντων κινδύνου από ανθρώπινες δραστηριότητες σε Σ.Γ.Π

Οι άνθρωποι και οι κοινωνικοοικονομικές τους δραστηριότητες διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του συνολικού κινδύνου πυρκαγιάς σε μια περιοχή. Από τη μία, οι άνθρωποι λειτουργούν ως καθοριστικός παράγοντας **κινδύνου**, αφού αποτελούν τη βασική αιτία έναρξης πυρκαγιών. Συγκεκριμένα, για την περιοχή της Ευρώπης έχει εκτιμηθεί ότι το 90 με 95% των πυρκαγιών έχει προκληθεί από ανθρώπους<sup>[14]</sup>. Επομένως τα τμήματα των δασικών περιοχών που βρίσκονται κοντά σε ανθρώπινες δραστηριότητες ή περιοχές προσβάσιμες σε ανθρώπους βρίσκονται σε μεγαλύτερο κίνδυνο πυρκαγιάς. Από την άλλη, οι άνθρωποι διαμορφώνουν την **ευπάθεια** μιας περιοχής σε πυρκαγιές. Οι πυρκαγιές αποτελούν σημαντική απειλή για τις υποδομές και την ανθρώπινη υγεία<sup>[60]</sup>. Αναμενόμενα, μπορούν να καταστρέψουν μεγάλες εκτάσεις γης συμπεριλαμβανομένων σπιτιών, περιοχών ανθρώπινης εκμετάλλευσης και υποδομών (ηλεκτρικά δίκτυα, υποδομές παραγωγής αγαθών κ.α.) επιφέροντας τεράστιες οικονομικές ζημιές. Παράλληλα, οι πυρκαγιές απειλούν τη υγεία και τη ζωή των ανθρώπων άμεσα και έμμεσα. Πέρα από την άμεση απειλή, κατά τη διάρκεια των πυρκαγιών παράγονται επιβλαβή αιωρούμενα σωματίδια (particulate matter) και χημικές ενώσεις όπως το όζον (O<sub>3</sub>), που ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα και μπορούν να έχουν ιδιαίτερα επιβλαβείς επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων<sup>[63]</sup>. Οι έμμεσες συνέπειες των πυρκαγιών συμπεριλαμβάνουν την αύξηση του κινδύνου πλημμυρικών φαινομένων, τη μείωση της ποιότητας του αέρα των πληγεισών περιοχών και οικολογικές αλλαγές<sup>[60]</sup>. Οι παράγοντες ευπάθειάς μπορούν άμεσα να μελετηθούν σε Σ.Γ.Π. με την απεικόνιση δημογραφικών στοιχείων, στατιστικών στοιχείων και των θέσεων υποδομών που χαρακτηρίζουν την εκάστοτε περιοχή. Για παράδειγμα, η πυκνότητα πληθυσμού, το εισόδημα, η ηλικία των κατοίκων και η πρόσβασή τους σε μέσα μεταφοράς είναι βασικοί παράγοντες που διαμορφώνουν την ευπάθεια μιας περιοχής σε πυρκαγιές.

Όσον αφορά τους παράγοντες κινδύνου, οι βασικότεροι είναι οι οικισμοί και οι δρόμοι<sup>[57]</sup>, ενώ στο κίνδυνο συμμετέχουν και άλλα σημεία όπως οι πυλώνες του ηλεκτρικού δικτύου και οι περιοχές συγκέντρωσης απορριμμάτων. Οι δασικές περιοχές που βρίσκονται κοντά σε περιοχές που δραστηριοποιούνται οι άνθρωποι, όπως δρόμοι και οικισμοί, διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο (κυρίως ανάφλεξης πυρκαγιάς). Τα Σ.Γ.Π. μπορούν να απεικονίσουν τις θέσεις των οικισμών και των δρόμους, αλλά και να ποσοτικοποιήσουν την περιοχή επίδρασης των παραγόντων κινδύνου, με διαβαθμισμένο τρόπο, επιτρέποντας στη συνέχεια την απεικόνιση των περιοχών που βρίσκονται σε κίνδυνο. Η παράμετρος με την οποία μπορεί να διαβαθμιστεί η περιοχή επίδρασης είναι η απόσταση από τις περιοχές ανθρώπινης δραστηριότητας. Τα δεδομένα για τις θέσεις των οικισμών και του οδικού δικτύου παρέχονται από κρατικές πηγές ή από πηγές ανοικτών δεδομένων και συνήθως μπορούν άμεσα να αναπαρασταθούν σε Σ.Γ.Π.

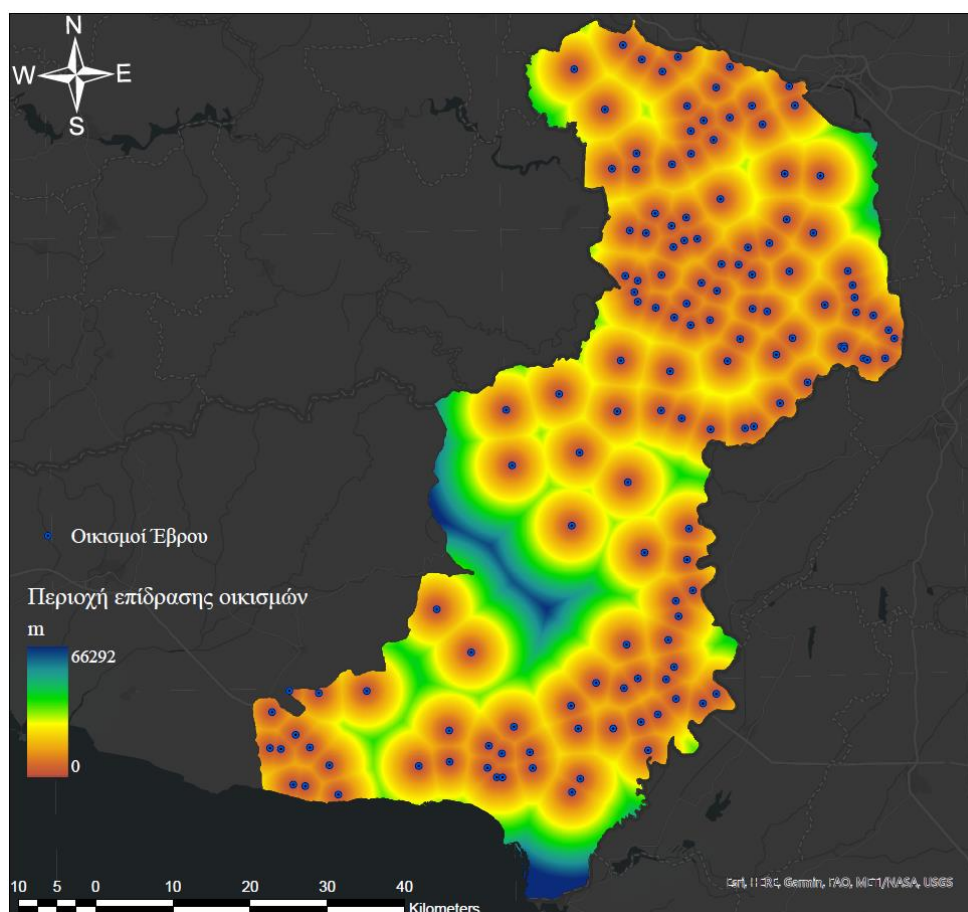
### 5.5.1 Απεικόνιση της περιοχής επίδρασης οικισμών

Οι οικισμοί μπορούν να απεικονιστούν είτε με σημειακά διανυσματικά επίπεδα κεντροβαρικά, είτε με πολυγωνικά διανυσματικά επίπεδα που αποτυπώνουν με ακρίβεια τα όρια τους. Η περιοχή επίδρασης προσομοιάζεται από την απόσταση γύρω από τους οικισμούς και μπορεί να απεικονιστεί είτε με διανυσματικά επίπεδα, είτε με ψηφιδωτά επίπεδα δεδομένων. Τα διανυσματικά επίπεδα κατασκευάζονται με την λειτουργία περιμετρικών ζωνών (*buffer zones*) γύρω από τα σημεία ή τα όρια των οικισμών. Η δημιουργία περιμετρικών ζωνών είναι μια από τις κύριες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ερωτημάτων εγγύτητας στο πλαίσιο



ενός Σ.Γ.Π. Η χάραξη των περιμετρικών ζωνών περιλαμβάνει τη δημιουργία περιοχών που ορίζουν συγκεκριμένες αποστάσεις γύρω από σημεία, γραμμές ή πολύγωνα και το αποτέλεσμα της ανάλυσης είναι η δημιουργία νέων πολυγώνων που αντιστοιχούν στις περιμετρικές ζώνες<sup>[36]</sup>.

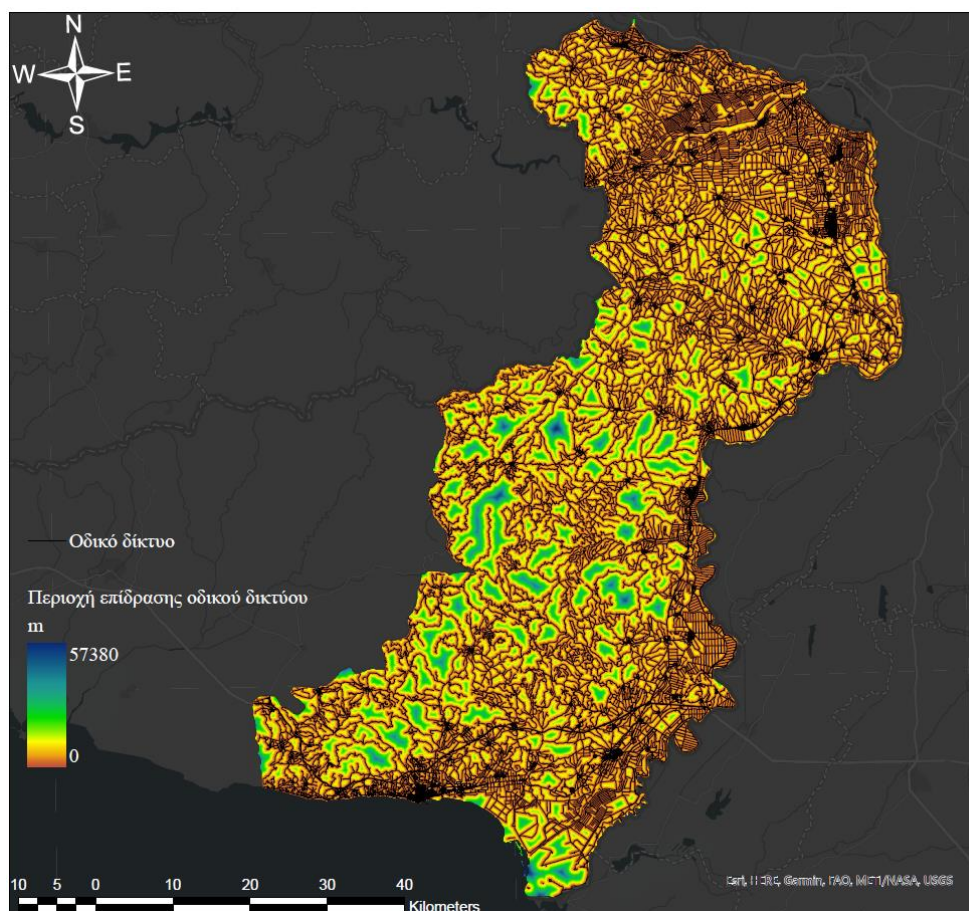
Τα ψηφιδωτά επίπεδα δεδομένων περιγράφουν με συνεχή τρόπο την απόσταση γύρω από τα σημεία ή πολύγωνα ενδιαφέροντος. Συγκεκριμένα, σε κάθε ψηφίδα του παραγόμενου επιπέδου καταγράφεται η ευθεία απόστασή της από το πλησιέστερο αντικείμενο αναφοράς<sup>[36]</sup>. Για την αναπαράσταση των περιοχών επίδρασης των οικισμών επιλέχθηκε η μέθοδος υπολογισμού της απόστασης σε ψηφιδωτό επίπεδο δεδομένων. Στην Εικόνα 40 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης απόστασης, όπου φαίνονται τα κέντρα των οικισμών και η απόσταση από αυτούς με χρωματική διαβάθμιση.



Εικόνα 40: Τα αποτελέσματα ανάλυσης της απόστασης από τα κέντρα των οικισμών.

### 5.5.2 Απεικόνιση της περιοχής επίδρασης του οδικού δικτύου

Η μελέτη της περιοχής επίδρασης των δρόμων είναι παρόμοια με αυτή των οικισμών. Τα δεδομένα του οδικού δικτύου απεικονίζονται σε Σ.Γ.Π. με γραμμικά διανυσματικά επίπεδα, ενώ και εδώ η περιοχή επίδρασης προσομοιάζεται από την απόσταση γύρω από τους δρόμους και μπορεί να απεικονιστεί είτε με διανυσματικά επίπεδα, είτε με ψηφιδωτά επίπεδα δεδομένων. Για την αναπαράσταση των περιοχών επίδρασης του οδικού δικτύου επιλέχθηκε η μέθοδος υπολογισμού της απόστασης με ψηφιδωτή μορφή. Στην Εικόνα 41 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης απόστασης, όπου φαίνονται το οδικό δίκτυο και η απόσταση από αυτό με χρωματική διαβάθμιση.



Εικόνα 41: Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της απόσταση από το οδικό δίκτυο..

# 6. Διαχείριση Κρίσεων



## 6 Διαχείριση Κρίσεων

Η διαχείριση των κρίσεων, συμπεριλαμβανομένων των πυρκαγιών, ορίζεται ως η εφαρμογή επιστημονικών μεθόδων, τεχνολογιών, σχεδιασμού και οργάνωσης με στόχο την αντιμετώπιση ακραίων καταστάσεων, τα οποία ενδέχεται να οδηγήσουν σε φυσικές καταστροφές<sup>[68]</sup>. Σύμφωνα με την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Διαχείρισης Καταστάσεων Κρίσεων (FEMA) η διαχείριση των κρίσεων περιλαμβάνει τέσσερα βασικά στάδια: την *Ετοιμότητα* (Preparedness), την *Απόκριση* (Response), την *Ανάκτηση* (Recovery), τη *Πρόληψη* (Mitigation)<sup>[69]</sup>. Κάθε ένα από τα στάδια αυτά περιλαμβάνει μια πληθώρα από σχέδια και δράσεις, τα οποία ως επι των πλείστων έχουν χωρικά χαρακτηριστικά. Το γεγονός αυτό κάνει τα Σ.Γ.Π. ιδανικές πλατφόρμες ανάλυσης και απεικόνισης πληροφοριών που σχετίζονται με τη διαχείριση των κρίσεων.

### 6.1 Πρόληψη (Mitigation)

Το στάδιο της Πρόληψης τοποθετείται πριν από ένα καταστροφικό γεγονός και πιο συγκεκριμένα ανάμεσα στα γεγονότα. Ο βασικός στόχος των δράσεων που περιλαμβάνονται στο στάδιο αυτό είναι ο μετριασμός των επιπτώσεων ενός ακραίου φαινομένου ή μιας καταστροφής. Οι εφαρμογές των Σ.Γ.Π. σε αυτό το στάδιο σχετίζονται με την ανάπτυξη μοντέλων διαχείρισης πόρων, κινδύνου, ρίσκου και πρόβλεψης σχετικών παραμέτρων επικινδυνότητας. Τα μοντέλα αυτά συνδέουν τη χωρική ανάλυση σε Σ.Γ.Π. και τις επιστημονικές αρχές, ανάλογα με το εκάστοτε φαινόμενο, με στόχο να υποστηρίξουν τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων.

Τα μοντέλα απεικόνισης και διαχείρισης κινδύνου συνεκτιμούν την επίδραση διαφόρων παραγόντων στη διαμόρφωση του τελικού κινδύνου της περιοχής. Αναμενόμενα, οι παράγοντες κινδύνου διαφέρουν ανάλογα με τα ακραία φαινόμενα που μελετώνται και τις ενδεχόμενες καταστροφές που μπορούν να προκαλέσουν. Σχετικά με τις πυρκαγιές, οι παράγοντες κινδύνου έχουν αναλυθεί λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3, ενώ στο Κεφάλαιο 5 έχει γίνει σαφής η δυνατότητα απεικόνισης τους σε Σ.Γ.Π. Υπάρχουν διαφορά μοντέλα βάση των οποίων γίνεται ο συνδυασμός των παραγόντων κινδύνου πυρκαγιάς σε Σ.Γ.Π.. Μια από τις πιο διαδεδομένες μεθοδολογίες συνεκτίμησης είναι η πολυκριτηριακή ανάλυση (MCDA) με την εφαρμογή διαδικασίας αναλυτικής ιεράρχησης (AHP)<sup>[70-76]</sup>. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα AHP που συνδυάζουν διαφορετικά κριτήρια, ανάλογα με τους στόχους της έρευνας και τις ιδιαιτερότητες κάθε περιοχής μελέτης. Αποτέλεσμα του συνδυασμού των παραμέτρων είναι μοντέλα διαβαθμισμένου κινδύνου πυρκαγιάς για την εκάστοτε περιοχή μελέτης, τα οποία βοηθούν σημαντικά στη κατάλληλη κατανομή των πυροσβεστικών πόρων. Τα μοντέλα απεικόνισης και διαχείρισης “ρίσκου” δεν διαφέρουν σημαντικά με τα μοντέλα κινδύνου, όσον αναφορά στις μεθοδολογίες που ακολουθούν. Η βασική τους διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι τα μοντέλα “ρίσκου” συνεκτιμούν και τη τρωτότητα της περιοχής από την εκάστοτε απειλή.

Μια άλλη μεγάλη κατηγορία μοντέλων που αξιοποιούν τις δυνατότητες των Σ.Γ.Π., εξετάζουν τη διαχείριση πόρων και την κατανομή υποδομών. Τα μοντέλα που συναντήθηκαν συχνότερα στη βιβλιογραφία αξιολογούν τις υφιστάμενες υποδομές και αναλύουν τη καλύτερη δυνατή κατανομή (location allocation)<sup>[77]</sup> των διαθέσιμων πόρων ή την εύρεση κατάλληλων (suitability analysis) τοποθεσιών για τη κατασκευή υποδομών<sup>[78]</sup>. Τα μοντέλα αξιολόγησης δίνουν μια εκτίμηση της λειτουργικότητας των υφιστάμενων υποδομών πάντα με βάση τους παράγοντες κινδύνου και τη τρωτότητα της περιοχής. Η κατηγορία των μοντέλων κατανομής,



έχει ως στόχο το καλύτερο δυνατό χωρικό διαμερισμό ενός συνόλου πόρων ή υποδομών, έτσι ώστε να καλύπτουν τις ανάγκες της περιοχής σε καταστάσεις κρίσης. Τέλος, τα μοντέλα εύρεσης κατάλληλων τοποθεσιών υποδεικνύουν τις πιθανές τοποθεσίες που μπορούν να κατασκευαστούν υποδομές, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τους τεχνικούς περιορισμούς όσο και τη δυνατότητα κάλυψης των αναγκών της περιοχής.

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη μοντέλων σε Σ.Γ.Π για τη Πρόληψη των κρίσεων αποτελεί αντικείμενο εντατικής επιστημονικής έρευνας. Έτσι και στη παρούσα διπλωματική, οι εφαρμογές που θα αναπτυχθούν στη συνέχεια ανήκουν στο στάδιο αυτό, καθώς εντάσσονται στην ανάλυση κινδύνου και τη χωρική διαχείριση των πόρων. Η αναγνώριση και μελέτη των παραμέτρων που σχετίζονται τόσο με το κίνδυνο εμφάνισης των καταστροφικών φαινομένων όσο και της αναγνώρισης της ευπάθειας μιας περιοχής αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για την αντιμετώπιση των καταστάσεων έκτακτης ανάγκης<sup>[68]</sup>.

## 6.2 Ετοιμότητα (Preparedness) και Απόκριση (Response)

Στης κατηγορίες της Ετοιμότητας και της Απόκρισης περιλαμβάνονται οι μελέτες των σχεδίων ετοιμότητας πριν από ένα καταστροφικό γεγονός και η υλοποίηση τους κατά τη διάρκεια των κρίσεων. Συγκεκριμένα, στην Ετοιμότητα συμπεριλαμβάνονται τα σχέδια δράσης, η εκπαίδευση του εμπλεκόμενου προσωπικού και η ενημέρωση των πολιτών, ενώ στην Απόκριση συμπεριλαμβάνεται η παρακολούθηση των φαινομένων, τα σχέδια εγκατάλειψης προς ασφαλής τοποθεσίες και οι επιχειρήσεις διάσωσης. Στη φάση της Ετοιμότητας και Απόκρισης, τα Σ.Γ.Π. χρησιμοποιούνται κυρίως για τη ανάπτυξη των σχεδίων δράσης και την παρακολούθηση της υλοποίησής τους, σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Όσον αναφορά στην ανάπτυξη των σχεδίων δράσης, τα Σ.Γ.Π. δίνουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης απεικόνισης και επεξεργασίας των πληροφοριών, που σχετίζονται με τις διαθέσιμες υποδομές, τους παράγοντες κινδύνου και τον πληθυσμό (ή το οικοσύστημα) που απειλείται. Μέσα από την ανάλυση όλων αυτών των δεδομένων μπορούν να αναπτυχθούν τα σχέδια απόκρισης σε καταστάσεις κρίσεων. Ίσως το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα για τη περίπτωση των πυρκαγιών είναι ο σχεδιασμός εκκένωσης οικισμών<sup>[79]</sup> ή κτιρίων<sup>[80]</sup>.

Η πιο εκτεταμένη χρήση των Σ.Γ.Π., κυρίως από τους φορείς διαχείρισης κρίσεων, πραγματοποιείται στο στάδιο της Απόκρισης. Τα Σ.Γ.Π. μπορούν να διευκολύνουν την απόκριση σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης με πολλούς τρόπους, Αρχικά, δίνουν τη δυνατότητα άμεσης και ακριβούς οπτικοποίησης κρίσιμων πληροφοριών σχετικά με την εξέλιξη των φαινομένων ή των περιοχών που βρίσκονται σε κίνδυνο, επιταχύνοντας και διευκολύνοντας σημαντικά τη λήψη των αποφάσεων. Παράλληλα, υποβοηθούν στο συντονισμό διαφορετικών ομάδων που συμμετέχουν στην αντιμετώπιση των φαινομένων. Η επικοινωνία και η ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στους εμπλεκόμενους φορείς, είναι καθοριστική για την επιτυχή αντιμετώπιση των κρίσεων. Τέλος, μέσα από την οπτικοποίηση κρίσιμων πληροφοριών μπορούν άμεσα να ενημερώνονται και οι πολίτες.

Ειδικότερα, σε περιπτώσεις πυρκαγιών τα Σ.Γ.Π. μπορούν να απεικονίσουν παράλληλα την εστία της φωτιάς μέσα από ζωντανές δορυφορικές εικόνες, τα μέσα πυρόσβεσης και τις περιοχές που βρίσκονται σε κίνδυνο. Επίσης, μπορούν να γίνονται άμεσα τροποποιήσεις στα σχέδια δράσης ανάλογα με τα μεταβαλλόμενα δεδομένα που προκύπτουν από τη δυναμική εξέλιξη της πυρκαγιάς. Οι δυνατότητες που προσφέρουν τα Σ.Γ.Π. έχουν αναγνωριστεί από όλους τους φορείς διαχείρισης των πυρκαγιών στην Ελλάδα. Το Πυροσβεστικό Σώμα τα τελευταία χρόνια έχει εντάξει τα Σ.Γ.Π. στη διαχείριση των αστικών και δασικών πυρκαγιών



με το σύστημα ENGAGE<sup>[81]</sup>. Το ENGAGE είναι ένα επιχειρησιακό πληροφοριακό σύστημα που στόχο έχει τη διαχείριση των επιχειρησιακών πόρων και τη παρακολούθηση συμβάντων σε πραγματικό χρόνο. Οι πληροφορίες που διαχειρίζεται το ENGAGE είναι προσβάσιμες σε όλους του εμπλεκόμενους φορείς, κάτι που συμβάλει σημαντικά στη επιτάχυνση των λήψης αποφάσεων και του συντονισμού των επιχειρήσεων. Παράλληλα, τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν μελλοντικά να αποτελέσουν τη βάση για αναλύσεις που θα βοηθήσουν σημαντικά στη διαχείριση και στη βελτίωση του σχεδιασμού απόκρισης σε πυρκαγιές. Παράλληλα με το Πυροσβεστικό Σώμα, το Υπουργείο Κλιματικής Κρίσης και Προστασία του Πολίτη έχει πρόσβαση στο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Διαχείρισης Κρίσεων του Copernicus (Copernicus EMS). Το EMS σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, μετά από ενεργοποίηση του, μπορεί να προσφέρει μέσα σε μερικές ώρες 24ωρη παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των πυρκαγιών. Η αποτύπωση της τρέχουσας κατάστασης από το EMS, όπως είναι αναμενόμενο, γίνεται από την ανάλυση δορυφορικών εικόνων σε πλατφόρμες Σ.Γ.Π.

### 6.3 Ανάκτηση (Recovery)

Στο στάδιο της Ανάκτησης ανήκουν όλες οι δράσεις, που έχουν ως στόχο την αποκατάσταση μιας περιοχής που έχει πληγεί από μια καταστροφή. Σε αυτές συμπεριλαμβάνονται η παροχή βοήθειας αμέσως μετά το γεγονός, ο καθαρισμός και η καταγραφή των ζημιών, η αναστήλωση των υποδομών και η αποκατάσταση του περιβάλλοντος. Τα Σ.Γ.Π. στο στάδιο της Ανάκτησης μπορούν να λειτουργήσουν ως ένα ηλεκτρονικό αποθετήριο χωρικών πληροφοριών, που συμπεριλαμβάνει όλες τις πληροφορίες για τις ζημίες και τις δράσεις που χρειάζονται για την αποκατάσταση των ζημιών<sup>[82]</sup>. Παράλληλα, μπορεί να λειτουργήσουν και σε αυτό το στάδιο, ως ένα μέσο συντονισμού των δράσεων ανάμεσα στους φορείς. Η σημαντικότερη όμως συνεισφορά των Σ.Γ.Π. στο στάδιο αυτό είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου που χρειάζεται για να φτάσουν τα διασωστικά συνεργεία στους ανθρώπους (και τα ζώα) που βρίσκονται σε ανάγκη<sup>[83]</sup>.

Ειδικά όσον αναφορά στο στάδιο της Ανάκτησης μετά από πυρκαγιές, τα Σ.Γ.Π. αξιοποιούνται σε μεγάλο βαθμό παγκοσμίως για τη καταγραφή των ζημιών και την αποκατάσταση των πληγισίων περιοχών. Οι πληροφορίες που σχετίζονται με τις υλικές ζημίες και τις απώλειες των οικοσυστημάτων μπορούν εύκολα να αναπαρασταθούν σε επίπεδα πληροφορίας, επιταχύνοντας σημαντικά τον απολογισμό των ζημιών. Παράλληλα, οι χωρικές πληροφορίες των ζημιών μιας περιοχής μπορούν να συνδυαστούν με δορυφορικά δεδομένα σε μοντέλα Σ.Γ.Π. τα οποία βοηθούν στην αποκατάσταση των περιοχών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εφαρμογή μοντέλων που υποβοηθούν την αναδάσωση καμένων δασικών εκτάσεων, με την αξιοποίηση δορυφορικών εικόνων<sup>[84]</sup>.

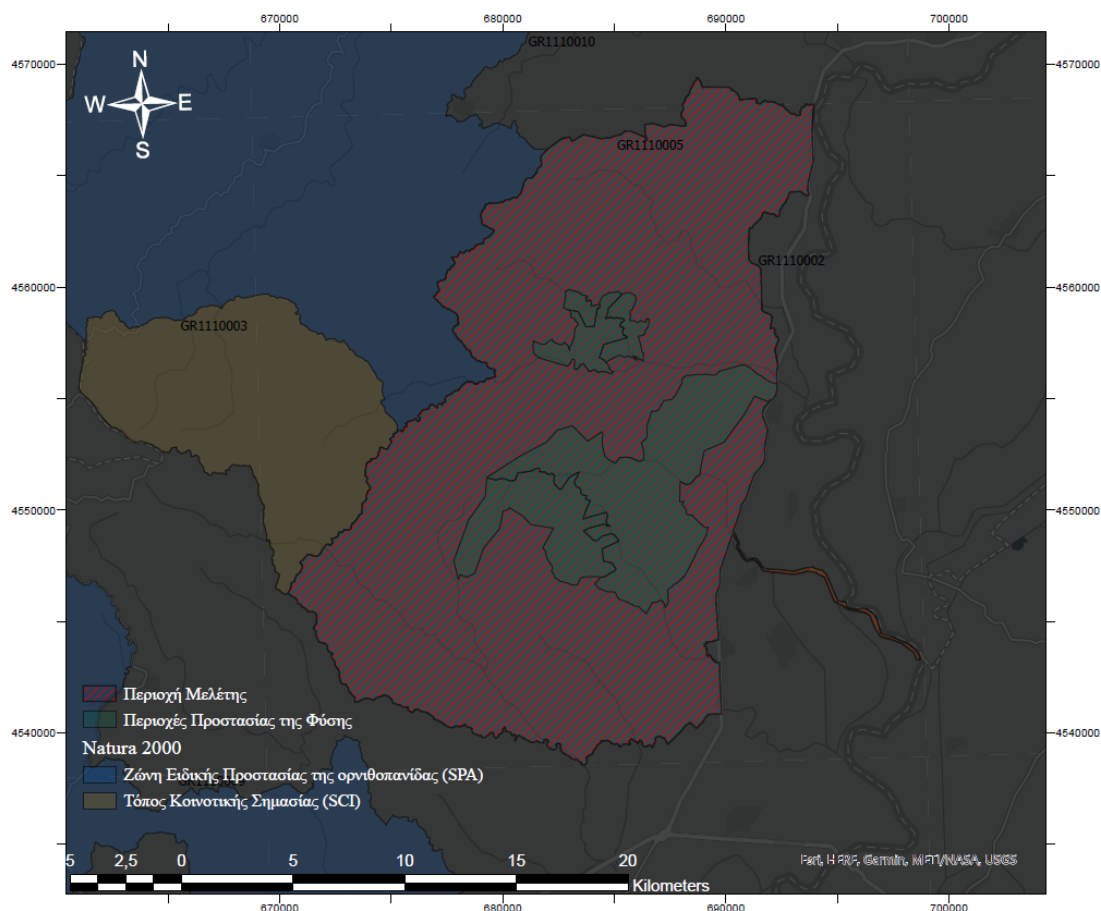
# 7. Μοντέλο Εκτίμησης Κινδύνου Πυρκαγιάς



## 7 Εφαρμογή των Σ.Γ.Π. για τη κατασκευή μοντέλου κινδύνου πυρκαγιάς για το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου

### 7.1 Περιοχή Μελέτης

Η εφαρμογή του μοντέλου κινδύνου πυρκαγιάς επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου που βρίσκεται στο νομό Έβρου και είναι μια από τις σημαντικότερες προστατευόμενες περιοχές της Ελλάδας. Κατέχει ξεχωριστή γεωγραφική θέση, καθώς βρίσκεται στο σταυροδρόμι μεταξύ Ασίας, Ευρώπης και Αφρικής και κοντά στον ανατολικότερο μεταναστευτικό διάδρομο πολλών ειδών πουλιών. Η περιοχή χαρακτηρίστηκε ως Εθνικό Πάρκο το 2006 και έχει συνολική έκταση 42800 ha. Περιλαμβάνει επίσης δύο ζώνες (A1, A2) υψηλής προστασίας της φύσης που έχουν συνολική έκταση 7290 ha<sup>[55]</sup>, όπως φαίνονται στην Εικόνα 42. Στο Εθνικό Πάρκο έχουν καταγραφεί 360-400 είδη φυτών, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων καταλαμβάνουν πεύκα και δρύες. Τα πεύκα βρίσκονται διάσπαρτα στο μεγαλύτερο μέρος του Πάρκου ενώ οι δρυς συγκεντρώνονται στα βόρεια και νοτιοδυτικά<sup>[86]</sup>. Το Εθνικό Πάρκο περιλαμβάνει 60-65 είδη θηλαστικών, ενώ αποτελεί ένα από τα λίγα καταφύγια σπάνιων αρπακτικών πουλιών σε όλη την Ευρώπη, ενώ εδώ συναντάται ο μοναδικός αναπαραγόμενος πληθυσμός Μαυρόγυπα στα Βαλκάνια.



Εικόνα 42: Η περιοχή μελέτης στα όρια της Ζώνης Natura 2000 GR1110002 (Δάσος Δαδιάς – Σουφλί) που περιλαμβάνει το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου, με τις Περιοχές Προστασίας της Φύσης A1 και A2. Οι συντεταγμένες που παρουσιάζονται είναι σε ΕΓΣΑ 87.



Η περιοχή χαρακτηρίζεται από ισχυρούς, κυρίως βόρειους ανέμους, γεγονός που φαίνεται στην ενότητα 5.4.2 (Εικόνα 38). Παράλληλα, σύμφωνα με τους ημερήσιους χάρτες επικινδυνότητας πυρκαγιών της Γενικής Γραμματείας Πολιτικής Προστασίας το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου ανήκει σε μια περιοχή σχετικά υψηλού κινδύνου εκδήλωσης πυρκαγιών. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια των μηνών Ιουνίου, Ιουλίου, Αυγούστου και Σεπτεμβρίου του 2021 η περιοχή χαρακτηρίστηκε 36 ημέρες με υψηλό κίνδυνο και 10 ημέρες με πολύ υψηλό κίνδυνο<sup>[87]</sup>. Τα τελευταία δυο χρόνια (2019-2021) έχουν εκδηλωθεί στην περιοχή δύο σημαντικές πυρκαγιές. Η πρώτη ξεκίνησε τη 1<sup>η</sup> Οκτωβρίου του 2020 βόρεια του οικισμού Λευκίμη και έκαψε περίπου 694 ha<sup>[88]</sup> και δεύτερη τη 9<sup>η</sup> Ιουλίου 2021, βόρεια του οικισμού Λευκίμη, πολύ κοντά στη πυρκαγιά του 2020, καίγοντας περίπου 242 ha<sup>[89]</sup>. Πάρα τα δυο αυτά γεγονότα η περιοχή έχει παραμείνει σχετικά αλώβητη από τις πυρκαγιές τα τελευταία χρόνια, επομένως η μελέτη του κινδύνου πυρκαγιάς στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου στοχεύει μεταξύ άλλων και στη προστασία του πλούσιου οικοσυστήματος της περιοχής από μελλοντικές πυρκαγιές.

## 7.2 Μεθοδολογία αναγνώρισης κινδύνου πυρκαγιάς

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε σε αυτό το κεφάλαιο στοχεύει στη δημιουργία ενός επικαιροποιημένου και υψηλής χωρικής ανάλυσης μοντέλου κινδύνου πυρκαγιάς. Σε κάθε περίπτωση το μοντέλο κινδύνου είναι γενικό και μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί στις ανάγκες της εκάστοτε περιοχής μελέτης. Ο χάρτης διαβαθμίζει τη περιοχή σε 5 κατηγορίες κινδύνου, από πολύ χαμηλό έως πολύ υψηλό, με χωρική ανάλυση 25x25m. Οι παράγοντες κινδύνου που συμπεριλήφθηκαν στο μοντέλο εκπροσωπούν τις βασικές κατηγορίες της τοπογραφίας, των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων και του είδους της καύσιμης ύλης, που καθορίζουν την επικινδυνότητα μιας περιοχής σε εκδήλωση πυρκαγιάς. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν συνολικά 7 παράγοντες: το υψόμετρο, η κλίση του εδάφους, ο προσανατολισμός του εδάφους, ο τοπογραφικός δείκτης υγρασίας (TWI), η απόσταση από τους οικισμούς, η απόσταση από τους δρόμους και η κάλυψη του εδάφους σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου μηχανικής εκμάθησης (SVM). Οι περισσότερες μελέτες κινδύνου πυρκαγιάς που εντοπίστηκαν κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση συμπεριλαμβάνουν τους περισσότερους παράγοντες που αναφέρθηκαν<sup>[70-76]</sup>.

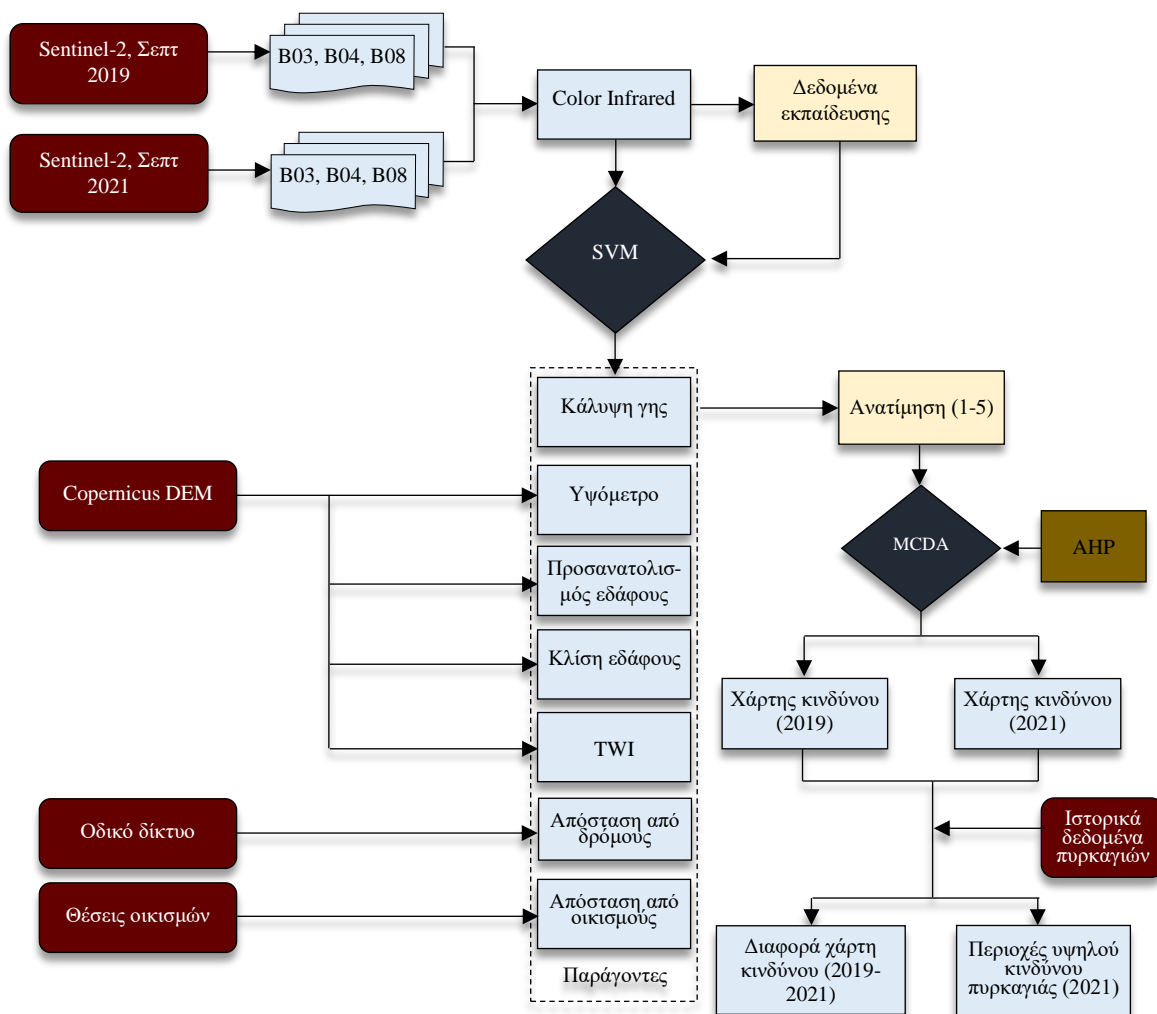
Οι παράγοντες που επιλέχθηκαν για να εκτιμηθεί ο κίνδυνος πυρκαγιάς, έχουν υπολογιστεί και αναπαρασταθεί στο Κεφάλαιο 5. Κάθε ένας περιγράφει διαφορετικά μεγέθη και αναμενόμενα η κλίμακα τιμών του δεν μπορεί να συνδυαστεί και να συγκριθεί άμεσα με τους υπόλοιπους. Χρειάζεται πρώτα να γίνει ανατίμηση του εύρους τιμών σε κοινή βάση (εδώ 1 έως 5), όπου κάθε μια από τις κατηγορίες αναπαριστά την επικινδυνότητα της περιοχής του αντίστοιχου παράγοντα κινδύνου. Έχοντας ορίσει μια κοινή κλίμακα τιμών, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν μαθηματικές πράξεις ανάμεσα στους παράγοντες και τα αποτελέσματα να έχουν νόημα για την εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς.

Μια απλή εκτίμηση κινδύνου θα μπορούσε να δοθεί από την πρόσθεση της κλίμακας κινδύνου των 7 παραγόντων. Στη πραγματικότητα όμως, οι παράγοντες αυτοί συμμετέχουν με διαφορετική βαρύτητα στη διαμόρφωση του συνολικού κινδύνου. Η ΑHP είναι η μεθοδολογία που επιλέχθηκε για να αποδοθεί στο κάθε παράγοντα ο κατάλληλος συντελεστής βαρύτητας. Ο συντελεστής αυτός αποτυπώνει τη σημαντικότητα του κάθε παράγοντα στη διαμόρφωση του συνολικού κινδύνου πυρκαγιάς. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της ΑHP,

είναι οι ανά ζεύγη συγκρίσεις βαρύτητας των παραγόντων ως προς τον κίνδυνο πυρκαγιάς. Η σχετική βαρύτητα εκτιμήθηκε τόσο από τα δεδομένα της περιοχής όσο και από εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση παρόμοιων μοντέλων εκτίμησης κινδύνου. Με βάση τη σχετική βαρύτητα κινδύνου (ανά ζεύγη) η AHP μπορεί να αποδώσει στους παράγοντες τα κατάλληλα βάρη, ως προς τον συνολικό κίνδυνο πυρκαγιάς και να εκτιμήσει την εγκυρότητα των υποθέσεων.

Δεδομένου ότι ο χάρτης επικινδυνότητας που δημιουργήθηκε είναι ένας “χάρτης αναφοράς”, στο μοντέλο κινδύνου δεν συμπεριλήφθηκαν δυναμικά μεταβαλλόμενοι παράγοντες κινδύνου, όπως ο άνεμος και η θερμοκρασία. Ο πρώτος λόγος που έγινε αυτό είναι για να μπορέσει να επιτευχθεί η σύγκριση ανάμεσα στους χάρτες κινδύνου του 2019 και 2021 και να συνεκτιμηθεί η επίδραση της αλλαγής κάλυψης γης στο κίνδυνο πυρκαγιάς του μοντέλου. Οι μεταβλητότητα των μετεωρολογικών παραγόντων θα μείωνε σημαντικά την εγκυρότητα των συγκρίσεων. Ο δεύτερος λόγος είναι η χωρική ανάλυση των δεδομένων που είναι ελεύθερα διαθέσιμα οι μετεωρολογικοί παράγοντες. Για παράδειγμα οι εικόνες της θερμικής ακτινοβολίας από τον φασματογράφο SLSTR του Sentinel-3 έχουν χωρική ανάλυση 1km. Ενώ, ο δείκτης FWI, που συνεκτιμά το κίνδυνο από όλους του μετεωρολογικούς παράγοντες κινδύνου, έχει χωρική ανάλυση περίπου 10km. Η βασική συμβολή των μετεωρολογικών παραγόντων στην ανάλυση κινδύνου μιας περιοχής είναι η χρονική διαβάθμιση του κινδύνου. Οι μετεωρολογικοί παράγοντες είναι αυτοί που καθορίζουν τη συνολική επικινδυνότητα της περιοχής μέσα στο κύκλο της μέρας και του έτους. Το μοντέλο που έχει αναπτυχθεί στη παρούσα διπλωματική είναι στατικό, επομένως εστιάζει στην χωρική διαβάθμιση κινδύνου μέσα στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και ουσιαστικά διαβαθμίζει με αρκετά μεγάλη λεπτομέρεια το κίνδυνο πυρκαγιάς, αναδεικνύοντας τις περιοχές υψηλού κινδύνου όταν οι μετεωρολογικές συνθήκες εύνουν την εμφάνιση πυρκαγιών. Με αυτό το τρόπο το μοντέλο λειτουργεί συμπληρωματικά και αλληλένδετα με τα υφιστάμενα μοντέλα επικινδυνότητας πυρκαγιάς που είναι ελεύθερα διαθέσιμα από τον EFFIS και τη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας.

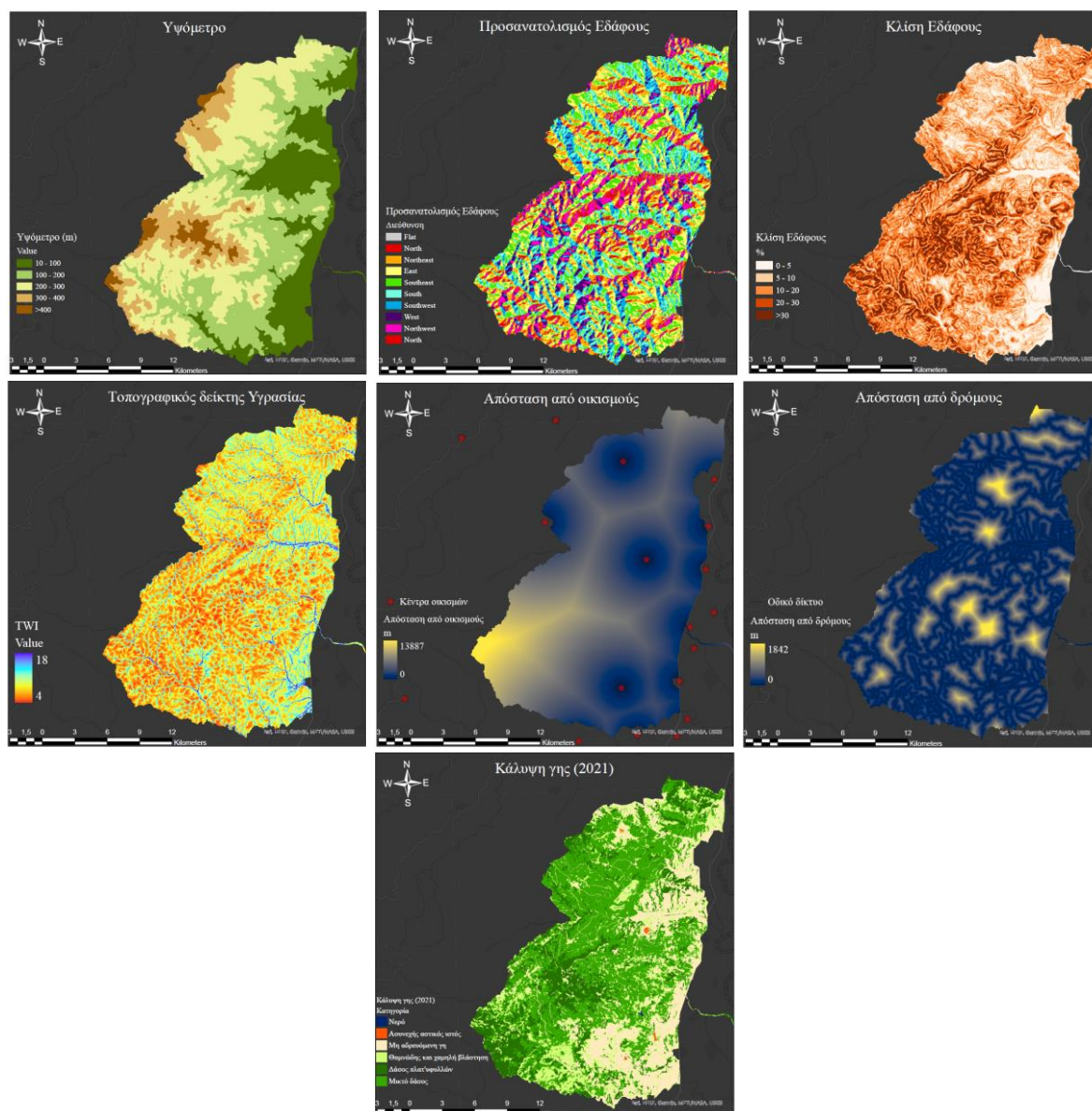
Η μελέτη του κινδύνου εμφάνισης πυρκαγιάς στη περιοχή έχει διαχωριστεί σε τρεις υποενότητες. Στη πρώτη παρουσιάζεται αναλυτικά η κατασκευή του μοντέλου επικινδυνότητας, σύμφωνα με τα δεδομένα για τη κάλυψη γης, για το Σεπτέμβριο 2021. Στη συνέχεια για να επιβεβαιωθεί η εγκυρότητα του μοντέλου, για να διερευνηθεί η επίδραση της αλλαγής στη κάλυψη της γης και για να εξεταστεί η ευαισθησία του μοντέλου στη παράμετρο αυτή, κατασκευάστηκε ένα δεύτερο μοντέλο κινδύνου που αναπαριστά το κίνδυνο εμφάνισης πυρκαγιάς, σύμφωνα με τη κάλυψη της γης του Σεπτεμβρίου 2019. Η ημερομηνία επιλέχθηκε σκόπιμα, ώστε να μην έχει επηρεαστεί η περιοχή μελέτης από τις πυρκαγιές του 2020 και 2021. Με βάση το μοντέλο κινδύνου για το 2019 έγιναν συγκρίσεις με τις περιοχές που επλήγησαν από τις πυρκαγιές και εξετάστηκε αναλυτικά αν και κατά πόσο η μεταβολή στη κάλυψη της γης αντικατοπτρίζεται στο μοντέλο κινδύνου. Το γενικό διάγραμμα ροής των εργασιών για την εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 43.



Εικόνα 43: Διάγραμμα ροής εργασιών για την εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς.

### 7.2.1 Παράγοντες κινδύνου

Για την εκτίμηση του χάρτη επικινδυνότητας πυρκαγιάς επιλέχθηκαν συνολικά 7 παράγοντες κινδύνου το υψόμετρο, η κλίση του εδάφους, ο προσανατολισμός του εδάφους, ο τοπογραφικός δείκτης υγρασίας TWI, η απόσταση από τους οικισμούς, η απόσταση από τους δρόμους και η κάλυψη του εδάφους για το Σεπτέμβριο του 2021, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου μηχανικής εκμάθησης (SVM) της υποενότητας 5.1.3.1. Οι προαναφερθέντες παράγοντες που συμπεριλήφθηκαν στο μοντέλο και αφορούν την περιοχή του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου παρουσιάζονται στην Εικόνα 44.



Εικόνα 44: Οι παράγοντες κινδύνου που συμπεριλήφθηκαν στο μοντέλο κινδύνου πυρκαγιάς κατά σειρά: το υψόμετρο, ο προσανατολισμός του εδάφους, η κλίση του εδάφους, ο τοπογραφικός δείκτης υγρασίας, η απόσταση από τους οικισμούς, η απόσταση από τους δρόμους και η κάλυψη της γης για το Σεπτέμβριο του 2021, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου μηχανικής εκμάθησης (SVM).

### 7.2.2 Κατηγοριοποίηση παραγόντων σε κλίμακα κινδύνου

Η κατηγοριοποίηση του εύρους τιμών των παραγόντων, στην κλίμακα κινδύνου από 1 έως 5, έγινε με βάση τα χαρακτηριστικά της περιοχής και από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προηγούμενων μελετών. Αρχικά, για το **υψόμετρο** θεωρήθηκε ότι στα πρώτα 100m ο κίνδυνος είναι πολύ υψηλός και στη συνέχεια ανά 100m ο κίνδυνος μειώνεται κατά μία τάξη<sup>[76]</sup>. Αυτό συμβαίνει γιατί οι δασικές εκτάσεις σε χαμηλά υψόμετρα χάνουν την υγρασία τους γρηγορότερα στο έτος σε σχέση με τις περιοχές που βρίσκονται σε ψηλότερα υψόμετρα, λόγω διαφοράς θερμοκρασίας. Επίσης, οι περιοχές σε υψηλά υψόμετρα συνήθως δεν έχουν μεγάλη πυκνότητα καύσιμης ύλης.



Ο **προσανατολισμός του εδάφους** καθορίζει ως ένα βαθμό το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια περιοχή. Στο βόρειο ημισφαίριο οι κλίσεις του εδάφους με νότιο προσανατολισμό δέχονται μεγαλύτερο ποσό ακτινοβολίας και κατ' επέκταση αναμένεται να βρίσκονται σε μεγαλύτερο κίνδυνο. Επομένως, ο προσανατολισμός του εδάφους χωρίστηκε σε 5 κατηγορίες κινδύνου όπου ο πολύ υψηλός κίνδυνος περιλαμβάνει τους νότιους προσανατολισμούς, ο υψηλός κίνδυνος τους νοτιοανατολικούς και ανατολικούς προσανατολισμούς, ο μέτριος κίνδυνος βορειοανατολικούς προσανατολισμούς, ο χαμηλός κίνδυνος τους βόρειους προσανατολισμούς και ο πολύ χαμηλός κίνδυνος όλους τους υπόλοιπους<sup>[70]</sup>.

Μια φωτιά διαδίδεται ευκολότερα ανηφορίζοντας μια πλαγιά, αυτό συμβαίνει καθώς η καύσιμη ύλη είναι πιο εύκολα πρόσβασιμη στη φωτιά προς τα επίπεδα που βρίσκονται προς τα επάνω. Επομένως, εκτιμήθηκε πως οι περιοχές με **κλίση εδάφους** μεγαλύτερη του 30% είναι σε πολύ υψηλό κίνδυνο και στη συνέχεια ο κίνδυνος μειώνεται μια κατηγορία με βήμα 10%<sup>[72]</sup>. Η κατηγοριοποίηση αναμεσα σε πολύ χαμηλό και χαμηλό κίνδυνο διαφέρει 5%.

Οι περιοχές με μικρές τιμές του του **τοπογραφικού δείκτη υγρασίας (TWI)** αναμένεται να χαρακτηρίζονται από καύσιμη ύλη με χαμηλό ποσοστό υγρασίας, αρά θα βρίσκονται και σε υψηλό κίνδυνο. Έτσι οι περιοχές με τιμές μικρότερες από 6 του TWI εκτιμήθηκε ότι είναι σε πολύ υψηλό κίνδυνο και ο κίνδυνος μειώνεται κατά μια κατηγορία κάθε μια μονάδα του TWI μέχρι τη τιμή 9. Οι περιοχές με τιμές μεγαλύτερες του 9 είναι σε πολύ χαμηλό κίνδυνο<sup>[70]</sup>.

Τα τμήματα των δασικών περιοχών που βρίσκονται κοντά οικισμούς και δρόμους, που αποτελούν ένδειξη της ανθρώπινης δραστηριότητας, αναμένεται να βρίσκονται σε μεγαλύτερο κίνδυνο πυρκαγιάς. Επίσης, για τη κατηγοριοποίηση της **απόστασης από τους οικισμούς** στη κλίμακα κινδύνου συνεκτιμήθηκαν τα όρια των οικισμών. Στη περιοχή μελέτης οι περισσότεροι οικισμοί είναι μικροί, δηλαδή έχουν πληθυσμό κάτω των 2000 κατοίκων, επομένως τα όρια τους μπορεί να θεωρηθεί ότι καλύπτουν κατά μέσο όρο μια ακτίνα 500m γύρω από το κέντρο τους<sup>[50]</sup>. Επομένως, η περιοχή πολύ υψηλού κινδύνου των οικισμών εκτιμήθηκε ότι περιλαμβάνει ένα κύκλο ακτίνας 900m από το κέντρο τους, ενώ μετά τα 900m ο κίνδυνος μειώνεται κατά μια κατηγορία κάθε 400m<sup>[72]</sup>.

Με παρόμοια λογική, η **απόσταση από το οδικό δίκτυο** χωρίστηκε σε 5 κατηγορίες κινδύνου, όπου η περιοχή πολύ υψηλού κινδύνου περιλαμβάνει τα πρώτα 200m από το δρόμο και στη συνέχεια ο κίνδυνος μειώνεται κάθε 200m κατά μια κατηγορία<sup>[76]</sup>.

Το μεγαλύτερο μέρος του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου καλύπτεται από πεύκα και δρυς. Τα πεύκα είναι εξαιρετικά εύφλεκτα και αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της κατηγορίας του μικτού δάσους, σύμφωνα με το χάρτη της **κάλυψης γης**. Ενώ οι δρύες που ανήκουν στην οικογένεια των πλατύφυλλων, είναι λιγότερο εύφλεκτοι από τα πεύκα<sup>[90]</sup>. Επομένως, το μικτό δάσος επιλέχθηκε ότι είναι σε πολύ υψηλό κίνδυνο πυρκαγιάς και το δάσος πλατύφυλλων σε υψηλό. Η κατηγορία της χαμηλής βλάστησης χαρακτηρίστηκε με μέτριο κίνδυνο Τέλος, οι κατηγορίες που παρουσιάζουν χαμηλό και πολύ χαμηλό κίνδυνο είναι η μη αρδευόμενη γη, ο ασυνεχής αστικός ιστός και το νερό. Η κατηγοριοποίηση των παραγόντων στη κλίμακα κινδύνου από 1 έως 5, παρουσιάζεται στο συγκεντρωτικό Πίνακα 8.



Παράγοντας	Κατηγορία	Κλίμακα κινδύνου	Περιγραφή κινδύνου
Κάλυψη γης (SVM)	Μικτό δάσος	5	Πολύ υψηλός
	Δάσος πλατύφυλλων	4	υψηλός
	Θαμνώδης και χαμηλή βλάστηση	3	Μέτριος
	Μη αρδευόμενη γη	2	Χαμηλός
	Αστικός ιστός/Νερό	1	Πολύ χαμηλός
Υψόμετρο (m)	10-100	5	Πολύ υψηλός
	100-200	4	υψηλός
	200-300	3	Μέτριος
	300-400	2	Χαμηλός
	>400	1	Πολύ χαμηλός
Προσανατολισμός εδάφους	Νότια	5	Πολύ υψηλός
	Νοτιοανατολικά/Ανατολικά	4	υψηλός
	Βορειοανατολικά	3	Μέτριος
	Βόρεια	2	Χαμηλός
	Υπόλοιποι	1	Πολύ χαμηλός
Κλίση εδάφους (%)	>30	5	Πολύ υψηλός
	20-30	4	υψηλός
	10-20	3	Μέτριος
	5-10	2	Χαμηλός
	0-5	1	Πολύ χαμηλός
TWI	4-6	5	Πολύ υψηλός
	6-7	4	υψηλός
	7-8	3	Μέτριος
	8-9	2	Χαμηλός
	>9	1	Πολύ χαμηλός
Απόσταση από οδικό δίκτυο (m)	0-200	5	Πολύ υψηλός
	200-400	4	υψηλός
	400-600	3	Μέτριος
	600-800	2	Χαμηλός
	>800	1	Πολύ χαμηλός
Απόσταση από οικισμούς (m)	0-900	5	Πολύ υψηλός
	900-1300	4	υψηλός
	1300-1700	3	Μέτριος
	1700-2100	2	Χαμηλός
	>2100	1	Πολύ χαμηλός

Πίνακας 8: Η κατηγοριοποίηση των παραγόντων του μοντέλου στη κλίμακα κινδύνου από 1 έως 5.



### 7.2.3 Υπολογισμός συντελεστών βάρους

Για τον υπολογισμό των συντελεστών βάρους χρειάζεται αρχικά να εκτιμηθεί η σχετική βαρύτητα των παραγόντων κινδύνου. Η αναπαράσταση της σχετικής βαρύτητας γίνεται με το πίνακα συγκρίσεων Π, στον οποίο αποτυπώνεται η σημαντικότητα του παράγοντα  $i$  σε σχέση με τον παράγοντα  $j$ . Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα  $i, j$  μπορούν να πάρουν 7 τιμές, μια για κάθε παράγοντα κινδύνου.

Η εκτίμηση του πίνακα Π έγινε από βιβλιογραφική έρευνα. Στις περισσότερες μελέτες ο σημαντικότερος παράγοντας κινδύνου είναι η κάλυψη της γης ή το είδος της καύσιμης ύλης, επομένως μεγαλύτερη βαρύτητα δόθηκε και στη παρούσα διπλωματική στη κάλυψη της γης<sup>[70-76]</sup>. Μελέτες έχουν αποδείξει ότι οι άνθρωποι ευθύνονται για τις περισσότερες πυρκαγιές<sup>[14,91]</sup>. Επομένως, αμέσως μετά τη χρήση γης, οι αποστάσεις από δρόμους και οικισμούς συντελούν τους σημαντικότερους παράγοντες κινδύνου. Όσον αφορά στους παράγοντες που ανήκουν στη τοπογραφία, ο πιο σημαντικός είναι ο δείκτης TWI. Αυτό συμβαίνει γιατί ο TWI προσμοιάζει την υγρασία που περιέχει το έδαφος και κατ' επέκταση την κατάσταση της καύσιμης ύλης. Από τους υπόλοιπους τοπογραφικούς παράγοντες ο πιο σημαντικός είναι το υψόμετρο και ακολουθούν η κλίση και τέλος ο προσανατολισμός του εδάφους<sup>[70]</sup>. Στο συγκριτικό Πίνακα 9 εμφανίζεται η σχετική βαρύτητα αναμεσά στους παράγοντες κινδύνου του μοντέλου.

	Κάλυψη γης	Υψόμετρο	Προσανατολισμός εδάφους	Κλίση εδάφους	TWI	Απόσταση από οδικό δίκτυο	Απόσταση από οικισμούς
Κάλυψη γης	1	3	3	3	3	2	2
Υψόμετρο	0,33	1	3	2	0,5	0,33	0,33
Προσανατολισμός εδάφους	0,33	0,33	1	0,5	0,25	0,33	0,33
Κλίση εδάφους	0,33	0,5	2	1	0,5	0,33	0,33
TWI	0,33	2	4	2	1	0,33	0,33
Απόσταση από οδικό δίκτυο	0,5	3	3	3	3	1	3
Απόσταση από οικισμούς	0,5	3	3	3	3	0,33	1
<b>SUM</b>	<b>3,32</b>	<b>12,83</b>	<b>19</b>	<b>14,5</b>	<b>11,25</b>	<b>4,65</b>	<b>7,32</b>

Πίνακας 9: Ο πίνακας (Π) που απεικονίζει τη σχετική βαρύτητα αναμεσά στους παράγοντες κινδύνου του μοντέλου.

Στη συνέχεια, με βάση τη μεθοδολογία της αναλυτικής ιεράρχησης (AHP) στόχος είναι ο υπολογισμός των ιδιοτιμών και ιδιοανυσμάτων του Πίνακα 9<sup>[61]</sup>. Ο πίνακας των συγκρίσεων είναι  $1^{ns}$  τάξης, αυτό σημαίνει ότι θεωρητικά έχει μια μη μηδενική ιδιοτιμή και ίση με τη διάσταση του πίνακα (εδώ  $\lambda=7$ ). Το ιδιοάνυσμα που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή αυτή, είναι οι συντελεστές βαρύτητας των παραγόντων κινδύνου. Στη πραγματικότητα οι συγκρίσεις είναι προσεγγιστικές, επομένως η ιδιοτιμή δεν έχει τιμή ίση με τη διάσταση του πίνακα, αλλά μεγαλύτερη. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τον υπολογισμό των προσεγγιστικών ιδιοτιμών και ιδιοανυσμάτων, στη περίπτωση αυτή θα υπολογιστούν τα βάρη από τη κανονικοποίηση ( $\tilde{\Pi}$ ) του Πίνακα 9.

Για τη κατασκευή του  $\tilde{\Pi}$  κάθε στοιχείο του πίνακα  $\Pi$  διαιρείται με το άθροισμα της στήλης που ανήκει, σύμφωνα με τη σχέση

$$\tilde{\Pi}_{ij} = \frac{\Pi_{ij}}{\text{SUM}_j} \quad (9)$$

Με βάση τη σχέση (9) υπολογίστηκε ο κανονικοποιημένος Πίνακας 10.

	Κάλυψη γης	Υψόμετρο	Προσανατολισμός εδάφους	Κλίση εδάφους	TWI	Απόσταση από οδικό δίκτυο	Απόσταση από οικισμούς
Κάλυψη γης	0,30	0,23	0,16	0,21	0,27	0,43	0,27
Υψόμετρο	0,10	0,08	0,16	0,14	0,04	0,07	0,05
Προσανατολισμός εδάφους	0,10	0,03	0,05	0,03	0,02	0,07	0,05
Κλίση εδάφους	0,10	0,04	0,11	0,07	0,04	0,07	0,05
TWI	0,10	0,16	0,21	0,14	0,09	0,07	0,05
Απόσταση από οδικό δίκτυο	0,15	0,23	0,16	0,21	0,27	0,22	0,41
Απόσταση από οικισμούς	0,15	0,23	0,16	0,21	0,27	0,07	0,14

*Πίνακας 10: Κανονικοποιημένος πίνακας συγκρίσεων ( $\tilde{\Pi}$ )*

Στη συνέχεια υπολογίστηκε το άθροισμα ( $\text{SUM}_i$ ) τις κάθε γραμμής του Πίνακα 10 και το τελικό βάρος του παράγοντα  $i$  δίνεται από τη σχέση

$$W_i = \frac{\text{SUM}_i}{7} \quad (10)$$

Για παράδειγμα ο συντελεστής βαρύτητας για το υψόμετρο είναι

$$W_{\text{DEM}} = \frac{0,08 + 0,14 + 0,16 + 0,04 + 0,10 + 0,07 + 0,05}{7} = 0,09$$

Ομοίως υπολογίζονται και οι υπόλοιποι συντελεστές βαρύτητας που παρουσιάζονται στο Πίνακα 11.

Παράγοντες κινδύνου	Συντελεστής βαρύτητας
Κάλυψη γης (ΚΓ)	0,27
Υψόμετρο (Υ)	0,09
Προσανατολισμός εδάφους (ΠΕ)	0,05
Κλίση εδάφους (ΚΕ)	0,07
TWI	0,12
Απόσταση από οδικό δίκτυο (ΑΔ)	0,23
Απόσταση από οικισμούς (ΑΟ)	0,17

*Πίνακας 11: Συντελεστές βαρύτητας που αντιστοιχούν στους παράγοντες κινδύνου.*

Όσον αφορά στη συνέπεια του μοντέλου, ο δείκτης αναλογίας συνέπειας (CR) που προκύπτει από το Πίνακα 9 είναι  $CR = 0.07$ . Αφού πληρείται η συνθήκη  $CR < 0,1$  οι υποθέσεις για τις συγκρίσεις των παραγόντων κινδύνου είναι συνεπείς. Ο υπολογισμός το δείκτη CR παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα III.



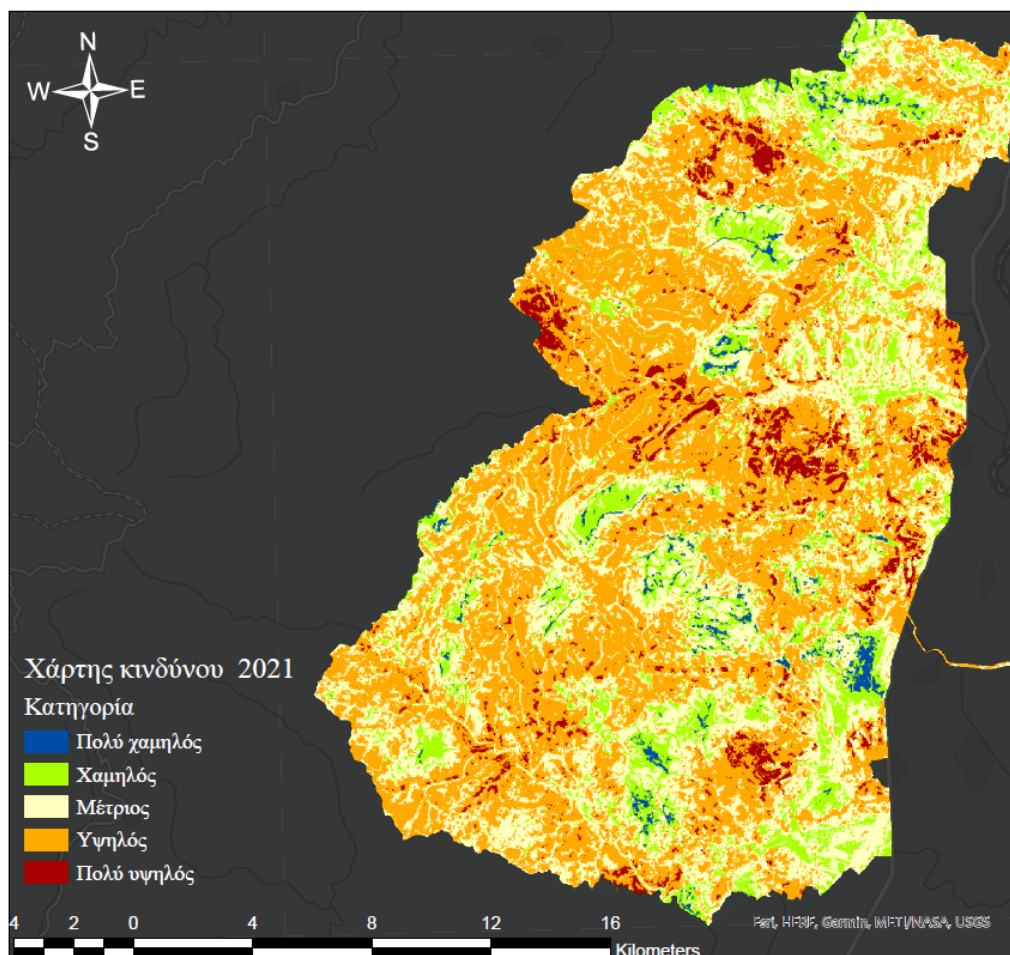
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 11 ο κίνδυνος πυρκαγιάς (ΚΠ) για τη περιοχή μελέτης του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου υπολογίστηκε από τη σχέση

$$ΚΠ = ΚΓ * 0,27 + Υ * 0,09 + ΠΕ * 0,05 + ΚΕ * 0,07 + ΤWΙ * 0,12 + ΑΔ * 0,23 + ΑΟ * 0,17 \quad (11)$$

### 7.3 Αποτελέσματα μοντέλου κινδύνου πυρκαγιάς για το 2021

#### 7.3.1 Μοντέλο κινδύνου αναφοράς (2021)

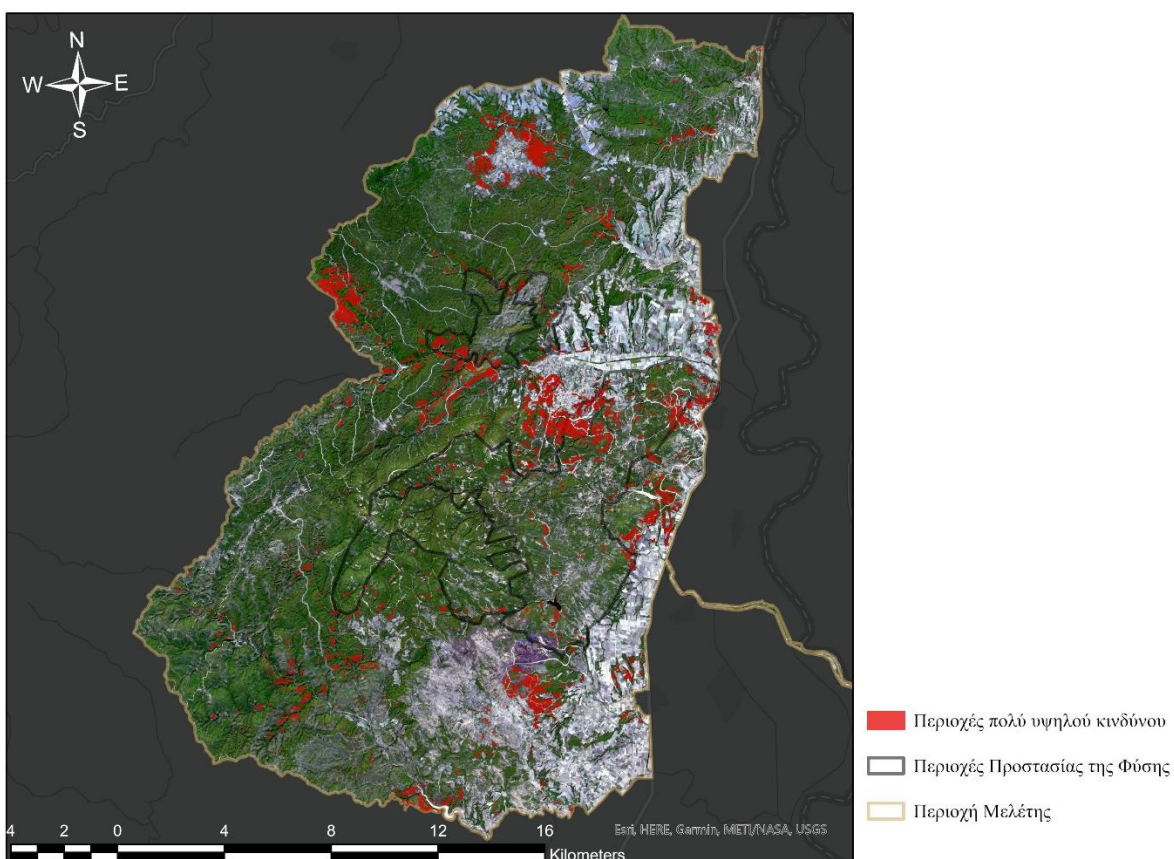
Με βάση τη σχέση (11) πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός του κινδύνου πυρκαγιάς για κάθε εικονοστοιχείο και το τελικό επίπεδο δεδομένων ψηφιδωτής έχει χωρική ανάλυση 25x25m. Η επιλογή των 25m έγινε με βάση τη χωρική ανάλυση των δεδομένων του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, που έχει και τη μικρότερη χωρική ανάλυση. Ο χάρτης κινδύνου πυρκαγιάς σύμφωνα με την κάλυψη της γης του Σεπτεμβρίου 2021 παρουσιάζεται στην Εικόνα 45, όπου ο κίνδυνος έχει απεικονιστεί με χρωματική διαβάθμιση σε 5 κατηγορίες.



Εικόνα 45: Ο χάρτης κινδύνου αναφοράς σύμφωνα με τη κάλυψη της γης του Σεπτεμβρίου 2021.

Το μεγαλύτερο τμήμα του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου χαρακτηρίζεται από υψηλό κίνδυνο πυρκαγιάς. Σύμφωνα με την ανάλυση των εικονοστοιχείων, το 50% του Εθνικού Πάρκου είναι σε “υψηλό κίνδυνο”. Το αποτέλεσμα οφείλεται στο γεγονός ότι μεγάλο μέρος του Εθνικού Πάρκου καλύπτεται από πευκοδάσος, το οποίο είναι ιδιαίτερα εύφλεκτο.

Ενδιαφέρον έχουν τα αποτελέσματα για τις περιοχές πολύ υψηλού κινδύνου. Οι περιοχές αυτές καλύπτουν το 5% της συνολικής έκτασης του Εθνικού Πάρκου. Το μεγαλύτερο μέρος των περιοχών αυτών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 45, συγκεντρώνεται σε συγκεκριμένες περιοχές του Εθνικού Πάρκου. Η πρώτη σημαντική περιοχή κινδύνου εντοπίζεται στο βόρειο τμήμα, κοντά στον οικισμό Γιαννούλη. Η δεύτερη και πιο εκτενής περιοχή εντοπίζεται στο κέντρο του Εθνικού Πάρκου περιμετρικά της νοητής ευθείας που ενώνει τον οικισμό Κοτρωνία με τον οικισμό Λαγυνά. Η τρίτη και τελευταία περιοχή εντοπίζεται νότια και συγκεκριμένα στο βόρειο τμήμα του οικισμού Λευκίμμη. Εντός του Εθνικού Πάρκου υπάρχουν και άλλες διάσπαρτες μικρότερες περιοχές πολύ υψηλού κινδύνου. Από αυτές, σημαντικότερη είναι η συστάδα υψηλού κινδύνου που παρατηρείται στο νοτιοδυτικό τμήμα του Εθνικού Πάρκου. Στην Εικόνα 46 έχουν απομονωθεί οι περιοχές πολύ υψηλού κινδύνου όπου είναι εμφανείς οι περιοχές που χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή σε περιόδους καύσωνα και ξηρασίας.

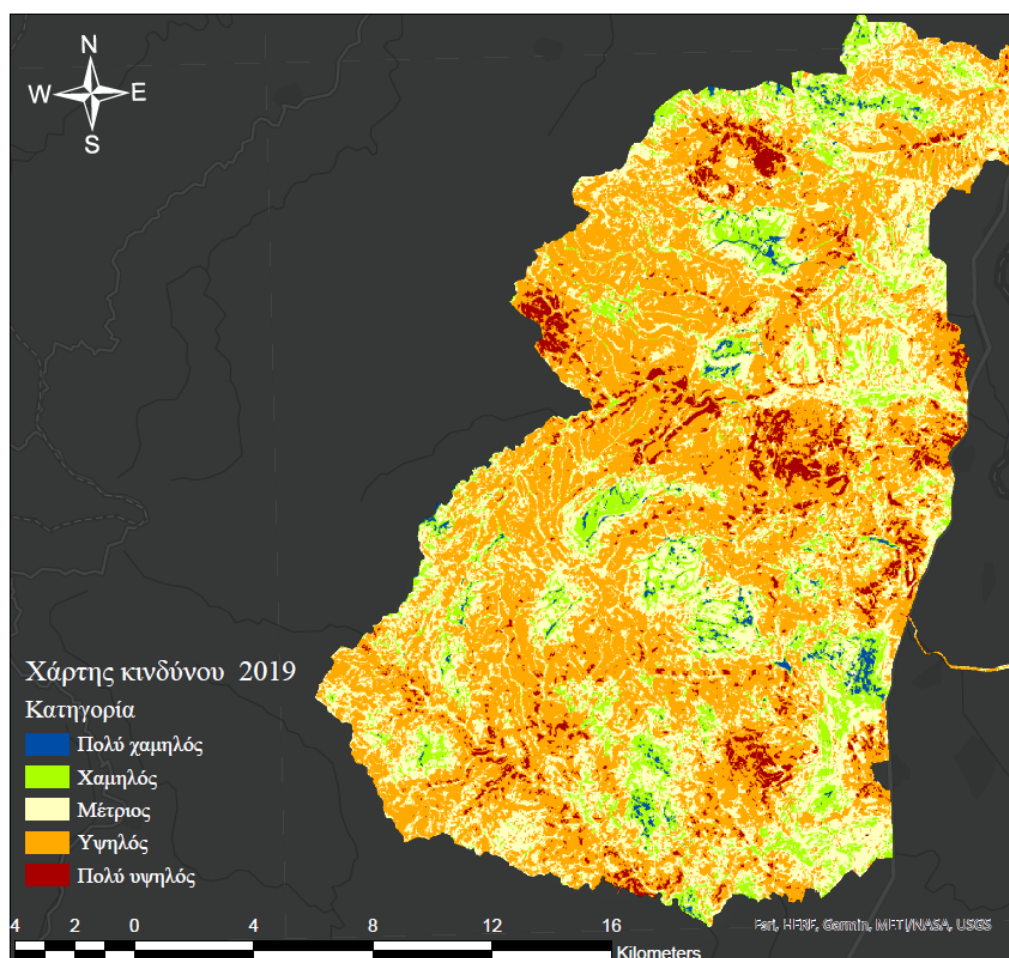


**Εικόνα 46:** Οι περιοχές πολύ υψηλού κινδύνου πυρκαγιάς για το έτος 2021, όπως αποτυπώνονται σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.



#### 7.4 Αποτελέσματα μοντέλου κινδύνου για το 2019 και η επίδραση της αλλαγής κάλυψης γης

Η κατασκευή του χάρτη κινδύνου για το Σεπτέμβριο του 2019 έγινε με εφαρμογή της σχέσης (11) της προηγούμενης Ενότητας 7.2.3. Η μόνη παράμετρος του μοντέλου που μεταβλήθηκε στο χρονικό διάστημα 2019-2021 είναι η κάλυψη γης. Η κάλυψη γης για τον Σεπτέμβριο 2019 υπολογίστηκε από πολυφασματική εικόνα του δορυφόρου Sentinel-2, στην οποία έγινε εφαρμογή του αλγορίθμου SVM, με ακριβώς ανάλογο τρόπο με αυτόν που περιεγράφηκε στη Ενότητα 5.1.3.1. Συγκεκριμένα, η εικόνα που επιλέχθηκε για τη κατηγοριοποίηση της κάλυψης γης λήφθηκε στις 18 Σεπτεμβρίου 2019 στις 09:06, με πρακτικά μηδενική νεφοκάλυψη έχοντας υποστεί ατμοσφαιρικές διορθώσεις, ώστε να απεικονίζεται ακριβέστερα η επιφάνεια της γης. Ο τελικός χάρτης κινδύνου σε μορφή δεδομένων ψηφιδωτής μορφής με χωρική ανάλυση 25x 25m παρουσιάζεται στην Εικόνα 47.



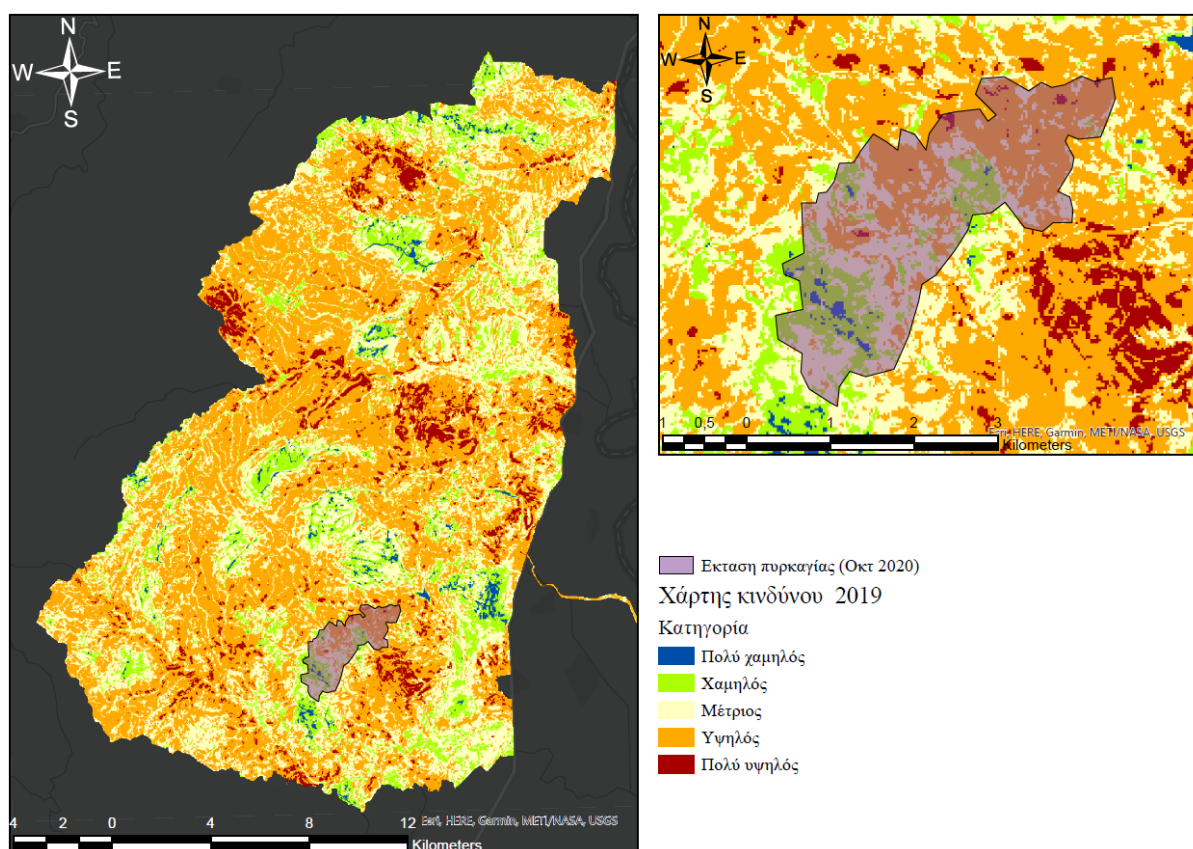
Εικόνα 47: Χάρτης κινδύνου αναφοράς σύμφωνα με τη κάλυψη της γης του Σεπτεμβρίου 2021.

Με μια πρώτη ματιά η Εικόνα 47 των περιοχών κινδύνου φαίνεται να μην διαφέρει με τον αντίστοιχο του έτους 2021 της Εικόνας 45. Σε τοπικό όμως επίπεδο υπάρχουν σημαντικές διαφορές, κυρίως λόγω των δύο πυρκαγιών που εκδηλώθηκαν την 1 Οκτωβρίου 2020 και στις 9 Ιουλίου 2021.

#### 7.4.1 Επίδραση πυρκαγιάς του Οκτωβρίου 2020 στο χάρτη κινδύνου

Η πυρκαγιά εκδηλώθηκε την 1<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2020 βόρεια του οικισμού Λευκίμη πολύ κοντά στη αντίστοιχη περιοχή πολύ υψηλό κινδύνου. Η έκταση της πυρκαγιάς χαρτογραφήθηκε με γεωαναφορά από την έκθεση του φορέα διαχείρισης του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου<sup>[92]</sup> και η ψηφιακή χαρτογράφηση επαληθευτική από τα δεδομένα “θερμών σημείων” (hotspots) του δορυφόρου VIIRS της NASA<sup>[93]</sup>. Στη συνέχεια για να εκτιμηθεί η επίδραση της πυρκαγιάς, αναλύθηκε η κατανομή κινδύνου των εικονοστοιχείων μέσα στη πληγείσα περιοχή, πριν και μετά την πυρκαγιά.

Αρχικά εξετάστηκε η κατανομή του κινδύνου των εικονοστοιχείων σύμφωνα με τον χάρτη του 2019. Στην Εικόνα 48 παρουσιάζεται η έκταση (694 ha) της πυρκαγιάς του Οκτωβρίου 2020 σε υπόβαθρο του χάρτη κινδύνου πυρκαγιάς του 2019.



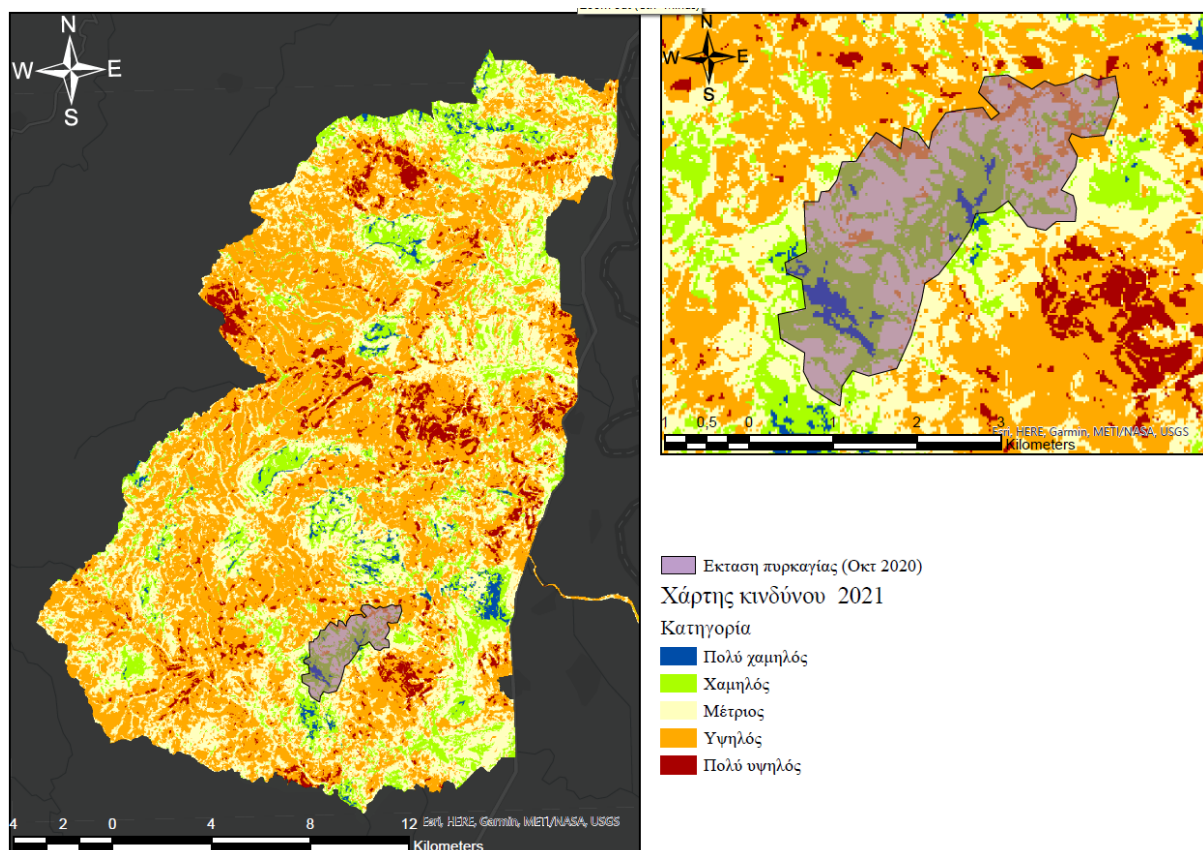
Εικόνα 48: Η έκταση (694 ha) της πυρκαγιάς του Οκτωβρίου 2020 σε υπόβαθρο του χάρτη κινδύνου 2019 και (δεξιά) η λεπτομέρεια της καμένης έκτασης.

Η πληγείσα έκταση χαρακτηρίζονταν πριν την πυρκαγιά ως περιοχή υψηλού κινδύνου σε ποσοστό 41%. Η περιοχή περιείχε σε ποσοστό 36% εικονοστοιχεία που έχουν κατηγοριοποιηθεί από το μοντέλο με μέτριου κινδύνου. Παρόλο που το ποσοστό της καμένης έκτασης που χαρακτηρίζονταν από πολύ υψηλό κίνδυνο είναι μόλις 1%, η πυρκαγιά εκδηλώθηκε πολύ κοντά σε μια από τις τρεις περιοχές που εμφανίζουν πολύ μεγάλη πυκνότητα πολύ υψηλού κινδύνου βόρεια του οικισμού Λευκίμη. Η αναλυτική κατανομή των εικονοστοιχείων για το χάρτη κινδύνου του 2019, εντός των ορίων της καμένης έκτασης που προκάλεσε η πυρκαγιά του Οκτωβρίου 2020 παρουσιάζεται στο Γράφημα 2.



*Γράφημα 2:* Η κατανομή των εικονοστοιχείων για το χάρτη κινδύνου του 2019, εντός των ορίων της της καμένης έκτασης που προκάλεσε η πυρκαγιά του Οκτωβρίου 2020.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η κατανομή του κινδύνου των εικονοστοιχείων σύμφωνα με τον χάρτη του 2021. Στην Εικόνα 49 παρουσιάζεται η έκταση (694 ha) της πυρκαγιάς του Οκτωβρίου 2020 σε υπόβαθρο του χάρτη κινδύνου του 2020.



*Εικόνα 49:* Η έκταση (694 ha) της πυρκαγιάς του Οκτωβρίου 2020 σε υπόβαθρο του χάρτη κινδύνου 2021 και (δεξιά) λεπτομέρεια της καμένης έκτασης..

Από τη κατανομή των εικονοστοιχείων είναι φανερό πως η **πυρκαγιά είχε πολύ σημαντική επίδραση στο χάρτη κινδύνου**. Η σημαντικότερη μεταβολή εμφανίζεται στα εικονοστοιχεία υψηλού κινδύνου, τα οποία από 41% της συνολικής έκτασης, μειώθηκαν μόλις στο 10%. Παράλληλα, αυξήθηκαν σημαντικά οι περιοχές χαμηλού κινδύνου, καθώς από 20%



αυξήθηκαν στο 37%. Οι αλλαγές αυτές έχουν ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της κατηγορίας κινδύνου της περιοχή, από υψηλό σε μέτριο προς χαμηλό. Η μεταβολή του κινδύνου, μπόρεσε να αποτυπωθεί στο μοντέλο κινδύνου από την επικαιροποίηση της κάλυψης γης, με τη βοήθεια του αλγόριθμου μηχανικής εκμάθησης SVM. Αυτός ήταν και ένας από τους βασικούς στόχους της διπλωματικής, δηλαδή να δημιουργηθεί μια μεθοδολογία που να δίνει τη δυνατότητα ανανέωσης του χάρτη κινδύνου πυρκαγιάς σύμφωνα με τις αλλαγές στη κάλυψη της γης. Η αναλυτική κατανομή των εικονοστοιχείων για το χάρτη κινδύνου του 2021 εντός των ορίων της καμένης έκτασης που προκάλεσε η πυρκαγιά του Οκτωβρίου 2020 παρουσιάζεται στο Γράφημα 3.

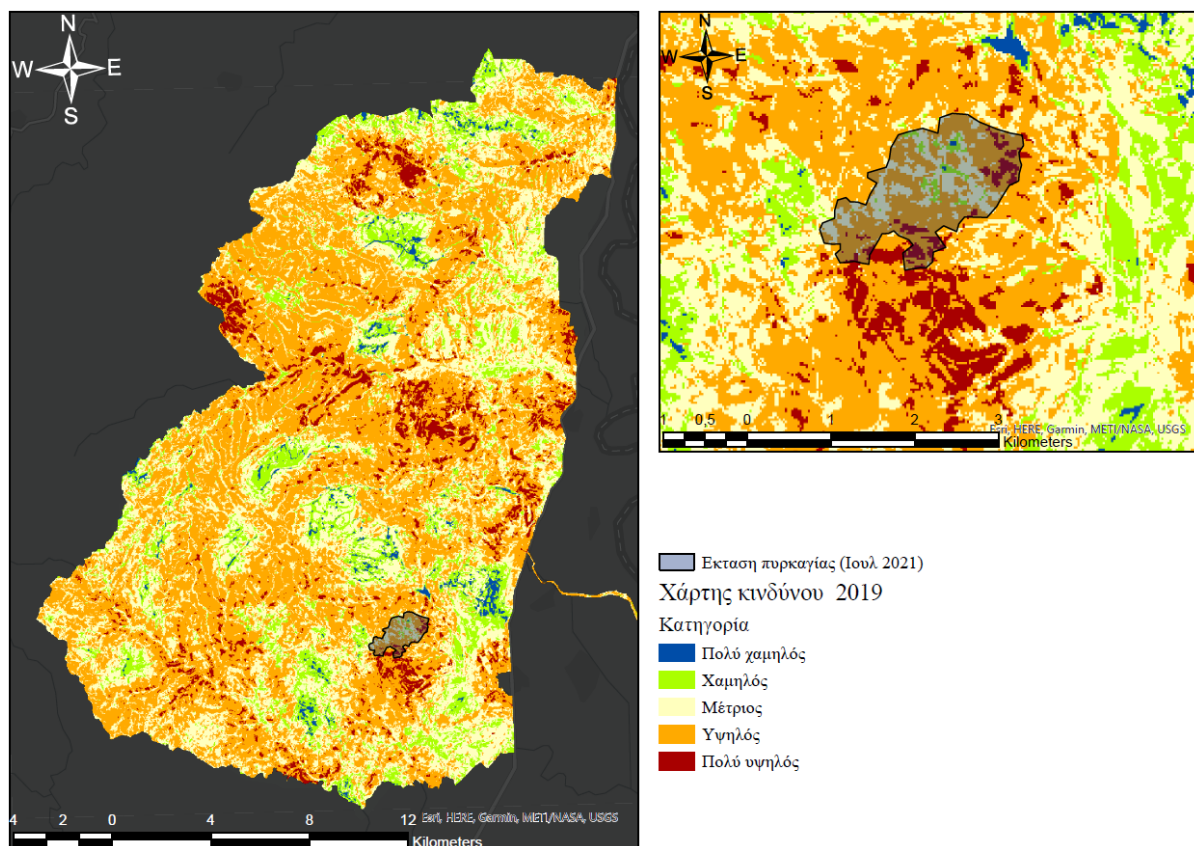


*Γράφημα 3: Η κατανομή των εικονοστοιχείων για το χάρτη κινδύνου του 2021 εντός των ορίων της καμένης έκτασης που προκάλεσε η πυρκαγιά του Οκτωβρίου 2020.*

#### 7.4.2 Επίδραση πυρκαγιάς του Ιουλίου 2021 στο χάρτη κινδύνου

Η διαδικασία μελέτης της επίδρασης της πυρκαγιάς που εκδηλώθηκε τον Ιούνιο 2021 είναι όμοια με αυτή της προηγούμενης υποενότητας. Αρχικά, η έκταση της πυρκαγιάς χαρτογραφήθηκε από την έκθεση του φορέα διαχείρισης του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου<sup>[94]</sup> και η ψηφιακή χαρτογράφηση επαληθεύτηκε από τα δεδομένα “θερμών σημείων” (hotspots) του δορυφόρου VIIRS της NASA<sup>[93]</sup>. Στη συνέχεια για να εκτιμηθεί η επίδραση της πυρκαγιάς στο κίνδυνο αναλύθηκε η κατανομή κινδύνου των εικονοστοιχείων μέσα στη πληγείσα περιοχή πριν και μετά τη πυρκαγιά.

Αρχικά εξετάστηκε η κατανομή του κινδύνου των εικονοστοιχείων σύμφωνα με τον χάρτη του 2019. Στην εικόνα 52 παρουσιάζεται η έκταση (242 ha) της πυρκαγιάς του Ιουλίου 2021 σε υπόβαθρο του χάρτη κινδύνου του 2019.



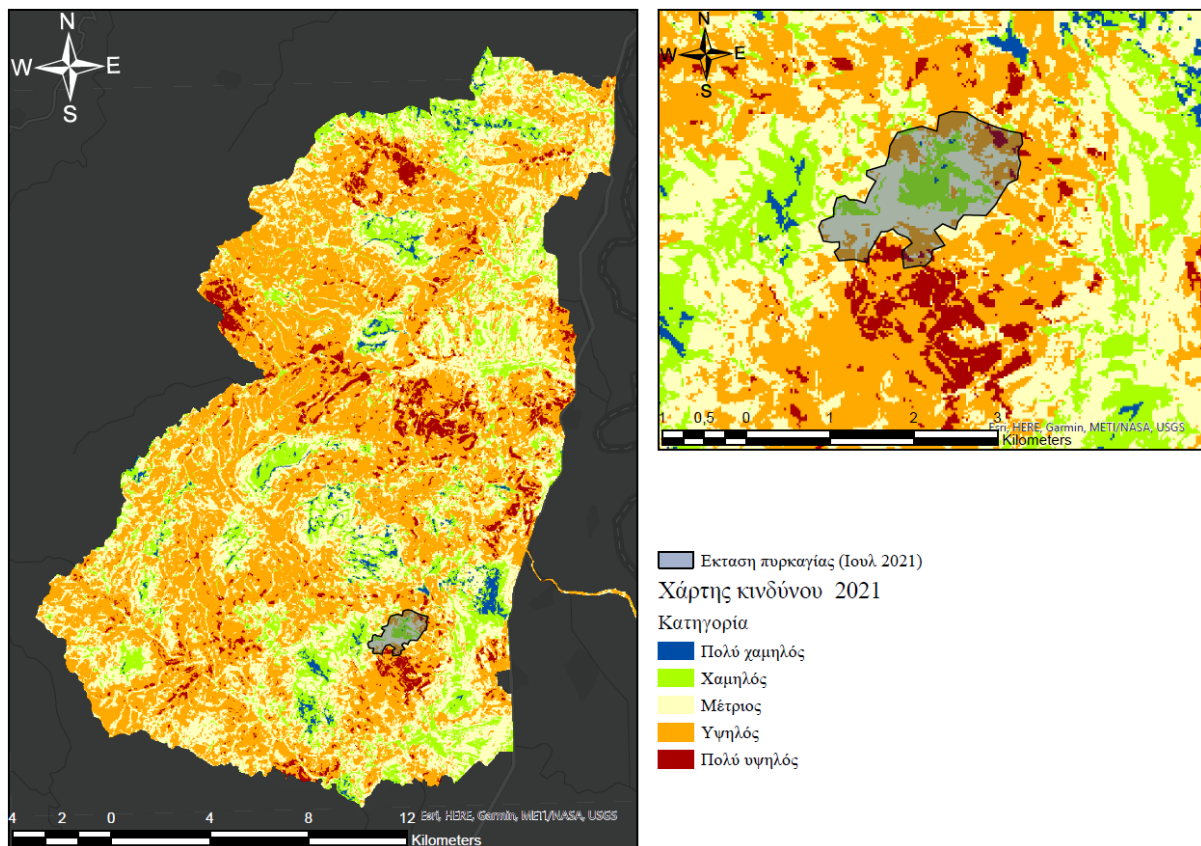
**Εικόνα 50:** Η έκταση (242 ha) της πυρκαγιάς του Ιουλίου 2021 σε υπόβαθρο του χάρτη κινδύνου 2019 και (δεξιά) λεπτομέρεια της καμένης έκτασης.

Η πληγείσα περιοχή πριν την πυρκαγιά χαρακτηρίζονταν ως περιοχή υψηλού κινδύνου με ποσοστό 59%. Παράλληλα πολύ υψηλό είναι και το ποσοστό της περιοχής που ήταν σε πολύ υψηλό κίνδυνο (10%). Επίσης, η καμένη έκταση περιβάλλεται από περιοχές πολύ υψηλού κινδύνου, που είναι πολύ πιθανό να αποτελούν σημεία έναρξης. Η αναλυτική κατανομή των εικονοστοιχείων για το χάρτη κινδύνου του 2019 εντός των ορίων της καμένης έκτασης που προκάλεσε η πυρκαγιά του Ιουλίου 2021 παρουσιάζεται στο Γράφημα 4.



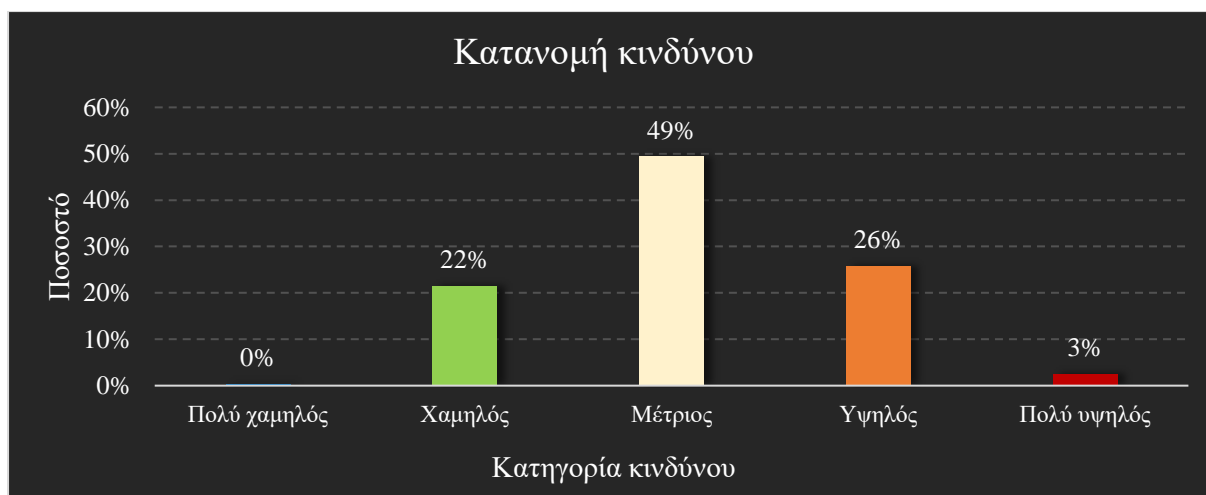
**Γράφημα 4:** Η κατανομή των εικονοστοιχείων για το χάρτη κινδύνου του 2019 εντός των ορίων της καμένης έκτασης που προκάλεσε η πυρκαγιά του Ιουλίου 2021.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η κατανομή του κινδύνου των εικονοστοιχείων σύμφωνα με τον χάρτη του 2021. Στην Εικόνα 51 παρουσιάζεται η έκταση (242 ha) της πυρκαγιάς του Ιουλίου 2021 πάνω σε υπόβαθρο του χάρτη κινδύνου 2021.



Εικόνα 51: Η έκταση (242 ha) της πυρκαγιάς του Ιουλίου 2021 σε υπόβαθρο του χάρτη κινδύνου 2021 και (δεξιά) λεπτομέρεια της καμένης έκτασης.

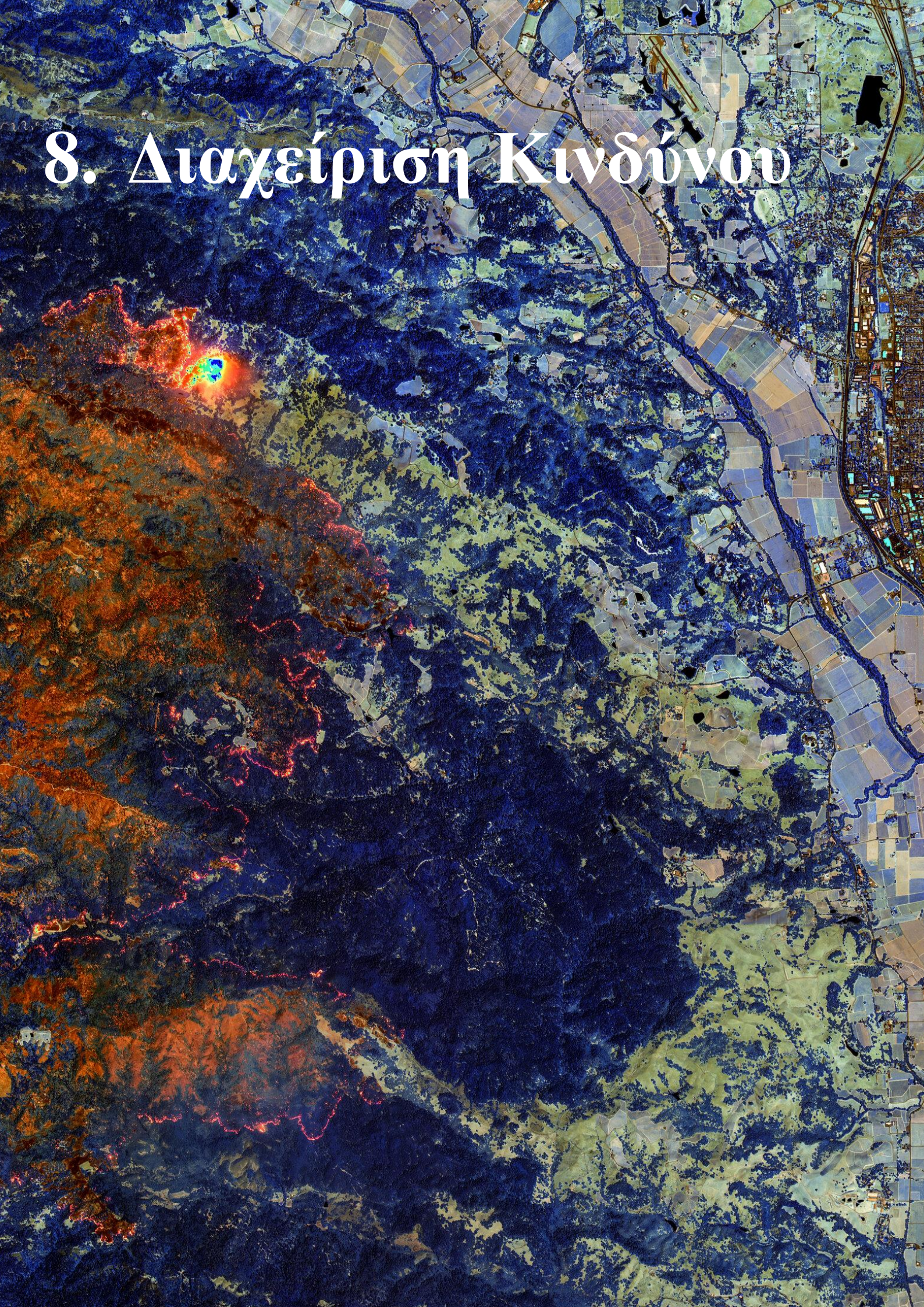
Στη περίπτωση της πυρκαγιάς του Ιουλίου 2021 η μεταβολή του κινδύνου στη περιοχή επίδρασης είναι ακόμα πιο εμφανής. Η περιοχή πλέον κατατάσσεται σε κατηγορία μέτριου κινδύνου, με ποσοστό κάλυψης 49%. Παράλληλα, σημαντική αύξηση παρουσιάζουν οι περιοχές χαμηλού κινδύνου, καθώς το ποσοστό κάλυψης από μόλις 4% πριν την πυρκαγιά αυξήθηκε σε 22%. Η σημαντικότερη μεταβολή όμως, που σε μεγάλο βαθμό αποτυπώνει και την αλλαγή στη κατηγορία κινδύνου, παρατηρείται στις περιοχές υψηλού κινδύνου. Συγκεκριμένα, το ποσοστό κάλυψης από 59% πριν την πυρκαγιά μειώθηκε σε 26%. Είναι εμφανές ότι και σε αυτή η περίπτωση το μοντέλο μπόρεσε να μεταφράσει την αλλαγή στη κάλυψη γης σε μεταβολή της κατηγορίας κινδύνου στη περιοχή. Παράλληλα και σε αυτή τη περίπτωση η πυρκαγιά είναι πολύ κοντά σε μία από τις 3 περιοχές που έχουν αναγνωριστεί ως περιοχές συγκέντρωσης πολύ υψηλού κινδύνου. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη για την εγκυρότητα του μοντέλου. Η αναλυτική κατανομή των εικονοστοιχείων για το χάρτη κινδύνου του 2021 εντός των ορίων της καμένης έκτασης που προκάλεσε η πυρκαγιά του Ιουλίου 2021 παρουσιάζεται στο Γράφημα 5.



*Γράφημα 5: Η κατανομή των εικονοστοιχείων για το χάρτη κινδύνου του 2021 εντός των ορίων της καμένης έκτασης που προκάλεσε η πυρκαγιά του Ιουλίου 2021.*



# 8. Διαχείριση Κινδύνου



## 8 Εφαρμογές των Σ.Γ.Π. στη διαχείριση πυροσβεστικών υποδομών

### 8.1 Μεθοδολογία αναγνώρισης κατάλληλων θέσεων και λύσεων για τη παρακολούθηση του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και της ευρύτερης περιοχής του Έβρου.

Ο έγκαιρος εντοπισμός των εστιών φωτιάς μπορεί να αποτρέψει την ανάπτυξη τους σε πυρκαγιές μεγάλης έκτασης. Ο σωστός σχεδιασμός παρακολούθησης των δασικών εκτάσεων, ιδιαίτερα αυτών που χαρακτηρίζονται από υψηλό κίνδυνο και ευπάθεια, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στάδια της διαχείρισης του κινδύνου πυρκαγιάς. Με βάση τα γεωχωρικά δεδομένα που παρασχέθηκαν από το Τμήμα Επιχειρησιακής Πληροφορικής και Γεωχωρικής Ανάλυσης / Δνση Πληροφορικής και Επικοινωνιών του Αρχηγείου Πυροσβεστικού Σώματος για τις υποδομές παρακολούθησης στο νομό Έβρου, αρχικά μελετήθηκαν οι δυνατότητες παρακολούθησης των υφιστάμενων υποδομών. Στη συνέχεια με την εφαρμογή πολυκριτηριακής ανάλυσης και του αλγορίθμου Τυχαίων Δασών (Random Forest Classification) μηχανικής εκμάθησης σε περιβάλλον Σ.Γ.Π., προτείνονται θέσεις που μπορούν να φιλοξενήσουν νέα πυροφυλάκια και προτείνονται λύσεις βελτίωσης της παρακολούθησης της περιοχής μελέτης. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε για τον εντοπισμό των κατάλληλων θέσεων είναι γενικό και μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε περιοχή. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στις περιοχές που περιβάλλουν το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου, καθώς σε αυτές βρίσκονται και οι σημαντικότερες δασικές εκτάσεις του νομού Έβρου.

#### 8.1.1 Μοντέλο ορατότητας σε Σ.Γ.Π.

Στο πρώτο στάδιο μελέτης διερευνήθηκε η ορατότητα στην περιοχή του νομού Έβρου από τα υφιστάμενα πυροφυλάκια και τις περιπόλους. Το μοντέλο ορατότητας δίνει τη δυνατότητα να απεικονιστούν οι περιοχές που είναι ορατές από σημεία (διανυσματικά δεδομένα) που έχουν οριστεί ως παρατηρητές. Στον υπολογισμό της ορατότητας συμπεριλήφθηκαν όλες οι θέσεις παρατήρησης από τα δεδομένα του Αρχηγείου Πυροσβεστικού Σώματος, κάτι που συμβαίνει σε περιόδους υψηλού κινδύνου πυρκαγιάς. Για τη διεξαγωγή της ανάλυσης ορατότητας (Visibility) χρειάζεται να καθοριστούν 7 παράμετροι<sup>[95]</sup>: Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, το ύψος της θέσης του παρατηρητή, το ύψος του στόχου, η εσωτερική και εξωτερική ακτίνα θέασης και τα όρια των επιτρεπτών πολικών γωνιών θέασης.

Η βασικότερη παράμετρος του μοντέλου ορατότητας είναι το **ψηφιακό μοντέλο εδάφους** (DEM). Σύμφωνα με τα δεδομένα του DEM για τη περιοχή του νομού Έβρου υπολογίστηκαν οι οπτικοί άξονες των παρατηρητών. Στην ανάλυση ορατότητας αξιοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του Copernicus με χωρική ανάλυση 25x25m, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια.

Το **ύψος της θέσης των παρατηρητών** (H) εκτιμήθηκε με βάση τα δεδομένα του Πυροσβεστικού Σώματος. Οι θέσεις παρατήρησής βρίσκονται τόσο πάνω σε υπερυψωμένα πυροφυλάκια όσο και σε πεζές περιπόλους. Με βάση τη βιβλιογραφία ένα τυπικό πυροφυλάκιο έχει ύψος από 4 έως και 15 μέτρα<sup>[95-97]</sup>. Στη παρούσα μελέτη το ύψος των πυροφυλακίων εκτιμήθηκε στα 5m και το ύψος των πεζών περιπολιών το 1,5m.

Το **ύψος του στόχου** (h) καθορίζεται σύμφωνα με το μέγιστο ύψος του καπνού. Με δεδομένο ότι η εστία χρειάζεται να γίνει αντιληπτή στα αρχικά στάδια της πυρκαγιάς, το ύψος του



καπνού ορίστηκε στα 100m. Σε αυτή την εκτίμηση συμφωνούν και άλλες συναφείς μελέτες ανάχνευσης πυρκαγιών <sup>[95, 97]</sup>.

Η **εσωτερική ακτίνα** ( $r_{min}$ ) περιγράφει την ελάχιστη απόσταση στην οποία ο παρατηρητής έχει οπτική επαφή με το έδαφος. Όπως είναι αναμενόμενο, είναι απίθανο να μην γίνει αντιληπτή εστία που βρίσκεται κάτω από τις θέσεις παρατήρησης, ακόμα και αν ο παρατηρητής δεν έχει άμεση οπτική επαφή. Επομένως η εσωτερική ακτίνα ορίστηκε,  $r_{min}=0$ .

Η **εξωτερική ακτίνα** ( $r_{max}$ ) αποτυπώνει τη μέγιστη απόσταση στην οποία ο παρατηρητής μπορεί να διακρίνει το καπνό από την εστία. Η ακτίνα ορατότητας εξαρτάται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες της περιοχής. Για περιπτώσεις που η ατμόσφαιρα είναι σχετικά καθαρή η εξωτερική ακτίνα ορίστηκε στα 15 km. Η εκτίμηση αυτής της τιμής έγινε μετά από βιβλιογραφική επισκόπηση, στην οποία η ακτίνα ορατότητας κυμαίνεται από 10 έως 20km<sup>[95, 97]</sup>, σε συνθήκες καθαρής ατμόσφαιρας.

Τέλος, οι **πολικές γωνίες** ( $\varphi$ ,  $\theta$ ) ορίζουν τα όρια της περιφερειακής ορατότητας των παρατηρητών. Στη προκειμένη περίπτωση εκτιμήθηκε ότι οι παρατηρητές έχουν πλήρη περιμετρική ορατότητα, διότι οι θέσεις παρακολούθησης έχουν επιλεγεί με τρόπο ώστε στους οπτικούς άξονες τους δεν παρεμβάλλονται εμπόδια. Στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται συνοπτικά οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο ορατότητας. Να σημειωθεί ότι οι τιμές των παραμέτρων διατηρήθηκαν σε όλα τα μοντέλα ορατότητας.

Παρατηρητές	DEM	H (m)	h (m)	$r_{min}$ (m)	$r_{max}$ (m)	$\varphi$ (°)	$\theta$ (°)
πυροφυλάκια	Copernicus DEM (25x25m)	5	100	0	15000	+90/-90	360
περιπολίεις	Copernicus DEM (25x25m)	1,5	100	0	15000	+90/-90	360

*Πίνακας 12: Παράμετροι μοντέλου ορατότητας.*

### 8.1.2 Μοντέλο καταλληλότητας περιοχών κατασκευής πυροφυλακίων με την εφαρμογή αλγορίθμου Τυχαίων Δασών μηχανικής εκμάθησης και Πολυκριτηριακής Ανάλυσης.

Ανεξάρτητα με τη μελέτη της ορατότητας, στη παρούσα διπλωματική θα προταθεί ένα μοντέλο για την αναγνώριση πιθανών θέσεων στις οποίες μπορούν να κατασκευαστούν νέα πυροφυλάκια. Το συγκεκριμένο ζήτημα αποτελεί ένα σχετικά ανεξερεύνητο αντικείμενο επιστημονικής ερευνάς σε Σ.Γ.Π. Μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση του θέματος βρέθηκαν λίγες μελέτες σχετικές με το θέμα, οι οποίες περιείχαν περιορισμένο αριθμό πληροφοριών<sup>[97]</sup>. Οι περισσότερες μελέτες ασχολούνται αποκλειστικά με την αξιολόγηση ορατότητας από τις θέσεις των πυροφυλακίων, χωρίς να επεκτείνονται σε διερεύνηση της βελτίωσης της παρακολούθησης<sup>[95,96]</sup>.

Με βάση τις πληροφορίες που εξήχθησαν από αυτές τις μελέτες, οι βασικές παράμετροι που συντελούν στην καταλληλότητα μιας τοποθεσίας για τη κατασκευή των πυροφυλακίων είναι οι ακόλουθοι:<sup>[97]</sup>



- Υψόμετρο
- Κλίση του εδάφους
- Απόσταση από τις κορυφογραμμές
- Απόσταση από το οδικό δίκτυο

Αρχικά, το **υψόμετρο** επιδρά στην ορατότητα που έχουν τα πυροφυλάκια. Περιοχές σε υψηλότερα υψόμετρα έχουν ευρύτερο πεδίο ορατότητας, καθιστώντας τες ιδανικότερες για να φιλοξενήσουν υποδομές παρακολούθησης.

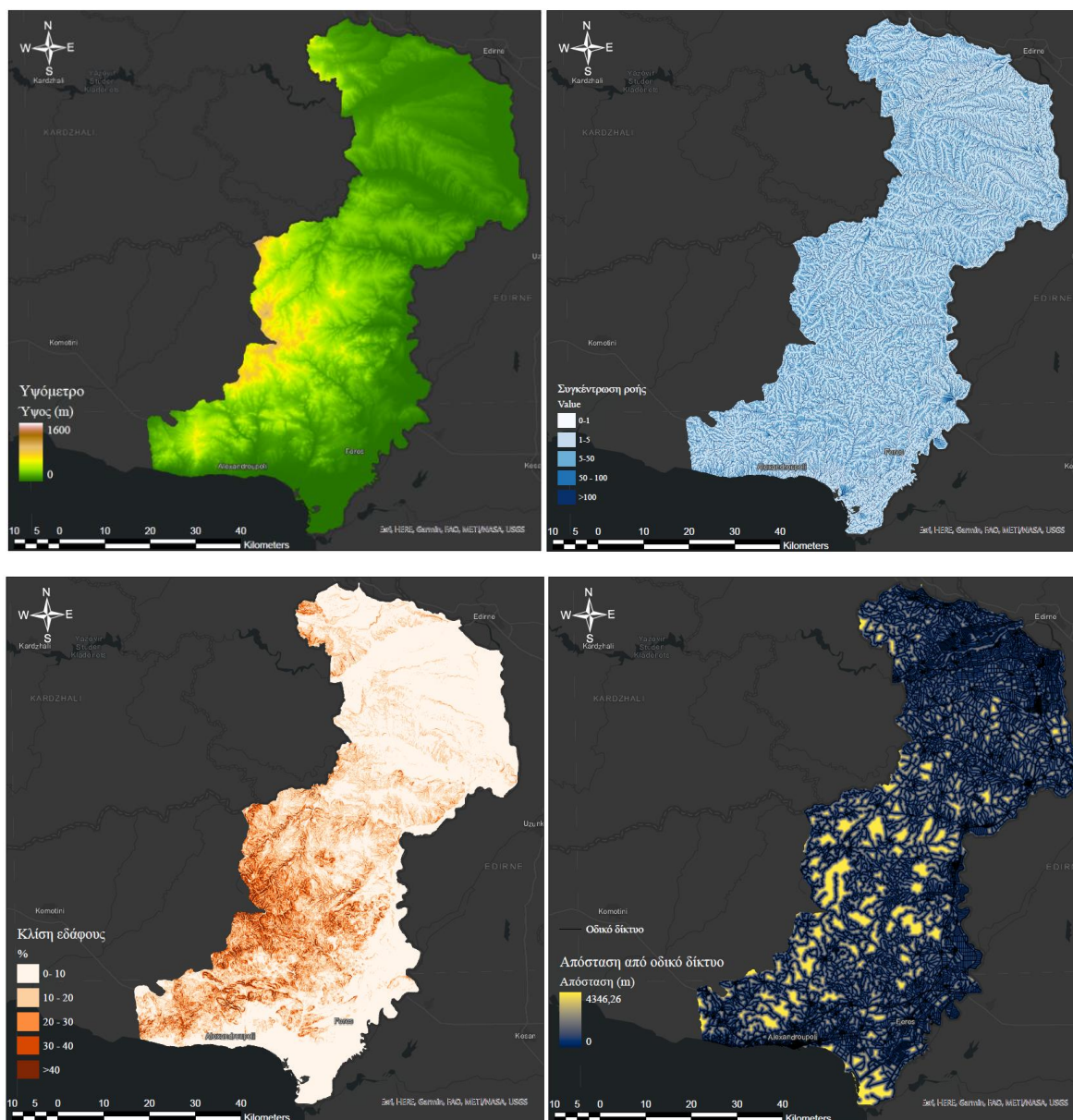
Πέρα από το υψόμετρο, για την επίτευξη καλύτερης ορατότητας είναι σημαντικό τα πυροφυλάκια να βρίσκονται **κοντά σε κορυφογραμμές**. Με αυτό το τρόπο μειώνεται η πιθανότητα να υπάρχουν φυσικά εμπόδια ανάμεσα στο παρατηρητή και τη περιοχή παρακολούθησης.

Η **κλίση** του εδάφους είναι σημαντική για την ανίχνευση των περιοχών που είναι δυνατόν να κατασκευαστούν πυροφυλάκια και για τη μείωση του κόστους των εργασιών. Όπως είναι αναμενόμενο η ανέγερση ενός πυροφυλάκιου είναι πιο εύκολη σε θέσεις με μικρές κλίσεις εδάφους. Η αύξηση της κλίσης του εδάφους δυσχεραίνει τις εργασίες κατασκευής, ενώ μεγάλες κλίσεις την καθιστούν απαγορευτική.

Τέλος, σημαντικό ρόλο έχει και η **απόσταση από το οδικό δίκτυο**. Οι θέσεις των πυροφυλακίων πρέπει να είναι κοντά σε δρόμους, ώστε να είναι εύκολα προσβάσιμες από το πυροσβεστικό προσωπικό.

Οι παράγοντες καταλληλότητας έχουν υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 5. Να σημειωθεί ότι η απεικόνιση των περιοχών που βρίσκονται κοντά σε κορυφογραμμές έγινε μέσω του επιπέδου της συγκέντρωσης ροής που παρουσιάστηκε αναλυτικά στη Υποενότητα 5.2.2. Οι κορυφογραμμές αποτελούν περιοχές χαμηλής συγκέντρωσης νερού επομένως στο επίπεδο συγκέντρωσης ροής θα έχουν τιμές κοντά στο 0. Με βάση αυτή τη παρατήρηση, οι περιοχές των κορυφογραμμών του νομού Έβρου εκτιμήθηκαν από τη συγκέντρωση ροής των υδάτων<sup>[97]</sup>.

Οι παράμετροι καταλληλότητας (Εικόνα 52) θα αποτελέσουν τα δεδομένα με τα οποία θα κατασκευαστεί ένα μοντέλο γραμμικής πολυκριτηριακής ανάλυσης (MCDA). Το μοντέλο αυτό, με βάση τους 4 παράγοντες, διαβαθμίζει τη περιοχή του νομού Έβρου ανάλογα με τη καταλληλότητα τους να φιλοξενήσουν πυροφυλάκια. Στη παρούσα περίπτωση δεν υπήρχαν δεδομένα που να υποδεικνύουν τους συντελεστές βαρύτητας, ούτε και στοιχεία σχετικών συγκρίσεων των παραγόντων καταλληλότητας, ώστε να γίνει εφαρμογή Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP). Επομένως, για την εκτίμηση των συντελεστών βάρους έπρεπε να διερευνηθεί μια διαφορετική προσέγγιση.



*Εικόνα 52:* Τα επίπεδα δεδομένων ψηφιδωτής μορφής των παραμέτρων που συμπεριλήφθηκαν στο μοντέλο καταλληλότητας για την διερεύνηση των θέσεων που μπορούν να κατασκευαστούν νέα πυροφυλάκια. Στις εικόνες παρουσιάζονται κατά σειρά: το υψόμετρο, η συγκέντρωση ροής, η κλίση του εδάφους και η απόσταση από το οδικό δίκτυο.

Μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους χωρικής παλινδρόμησης είναι ο **αλγόριθμος μηχανικής εκμάθησης Τυχαίων Δασών** (Random Forest Classifier/Regression)<sup>[99]</sup>. Στην παρούσα μελέτη έγινε εφαρμογή του αλγορίθμου για την αναγνώριση των χαρακτηριστικών των δεδομένων που χαρακτηρίζουν τις υφιστάμενες θέσεις των πυροφυλακίων. Συγκεκριμένα κατασκευάστηκε ένα επίπεδο σημειακών διανυσματικών δεδομένων με τις θέσεις των δέκα υφιστάμενων πυροφυλακίων και τυχαίες θέσεις που φυσικά δεν υπάρχουν πυροφυλάκια. Κάθε θέση χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες τιμές των τεσσάρων παραμέτρων καταλληλότητας. Τα δεδομένα αυτά αποτέλεσαν το δείγμα εκπαίδευσης του αλγορίθμου, ώστε στη συνέχεια να αναγνωριστεί η σημαντικότητα των παραμέτρων για το χαρακτηρισμό μιας περιοχής κατάλληλης ή ακατάλληλης.

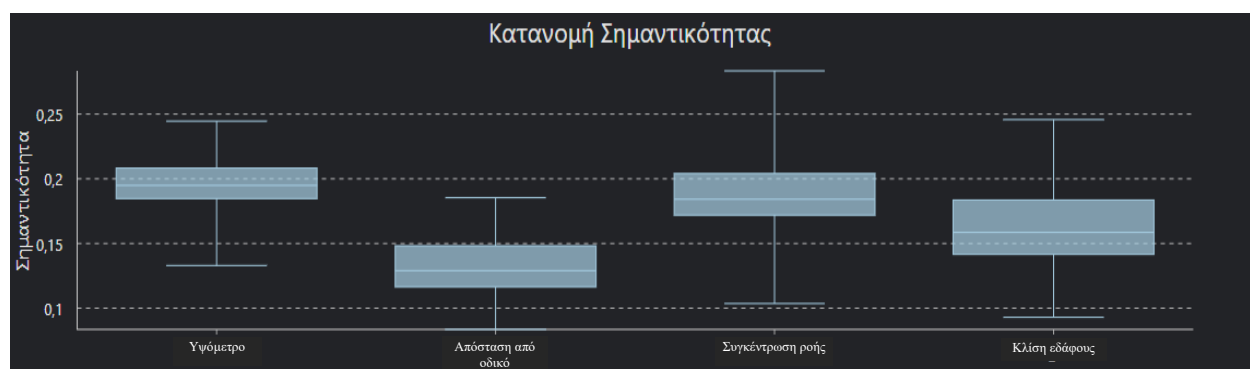
Ο αλγόριθμος αποτελείται από πολλά δένδρα απόφασης και κάθε δένδρο απόφασης αποτελεί ένα εργαλείο που ταξινομεί την καταλληλότητα της περιοχής ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των 4 παραμέτρων. Σε κάθε δένδρο εισάγονται δεδομένα για τις παραμέτρους καταλληλότητας και την κατηγορία καταλληλότητας (κατάλληλη ή ακατάλληλη). Στη συνέχεια ο αλγόριθμος υπολογίζει ποιες τιμές καθορίζουν τη καταλληλότητα της περιοχής και κατασκευάζει ένα σύνολο λογικές πράξεις ώστε να μπορέσουν να ταξινομηθούν περιοχές που δεν ανήκουν στα δεδομένα εκπαίδευσης. Κάθε δένδρο του αλγορίθμου χωρίζεται σε υποδένδρα που καταλήγουν σε “φύλλα” που είναι διάφοροι συνδυασμοί των παραμέτρων. Η βάση του δένδρου είναι η τελική κατηγοριοποίηση της καταλληλότητας της περιοχής. Ο αλγόριθμος μηχανικής εκμάθησης Τυχαίων Δασών χρησιμοποιεί εκατοντάδες δένδρα και ένα από τα αποτελέσματα που εξάγει είναι η σημαντικότητα της κάθε παραμέτρου στην τελική ταξινόμηση.

Τα χωρικά δεδομένα εκπαίδευσης εισήχθησαν στον αλγόριθμο και μετά από εκατοντάδες διαδοχικούς αλγορίθμους τυχαίων δένδρων εκτιμήθηκε η σημαντικότητα της κάθε παραμέτρου στη τελική απόφαση. Η διαδικασία αυτή αποτελεί ένα κύκλο (loop) του αλγορίθμου και το αποτέλεσμα του κύκλου είναι ένας συντελεστής βαρύτητας για κάθε μια από τις τέσσερις παραμέτρους καταλληλότητας. Η επιλογή των δένδρων και των υποδένδρων τους είναι εντελώς τυχαία, επομένως κάθε επανάληψη ενός κύκλου του αλγορίθμου έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας. Η τελική εκτίμηση των συντελεστών βαρύτητας που χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια στο μοντέλο πολυκριτηριακής ανάλυσης, έγινε από τη μέση τιμή των αποτελεσμάτων 100 κύκλων του αλγορίθμου τυχαίου δάσους.

Η τελική εκτίμηση των συντελεστών βαρύτητας παρουσιάζεται στο Πίνακα 13 τα οποία βασίζονται στα αποτελέσματα του αλγορίθμου τυχαίου δάσους που εμφανίζονται στο Γράφημα 6.

Παράγοντες Καταλληλότητας	Σημαντικότητα	Συντελεστής βαρύτητας
Υψόμετρο (Υ)	0,17	0,28
Κλίση εδάφους (ΚΕ)	0,16	0,26
Απόσταση από οδικό δίκτυο (ΑΔ)	0,11	0,18
Συγκέντρωση ροής (ΣΡ)	0,17	0,28

Πίνακας 13: Εκτίμηση των συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τα αποτελέσματα 100 κύκλων του αλγορίθμου τυχαίου δάσους.



Γράφημα 6: Στατιστικά αποτελέσματα του του αλγορίθμου τυχαίου δάσους για τη σημαντικότητα των παραμέτρων καταλληλότητας.



Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου Τυχαίου Δάσους όλες οι παράμετροι είναι αρκετά σημαντικές και σχετικά ισοδύναμες στη τελική απόφαση. Η μικρότερη συνεισφορά παρατηρείται από την παράμετρο της απόστασης από το οδικό δίκτυο με συντελεστή βαρύτητας 0,18. Ο αλγόριθμος δεν επιλέχθηκε να εφαρμοστεί για τη τελική εκτίμηση των κατάλληλων περιοχών, γιατί το δείγμα των κατάλληλων τοποθεσιών σύμφωνα με τα υφιστάμενα πυροφυλάκια ήταν πολύ μικρό (12).

Η μεθοδολογία για την εκτίμηση των συντελεστών βαρύτητας ουσιαστικά αντικατέστησε την Αναλυτική Ιεράρχηση που εφαρμόστηκε στην Ενότητα 7.2.3. Τα επόμενα βήματα για την αναγνώριση πιθανών περιοχών που μπορούν να κατασκευαστούν πυροφυλάκια είναι παρόμοια με αυτά που έχουν περιγράψει στην Υποενότητα 7.2. Συγκεκριμένα περιλαμβάνουν την μετατροπή των παραγόντων καταλληλότητας σε μια ενιαία κλίμακα τιμών (reclassification) και στη συνέχεια το γραμμικό τους συνδυασμό σύμφωνα με τους συντελεστές βαρύτητας.

Στο παρόν μοντέλο καταλληλότητας οι παράμετροι ανατιμήθηκαν σε 0 και 1. Με 0 αντικαταστάθηκαν οι τιμές των περιοχών κάθε παραμέτρου που δεν είναι κατάλληλες για να κατασκευαστούν πυροφυλάκια και με 1 οι τιμές που των περιοχών που είναι κατάλληλες. Για τη παράμετρο του υψομέτρου, ως κατάλληλες χαρακτηρίστηκαν οι περιοχές που βρίσκονται σε ύψος μεγαλύτερο των 300m. Επίσης, κατάλληλες χαρακτηρίστηκαν οι περιοχές με κλίση από 0 έως 10 %. Όσον αφορά στη συγκέντρωση ροής, κατάλληλες εκτιμήθηκε ότι είναι οι περιοχές με τιμές από 0 έως 1. Τέλος, κατάλληλες χαρακτηρίστηκαν οι περιοχές που απέχουν από δρόμους λιγότερο από 300m. Η κατηγοριοποίηση των παραγόντων καταλληλότητας στη κλίμακα 0 και 1 παρουσιάζεται στο συγκεντρωτικό Πίνακα 14.

Παράγοντας	Κατηγορία	Κλίμακα καταλληλότητας	Περιγραφή καταλληλότητας
Υψόμετρο (Υ)	< 300	0	Ακατάλληλη
	300 <	1	Κατάλληλη
Κλίση εδάφους (ΚΕ)	10 <	0	Ακατάλληλη
	< 10	1	Κατάλληλη
Απόσταση από οδικό δίκτυο (ΑΔ)	300 <	0	Ακατάλληλη
	< 300	1	Κατάλληλη
Συγκέντρωση ροής (ΣΡ)	1 <	0	Ακατάλληλη
	< 1	1	Κατάλληλη

*Πίνακας 14: Η κατηγοριοποίηση των παραγόντων του μοντέλου στη κλίμακα καταλληλότητας 0 και 1.*

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 13 και την κατηγοριοποίηση των παραμέτρων του Πίνακα 14, η καταλληλότητα κατασκευής πυροφυλακίων (ΚΚΠ) για τη περιοχή του νομού Έβρου υπολογίστηκε από τη σχέση

$$ΚΚΠ = 0,28 * Υ + 0,26 * ΚΕ + 0,18 * ΑΔ + 0,28 * ΣΡ \quad (12)$$

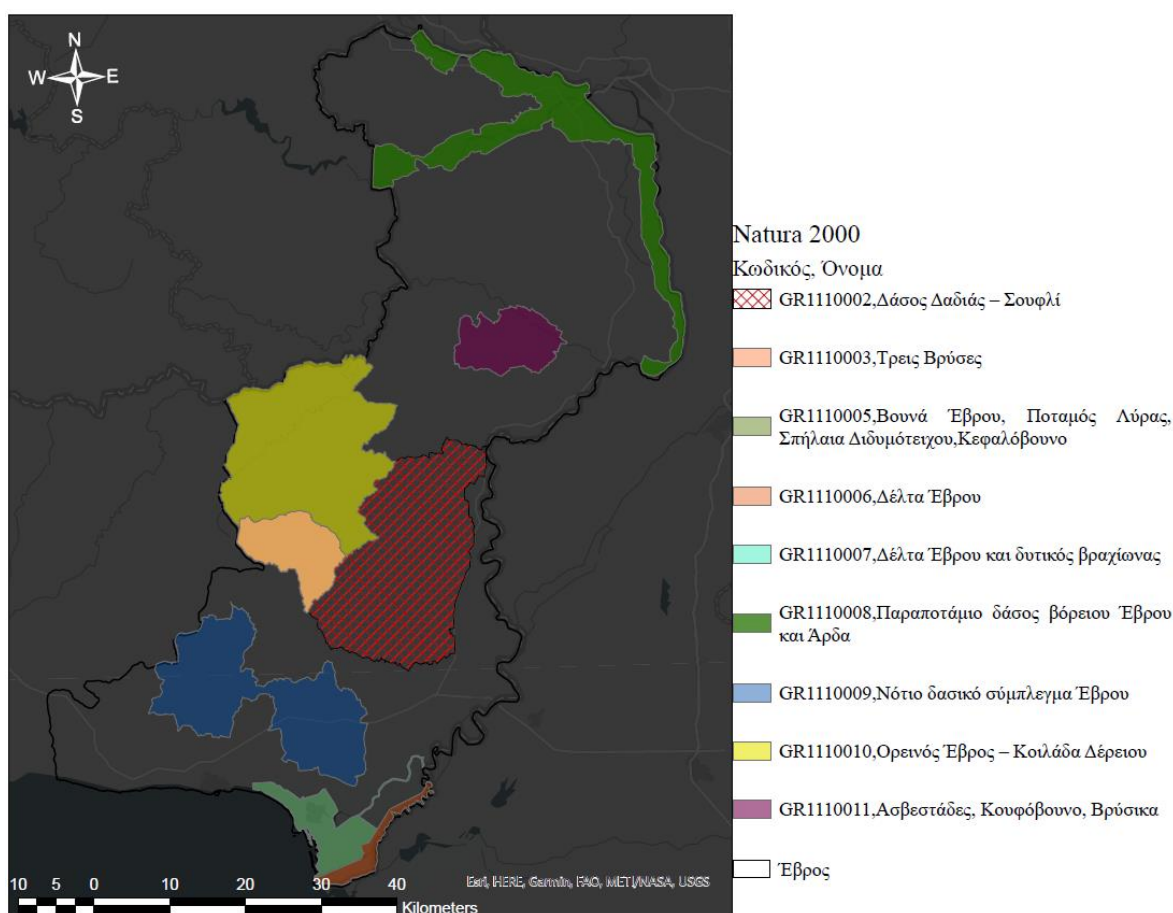
Το πεδίο τιμών του μοντέλου περιορίζεται στο εύρος τιμών από 0 έως 1 και οι τιμές του δείκτη ΚΚΠ κοντά στο 1 συντελούν τις **περιοχές υψηλής καταλληλότητας**.

Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων του μοντέλου έγινε με τη σύγκριση των θέσεων των υφιστάμενων πυροφυλακίων και του χάρτη καταλληλότητας. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε κατά πόσο οι θέσεις των πυροφυλακίων συμπίπτουν με τις περιοχές υψηλής καταλληλότητας.

### 8.1.3 Εκτίμηση τρωτότητας του νομού Έβρου και του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου

Τα αποτελέσματα του μοντέλου ορατότητας ανέδειξαν τις περιοχές που δεν επιτηρούνται από τις υποδομές παρατήρησης. Ένα μέρος των περιοχών αυτών συμπίπτουν με προστατευόμενες περιοχές και περιοχές υψηλής οικοσυστημικής αξίας του δικτύου Natura 2000. Το υποσύνολο των μη ορατών περιοχών που ανήκει σε δασικές περιοχές προστασίας, θεωρήθηκε ότι είναι ιδιαίτερα τρωτό στις πυρκαγιές και συνιστά τις **περιοχές τρωτότητας**.

Στην ηπειρωτικό τμήμα του νομού Έβρου υπάρχουν 12 περιοχές που ανήκουν στο δίκτυο Natura 2000. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι οι περιοχές που περιέχουν το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου, το Εθνικό Υγροτοπικό Πάρκο Δέλτα Έβρου και οι περιοχές οικοτόπων προτεραιότητας που έχουν ενταχθεί ως τόποι κοινοτικής σημασίας (SCI) στο δίκτυο Natura 2000<sup>[50]</sup>. Οι περιοχές του δικτύου Natura 2000 του ηπειρωτικού τμήματος του νομού Έβρου παρουσιάζονται στην Εικόνα 53.

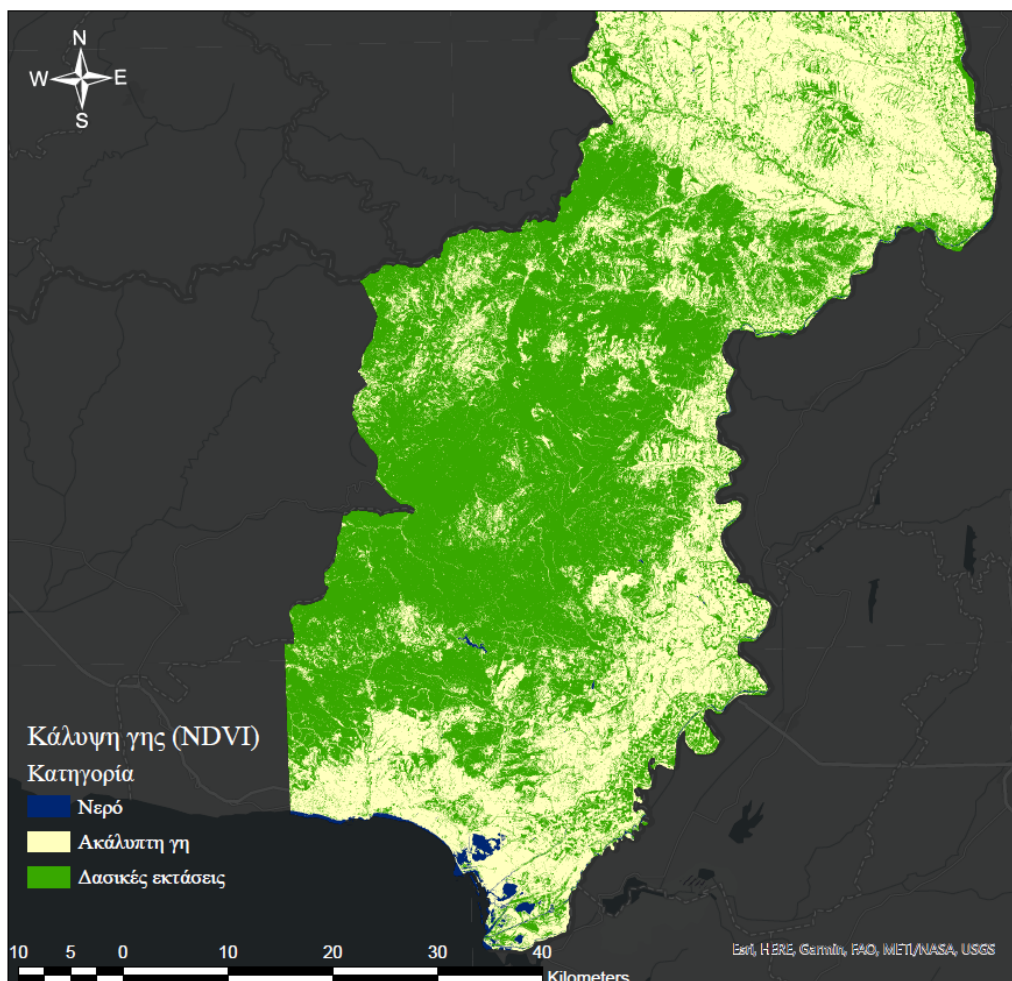


**Εικόνα 53:** Περιοχές του δικτύου Natura 2000 του ηπειρωτικού τμήματος του νομού Έβρου με διαφορετική χρωματική απόχρωση ανάλογα με το όνομα και το κωδικό τους.

Για τον εντοπισμό των δασικών εκτάσεων του νομού Έβρου, ιδιαίτερα στις περιοχές που περιβάλλουν το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου, αξιοποιήθηκε η δορυφορική εικόνα του Sentinel-2 από την Υποενότητα 5.1.3. Από τα φασματικά δεδομένα της εικόνας, υπολογίστηκε η κάλυψη γης με τον δείκτη NDVI. Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε καθώς, στη προκειμένη περίπτωση, χρειάζεται να εντοπιστούν οι δασικές εκτάσεις χωρίς να χρειάζεται περεταίρω διαχωρισμός της κάλυψης γης. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία της



Υποενότητας 5.1.3 οι δασικές εκτάσεις χαρακτηρίζονται από τιμές του δείκτη NDVI μεγαλύτερες του 0,5, όπως φαίνεται στην Εικόνα 54.



Εικόνα 54: Η κάλυψη γης της περιοχής του νομού Έβρου, που περιβάλλει το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του δείκτη NDVI.

Ιδιαίτερα για τη περιοχή του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου συνεκτιμήθηκε στη τρωτότητα και ο χάρτης κινδύνου πυρκαγιάς της περιοχής, σύμφωνα με την Υποενότητα 7.3.1. Βαρύτητα δόθηκε στις περιοχές τρωτότητας που βρίσκονται εντός των περιοχών προστασίας της φύσης, Α1 και Α2, του Εθνικού Πάρκου και παρουσιάζουν υψηλό κίνδυνο πυρκαγιάς. Με αυτό το τρόπο έγινε μια συνολική εκτίμηση του ρίσκου πυρκαγιάς στο Εθνικό Πάρκο.

Στη συνέχεια οι περιοχές που χαρακτηρίζονται από υψηλή τρωτότητα αποτέλεσαν τη βάση για την επιλογή νέων τοποθεσιών κατασκευής υποδομών παρατήρησης. Στόχος των νέων υποδομών είναι να παρακολουθούνται οι περιοχές υψηλής τρωτότητας μειώνοντας το ρίσκο πυρκαγιάς.

#### 8.1.4 Εντοπισμός κατάλληλων τοποθεσιών για την κατασκευή νέων πυροφυλακίων

Από τις προηγούμενες υποενότητες έχουν υπολογιστεί οι βασικές παράμετροι που χρειάζονται για να εντοπιστούν νέες πιθανές θέσεις πυροφυλακίων. Για να επιλεγούν νέες τοποθεσίες ανέγερσης πυροφυλακίων από τις περιοχές υψηλής καταλληλότητας, υιοθετήθηκαν

συγκεκριμένοι κανόνες και περιορισμοί. Οι κανόνες έχουν στόχο να περιοριστούν οι επιλογές θέσεων σε αυτές που είναι πιο πιθανό να υλοποιηθεί το έργο και σε αυτές που είναι πιο πιθανό να βελτιώνουν την υφιστάμενη κατάσταση.

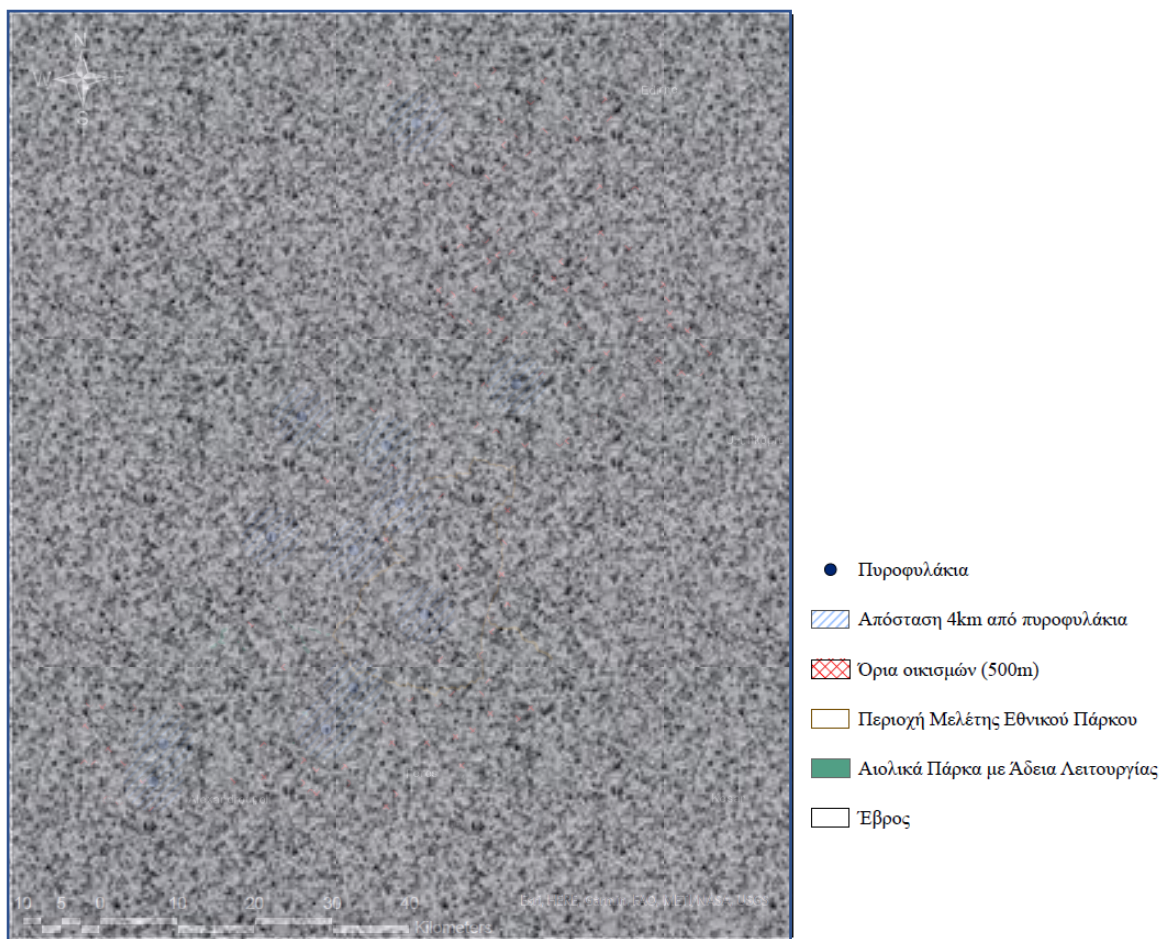
Αρχικά οι προτεινόμενες θέσεις θα πρέπει να βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη των 15km από τις περιοχές τρωτότητας. Ο περιορισμός αυτός είναι άμεση συνέπεια της παραμέτρου της εξωτερικής ακτίνας στο μοντέλο της ορατότητάς. Με βάση τη βιβλιογραφία η μέγιστη ορατότητα έχει οριστεί στα 15km, επομένως ο περιορισμός εξασφαλίζει ότι οι νέες θέσεις θα μπορούν να έχουν οπτική επαφή με τις περιοχές τρωτότητας, εάν φυσικά το επιτρέπει το ανάγλυφο του εδάφους.

Στη συνέχεια ορίστηκαν **ενδεικτικές περιοχές αποκλεισμού**, από τις οποίες δεν μπορούν να επιλεγούν νέες προτεινόμενες θέσεις πυροφυλακίων. Η πρώτη ενδεικτική περιοχή αποκλεισμού αφορά την απόσταση από τα υφιστάμενα πυροφυλάκια. Συγκεκριμένα, οι νέες θέσεις αρχικά είναι καλό να απέχουν απόσταση μεγαλύτερη των 4km από τα υφιστάμενα πυροφυλάκια. Με αυτό το τρόπο μειώνεται η πιθανότητα μεγάλης αλληλοκάλυψης της ορατότητας μεταξύ των παρατηρητών. Σε περίπτωση μη εναλλακτικής επιλογής θα δοκιμαστούν θέσεις σε απόσταση μικρότερη από 4km.

Η δεύτερη περιοχή αποκλεισμού διασφαλίζει ότι η νέα θέση δεν θα βρίσκεται εντός των ορίων των οικισμών. Συγκεκριμένα, οι νέες θέσεις δεν μπορούν να απέχουν απόσταση μικρότερη των 500m από το κέντρο του οικισμού<sup>[50]</sup>. Με αυτό το τρόπο μειώνεται η πιθανότητα να ταυτίζεται η νέα θέση με κάποια υφιστάμενη κατοικία.

Ο τρίτος περιορισμός διασφαλίζει ότι δεν θα επιλεγούν θέσεις σε περιοχή που υπάρχουν ανεμογεννήτριες. Λόγω των παραμέτρων που συμπεριλήφθηκαν στο μοντέλο, είναι πολύ πιθανό οι περιοχές υψηλής καταλληλότητας να περιλαμβάνουν περιοχές που υπάρχουν αιολικά πάρκα. Επομένως, ως περιοχές αποκλεισμού ορίστηκαν τα πολύγωνα εγκατάστασης των αιολικών πάρκων τις περιοχής. Τα δεδομένα για την έκταση των αιολικών πάρκων τις περιοχής λήφθηκαν από το γεωπληροφοριακό χάρτη της ΠΑΕ<sup>[41]</sup>.

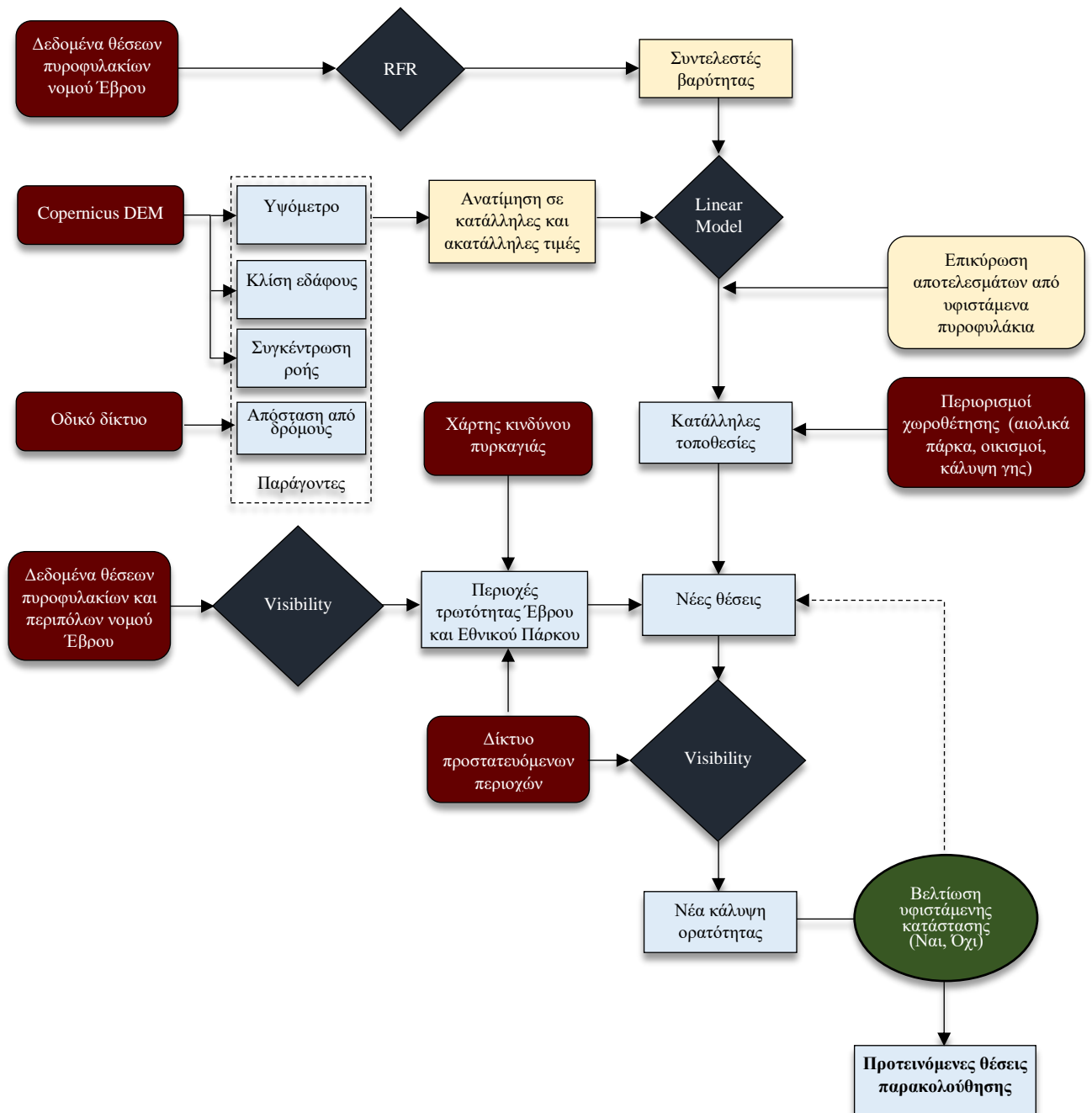
Ο τελικός έλεγχος πριν την επιλογή των νέων θέσεων έγινε με τη βοήθεια δορυφορικών εικόνων και του χάρτη χρήσης γης Corine 2018, ώστε να μην υπάρχει στη θέση άλλη υποδομή ή καλλιεργήσιμη έκταση. Οι περιοχές αποκλεισμού επιλογής νέων θέσεων πυροφυλακίων παρουσιάζονται στην Εικόνα 55.



*Εικόνα 55: Ενδεικτικές περιοχές αποκλεισμού επιλογής νέων θέσεων πυροφυλακίων(Η εικόνα περιέχει εμπιστευτικά δεδομένα δεδομένα)*

Στη συνέχεια, με βάση τους παραπάνω περιορισμούς, έγινε η επιλογή νέων θέσεων στις οποίες θα μπορούσαν να κατασκευαστούν πυροφυλάκια. Η συνεισφορά των νέων θέσεων στη βελτίωση της υφιστάμενης κατάστασης έγινε με την εφαρμογή του μοντέλου ορατότητας. Στο μοντέλο πέρα από τη νέα θέση συμπεριλήφθηκαν οι υφιστάμενες θέσεις πυροφυλακίων και περιπόλων, ώστε να αποτυπωθεί η συνολική ορατότητα της περιοχής. Στη συνέχεια, με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου ορατότητάς, αξιολογήθηκε η συνεισφορά της νέας θέσης στην κάλυψη της περιοχής τρωτότητας. Εάν η μεταβολή της ορατότητας είναι ουσιώδης η θέση συνιστά μια νέα **προτεινόμενη θέση**, δηλαδή μπορεί να προταθεί για να κατασκευαστεί σε αυτή νέο πυροφυλάκιο. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για κάθε πιθανή θέση στη περιοχή εντός του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και στην ευρύτερη περιοχή που περιβάλλει το Εθνικό Πάρκο εντός του νομού Έβρου. Στην Εικόνα 56 παρουσιάζεται το διάγραμμα εργασιών που συνοψίζει τη συνολική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επιλογή προτεινόμενων θέσεων. Παράλληλα, με τις νέες θέσεις στη μελέτη διερευνήθηκαν και άλλοι τρόποι παρακολούθησης, αξιοποιώντας τις υφιστάμενες υποδομές της περιοχής.





Εικόνα 56: Διάγραμμα εργασιών που συνοψίζει τη συνολική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επιλογή προτεινόμενων θέσεων.

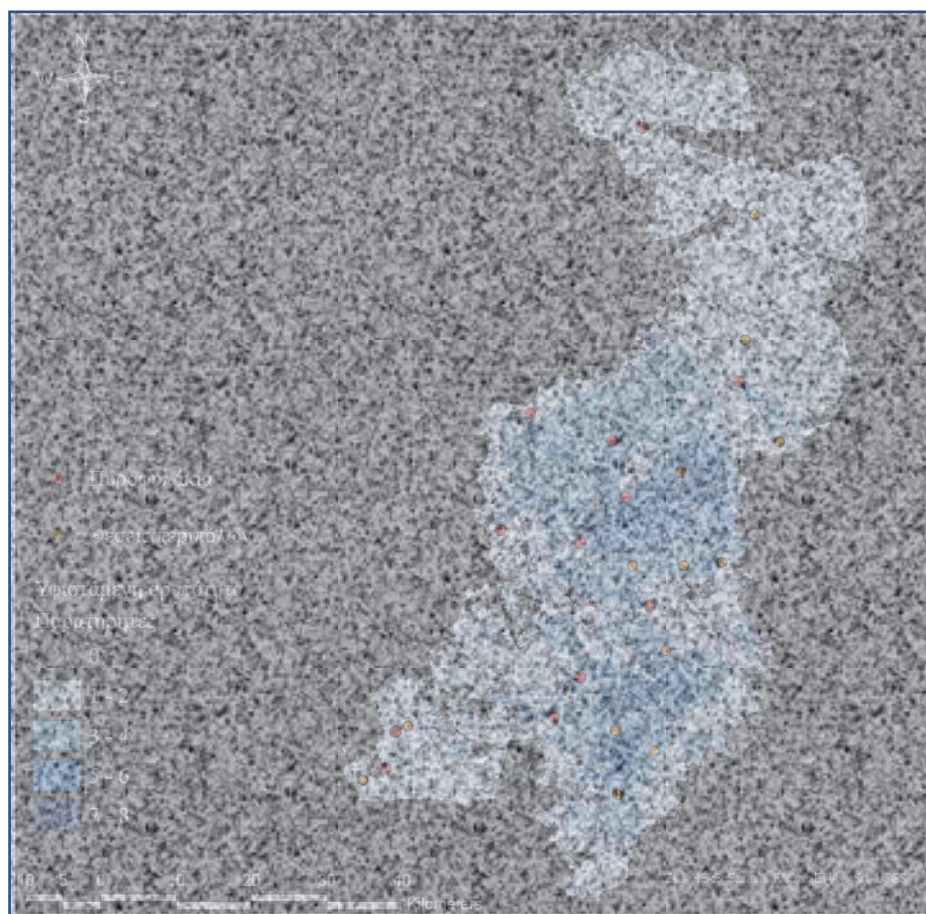


## 8.2 Αποτελέσματα μοντέλου αναγνώρισης κατάλληλων θέσεων για τη παρακολούθηση του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και της ευρύτερης περιοχής του Έβρου.

### 8.2.1 Υφιστάμενη κατάσταση παρακολούθησης

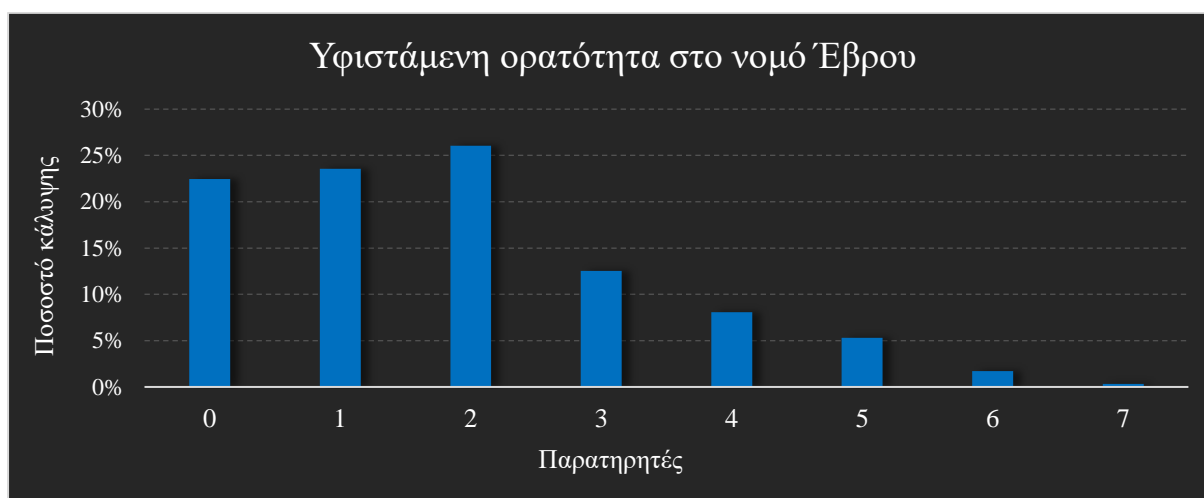
Σύμφωνα με τα γεωχωρικά δεδομένα που παραχωρήθηκαν από το Τμήμα Επιχειρησιακής Πληροφορικής και Γεωχωρικής Ανάλυσης / Δνση Πληροφορικής και Επικοινωνιών του Αρχηγείου Πυροσβεστικού Σώματος, στο νομό Έβρου λειτουργούν 11 υπερυψωμένα πυροφυλάκια και 15 θέσεις περιπόλων ή θέσεις παρατήρησης από ύψος εδάφους. Ο αριθμός των υποδομών παρατήρησης που λειτουργούν, αναμενόμενα, καθορίζεται από το κίνδυνο πυρκαγιάς της περιοχής. Στη παρούσα μελέτη εξετάστηκαν οι πλήρεις δυνατότητες παρακολούθησης των υφιστάμενων υποδομών για το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και της ευρύτερης περιοχής του Έβρου.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου ορατότητας σε μορφή δεδομένων ψηφιδωτής μορφής (25x25m), για το τμήμα του νομού Έβρου που ανήκει στην ηπειρωτική Ελλάδα, παρουσιάζονται στην Εικόνα 57. Παράλληλα, στην Εικόνα 57 έχει διαβαθμιστεί χρωματικά ο αριθμός των παρατηρητών που έχουν οπτική επαφή με τις ορατές περιοχές, σύμφωνα με το υπόμνημα.



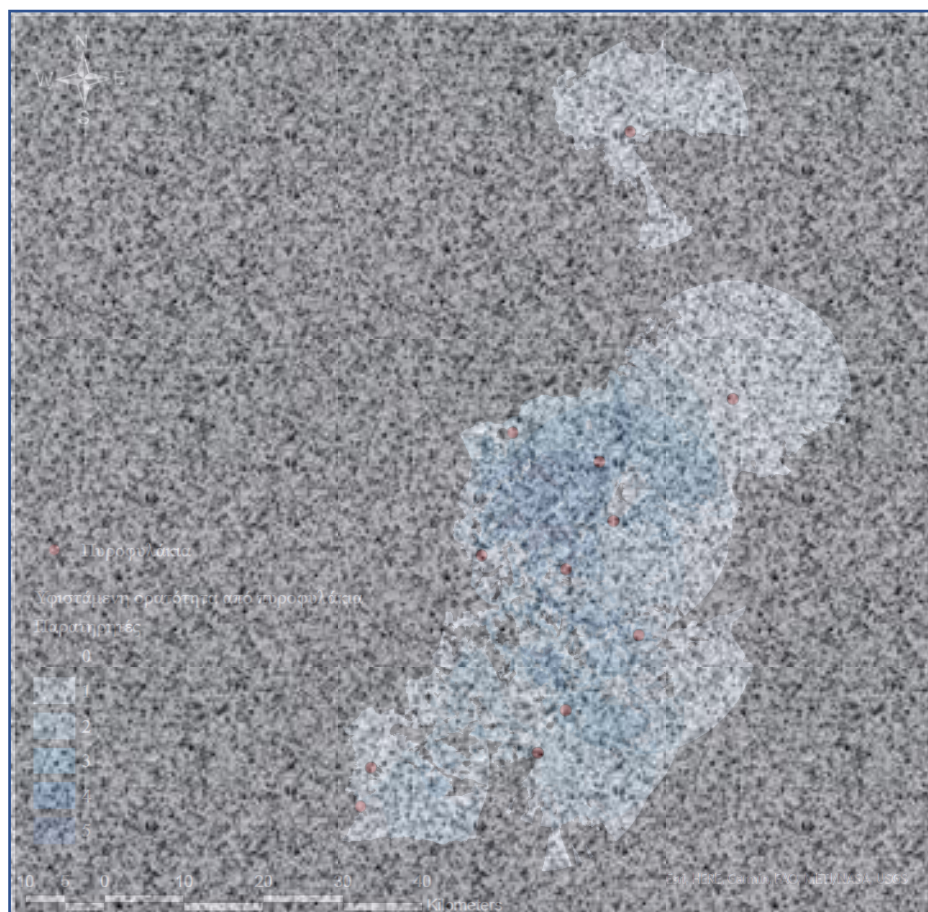
*Εικόνα 57: Κάλυψη ορατότητας από τα υφιστάμενα πυροφυλάκια και περιπόλους για το τμήμα του νομού Έβρου που ανήκει στην ηπειρωτική Ελλάδα. (Η εικόνα περιέχει εμπιστευτικά δεδομένα)*

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου ορατότητας, η κάλυψη του τμήματος του νομού Έβρου που ανήκει στην ηπειρωτική Ελλάδα είναι πολύ ικανοποιητική. Όπως είναι εμφανές στην Εικόνα 57, το μεγαλύτερο τμήμα του Νομού καλύπτεται από κάποιο παρατηρητή. Ιδιαίτερη βαρύτητα φαίνεται να έχει δοθεί στη παρακολούθηση των δασικών εκτάσεων της οροσειράς της Ροδόπης, που περιβάλλουν το Εθνικό Πάρκο Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου. Πολλές από αυτές τις περιοχές παρακολουθούνται από 3 ή περισσότερους παρατηρητές. Συγκεκριμένα, από την ανάλυση των εικονοστοιχείων της ορατότητας το 23% της περιοχής του νομού δεν καλύπτεται από κάποιο παρατηρητή. Το μεγαλύτερο τμήμα όμως των ανεπιτήρητων περιοχών δεν περιλαμβάνουν δασικές εκτάσεις και εντοπίζονται στο βόρειο τμήμα του νομού. Παράλληλα, το 27% του νομού καλύπτεται από 3 ή περισσότερους παρατηρητές, με το μεγαλύτερο μέρος αυτών να εντοπίζεται στο κεντρικό τμήμα του Νομού, όπου βρίσκονται οι σημαντικότερες δασικές εκτάσεις. Η κατανομή της υφιστάμενης περιοχής ορατότητας του νομού Έβρου παρουσιάζεται αναλυτικά στο Γράφημα 7.



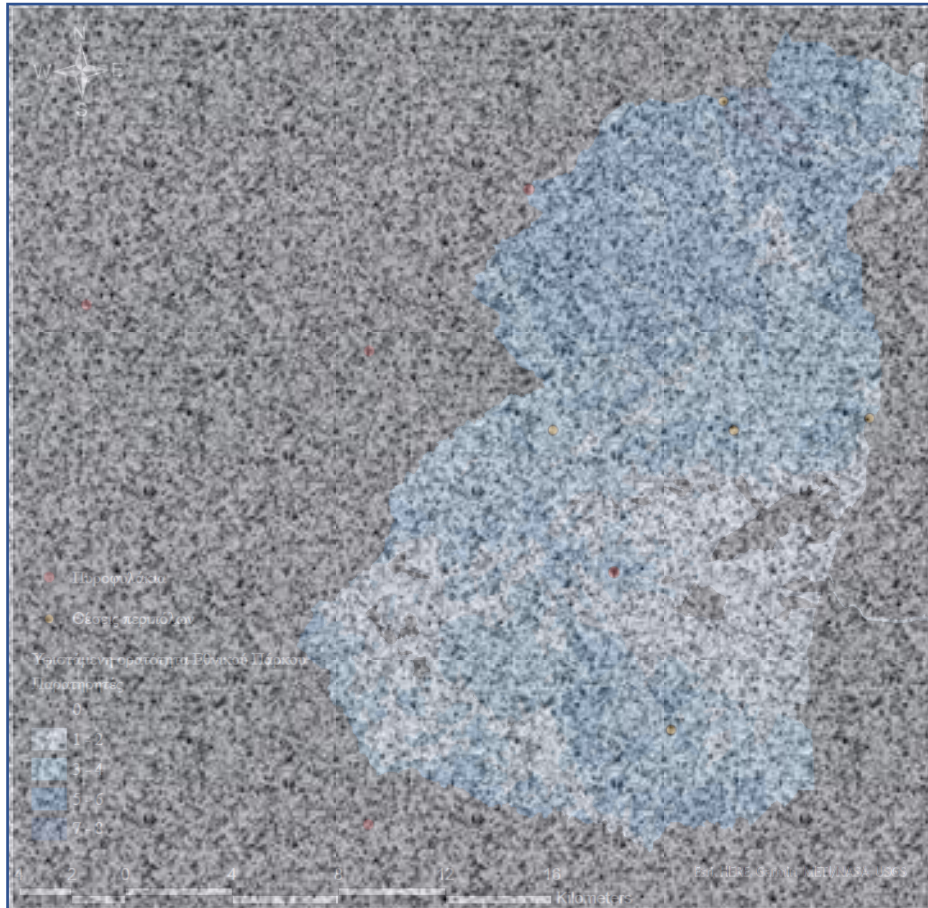
*Γράφημα 7: Κατανομή της υφιστάμενης περιοχής ορατότητας του νομού Έβρου, όπου παρουσιάζεται το ποσοστό κάλυψης ανάλογα με τον αριθμό των παρατηρητών που έχουν οπτική επαφή με τις ορατές περιοχές.*

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η κάλυψη της ορατότητας στη περιοχή του νομού Έβρου είναι ικανοποιητική ακόμα και αν ληφθούν υπόψη στο μοντέλο, μόνο τα υφιστάμενα πυροφυλάκια. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 58 το Εθνικό Πάρκο Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και οι περιοχές που το περιβάλλουν καλύπτονται εξολοκλήρου από τα πυροφυλάκια, ενώ οι περιπολίες διευρύνουν την ορατότητα στις υπόλοιπες περιοχές. Το συμπέρασμα αυτό είναι σημαντικό, καθώς οι θέσεις των περιπόλων βρίσκονται στο ύψος του εδάφους, επομένως είναι πιθανό να υπάρχουν εμπόδια που μειώνουν τη πραγματική κάλυψη της περιοχής. Σύμφωνα με τα παραπάνω, το μοντέλο ορατότητάς δεν υπερεκτιμά τις δυνατότητες παρακολούθησης της περιοχής.



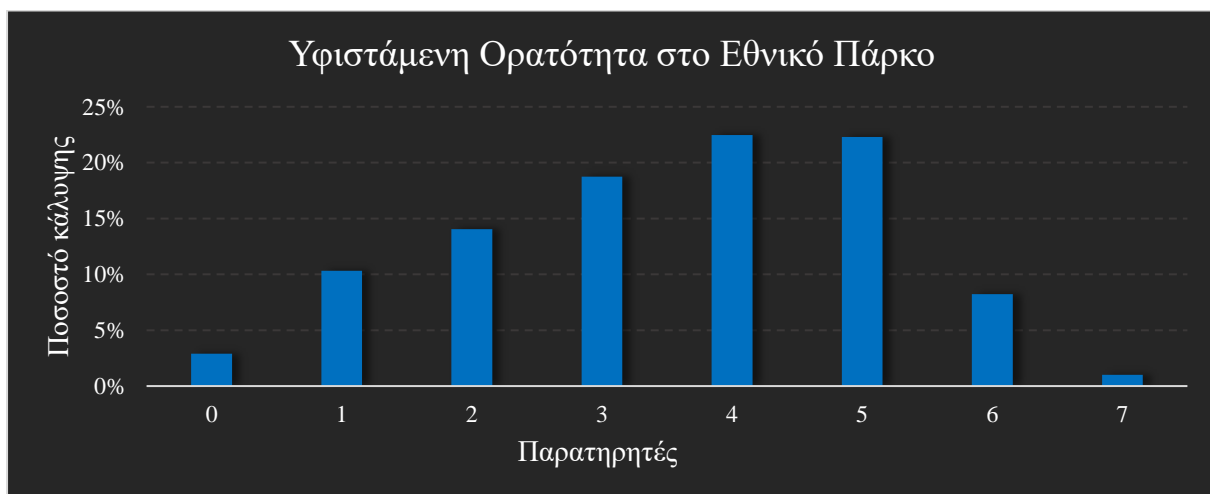
*Εικόνα 58: Κάλυψη ορατότητας από υφιστάμενα πυροφυλάκια για το τμήμα του νομού Έβρου που ανήκει στην ηπειρωτική Ελλάδα. (Η εικόνα περιέχει εμπιστευτικά δεδομένα δεδομένα)*

Η κάλυψη της ορατότητας είναι εξίσου καλή και εντός του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 59 το μεγαλύτερο μέρος του Εθνικού Πάρκου καλύπτεται από τουλάχιστον 1 παρατηρητή. Εντός του πάρκου λειτουργούν 4 περίπολοι και 2 πυροφυλάκια, ενώ μεγάλο τμήμα του Εθνικού Πάρκου είναι ορατό και από παρατηρητές που βρίσκονται εκτός των ορίων του. Σημαντικό είναι ότι οι θέσεις περιπόλων βρίσκονται εντός ή κοντά σε περιοχές που στην Ενότητα 7.3.1, έχουν χαρακτηριστεί με πολύ υψηλό κίνδυνο. Παρόλο που το μεγαλύτερο τμήμα του Εθνικού Πάρκου είναι ορατό από κάποιο παρατηρητή, υπάρχουν περιοχές που δεν καλύπτονται. Η σημαντικότερη εντοπίζεται στο ανατολικό όριο του Πάρκου, ενώ μικρότερες μη ορατές περιοχές εντοπίζονται στο νοτιοδυτικό τμήμα του.



Εικόνα 59: Κάλυψη ορατότητας από τα υφιστάμενα πυροφυλάκια και περιπόλους στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου. (Η εικόνα περιέχει εμπιστευτικά δεδομένα)

Σύμφωνα με την ανάλυση των εικονοστοιχείων εντός των ορίων του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου, το 97% της έκτασης του καλύπτεται από τουλάχιστον 1 παρατηρητή. Παράλληλα το 71% του Εθνικού Πάρκου παρακολουθείται από 3 ή περισσότερους παρατηρητές. Η αναλυτική κατανομή των υφιστάμενων περιοχών ορατότητας του Εθνικού Πάρκου παρουσιάζεται στο Γράφημα 8.

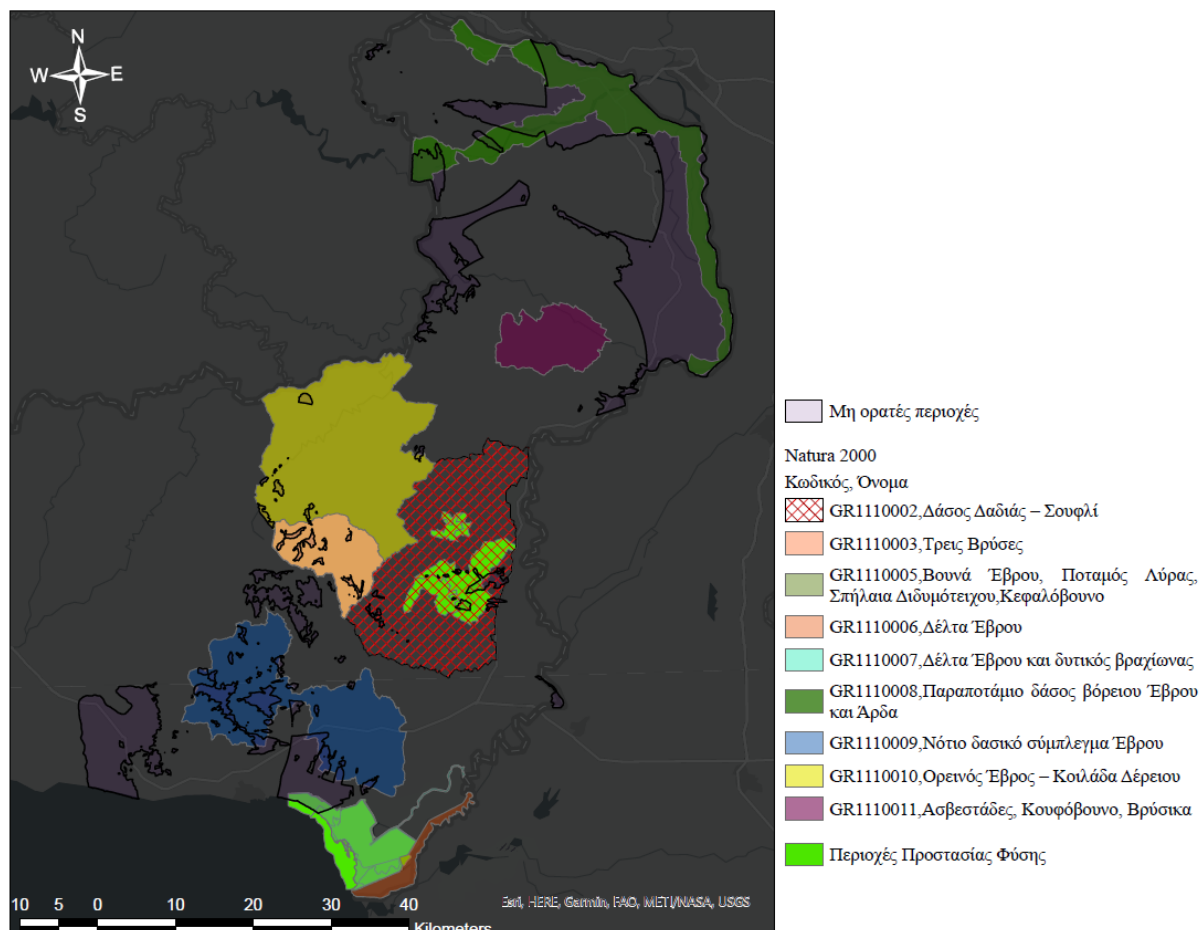


Γράφημα 8: Κατανομή της υφιστάμενης περιοχής ορατότητας του του Εθνικού Πάρκου, όπου παρουσιάζεται το ποσοστό κάλυψης ανάλογα με τον αριθμό των παρατηρητών που έχουν οπτική επαφή με τις ορατές περιοχές



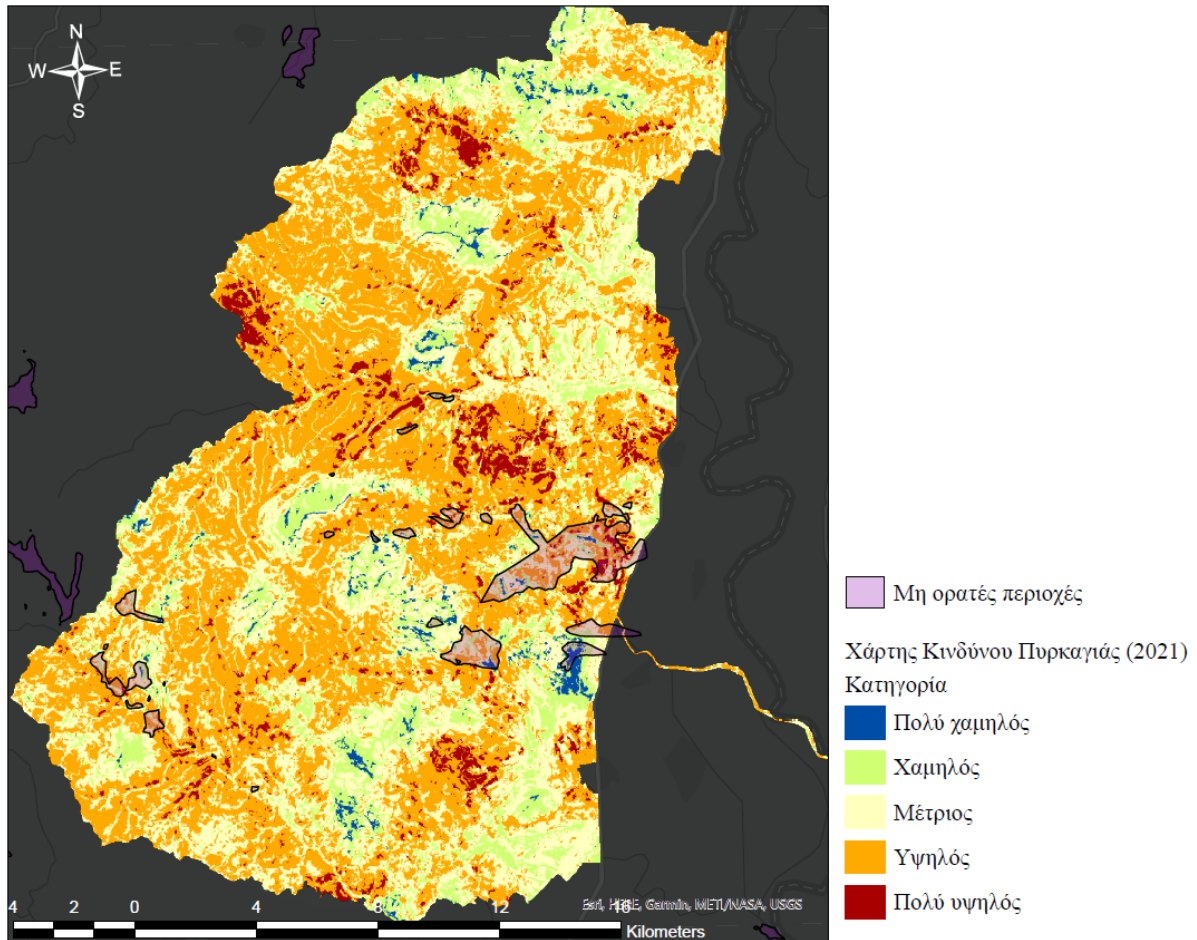
### 8.2.2 Αναγνώριση περιοχών τρωτότητας

Σύμφωνα με την επικάλυψη των περιοχών του δικτύου Natura 2000 και των Περιοχών Προστασίας της Φύσης με τις μη ορατές περιοχές (Εικόνα 60), φαίνεται ότι υπάρχει ένας μικρός, αλλά υπολογίσιμος αριθμός περιοχών υψηλής περιβαλλοντικής αξίας που δεν παρακολουθούνται. Η μελέτη τρωτότητας, όπως έχει προαναφερθεί εστιάζει στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και στις δασικές περιοχές που το περιβάλλουν.

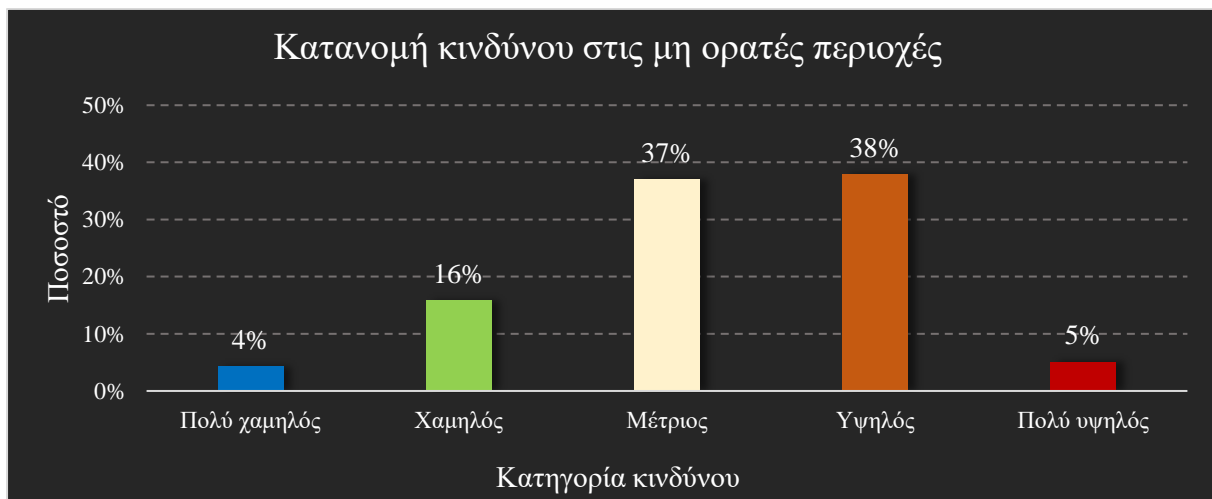


**Εικόνα 60:** Επικάλυψη των περιοχών του δικτύου Natura 2000 και των Περιοχών Προστασίας της Φύσης με τις μη ορατές περιοχές για στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και τις προστατευόμενες περιοχές που το περιβάλλουν.

Οι σημαντικότερες περιοχές που δεν παρακολουθούνται βρίσκονται εντός του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου. Ένα μεγάλο τμήμα τους περιλαμβάνει τις Περιοχές Προστασία της Φύσης Α1 και Α2 του Πάρκου. Παράλληλα, οι περιοχές περιλαμβάνουν δασικές εκτάσεις οι οποίες σύμφωνα με το χάρτη κινδύνου πυρκαγιάς, για το έτος 2021, κατηγοριοποιούνται σε υψηλό κίνδυνο. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 61, οι μη ορατές περιοχές περιλαμβάνουν πέρα από περιοχές υψηλού κινδύνου και περιοχές πολύ υψηλού κινδύνου. Συγκεκριμένα το 5% των μη ορατών περιοχών κατηγοριοποιείται με πολύ υψηλό κίνδυνο και το 38% με υψηλό. Αντίθετα μόνο το 20% ανήκει στη κατηγορία χαμηλού ή πολύ χαμηλού κινδύνου. Η αναλυτική κατανομή του κινδύνου εντός των μη ορατών περιοχών παρουσιάζεται στο Γράφημα 9.



Εικόνα 61: Σύγκριση ανάμεσα στις μη ορατές περιοχές και στο χάρτη κινδύνου πυρκαγιάς του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.

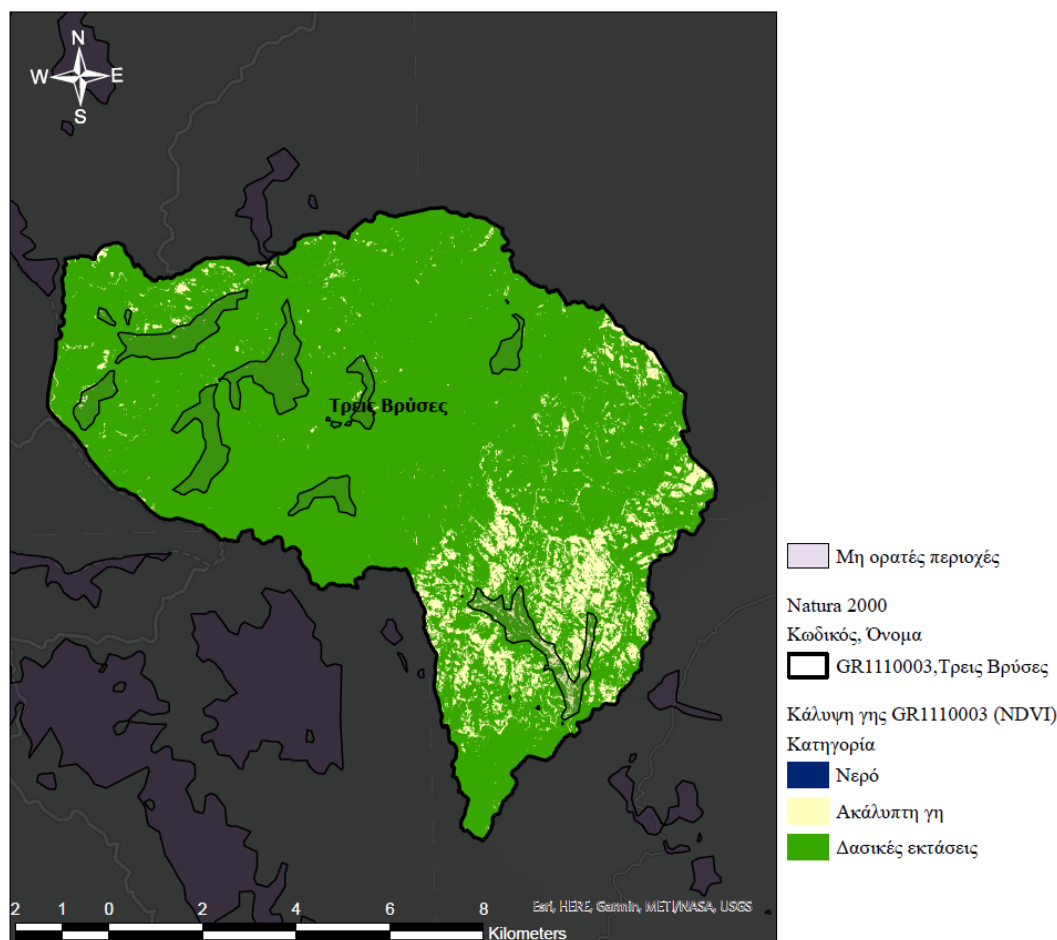


Γράφημα 9: Κατανομή του κινδύνου εντός των μη ορατών περιοχών σύμφωνα με το χάρτη κινδύνου πυρκαγιάς του 2021.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι εμφανές ότι οι μη ορατές περιοχές εντός του Εθνικού Πάρκου, ιδιαίτερα αυτές που βρίσκονται στο ανατολικό τμήμα του, συντελούν σημαντικές περιοχές τρωτότητας.



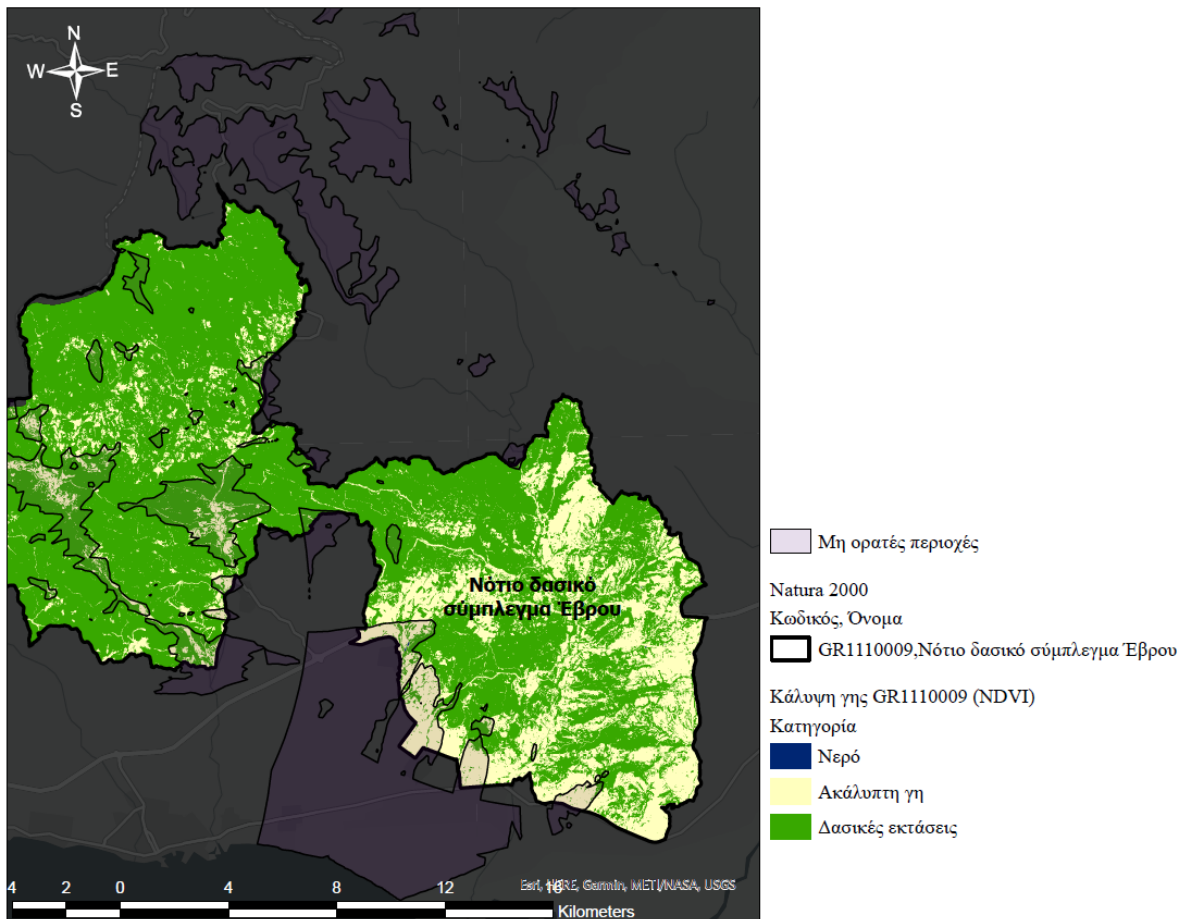
Στην ευρύτερη περιοχή που περιβάλλει το Εθνικό Πάρκο, σύμφωνα με την Εικόνα 62, εντοπίζονται μη ορατές περιοχές εντός της περιοχής Natura 2000 Τρεις Βρύσες, με κωδικό GR1110003. Η περιοχή αυτή έχει ιδιαίτερη οικολογική αξία καθώς σύμφωνα με την Οδηγία 92/43/ΕΟΚ έχει χαρακτηριστεί ως τόπος κοινοτικής σημασίας που περιέχει σημαντικούς οικοτόπους. Το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής καλύπτεται από Θερμόφιλα δρυοδάση της Αν. Μεσογείου και από δάση *Quercus frainetto*<sup>[100]</sup>. Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 62 το μεγαλύτερο μέρος των μη ορατών περιοχών περιλαμβάνουν δασικές εκτάσεις, κυρίως στο κεντρικό και δυτικό τμήμα της περιοχής Natura. Το γεγονός αυτό καθιστά τις μη ορατές περιοχές στις Τρεις Βρύσες σημαντικές περιοχές τρωτότητας.



*Εικόνα 62: Συγκριτική εικόνα της κάλυψης γης, σύμφωνα με το δείκτη NDVI και της ορατότητας εντός της περιοχής Natura 2000 Τρεις Βρύσες, με κωδικό GR1110003.*

Τέλος, σημαντική έκταση μη ορατών περιοχών παρατηρούνται εντός της περιοχής Natura 2000 του Νότιου Δασικού Συμπλέγματος Έβρου, με κωδικό GR1110009. Η συγκεκριμένη ζώνη Natura 2000 σύμφωνα με την Οδηγία 79/409/ΕΚ, ανήκει σε Ζώνη Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ). Η περιοχή είναι σημαντική λόγω των σπανίων ειδών πτηνών που περιέχει, ενώ όσον αφορά στη χλωρίδα αποτελείται κυρίως από δρυοδάση και πευκοδάση. Σύμφωνα με την Εικόνα 63 οι μη ορατές περιοχές του δυτικού τμήματος της περιοχής, κατά κύριο λόγο περιλαμβάνουν δασικές εκτάσεις. Σύμφωνα με τα παραπάνω το Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου εκτιμήθηκε ότι συνιστά περιοχή τρωτότητας, μικρότερης όμως σημαντικότητας συγκριτικά με τις προηγούμενες 2 περιοχές που αναγνωρίστηκαν στην παρούσα ενότητα.





Εικόνα 63: Συγκριτική εικόνα της κάλυψης γης, σύμφωνα με το δείκτη NDVI και της ορατότητας εντός της περιοχής Natura 2000 του Νότιου Δασικού Συμπλέγματος Έβρου, με κωδικό GR1110009.

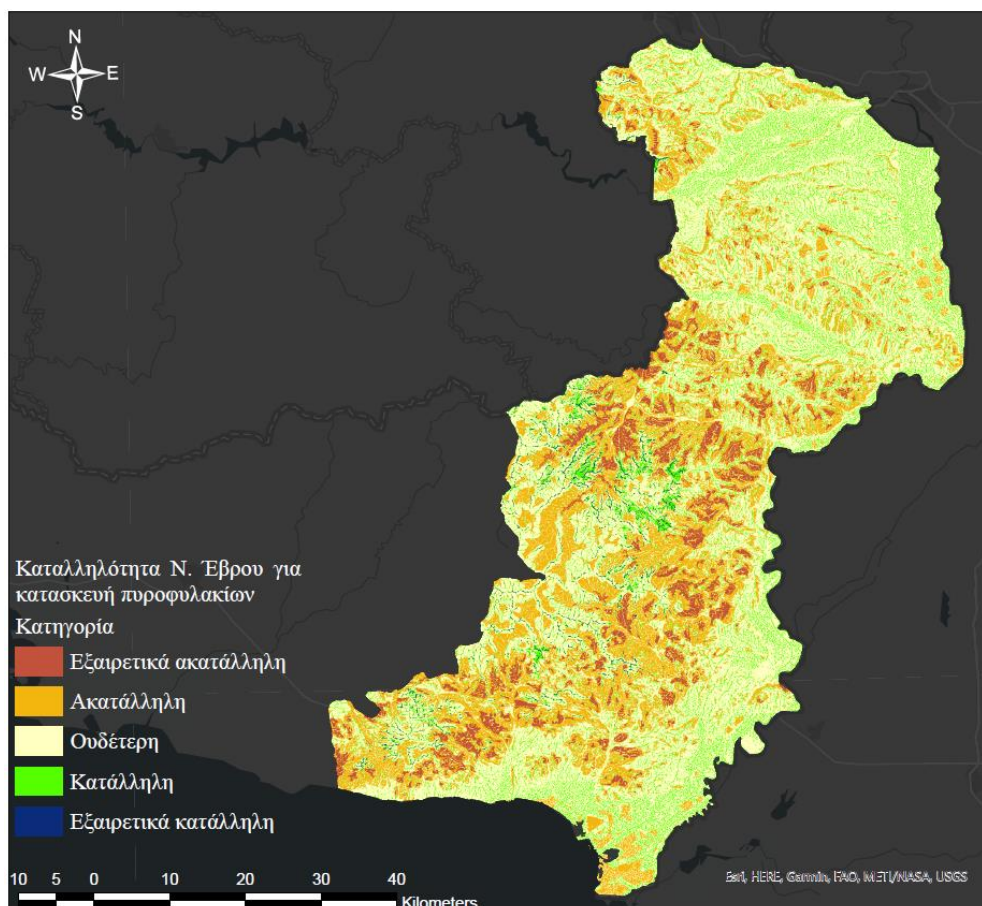
### 8.2.3 Αποτελέσματα μοντέλου καταλληλότητας θέσης κατασκευής πυροφυλακίων

Σύμφωνα με τη σχέση (12) και τις παραμέτρους καταλληλότητας του Πίνακα 14 κατηγοριοποιήθηκε το τμήμα του νομού Έβρου που εντάσσεται στην ηπειρωτική Ελλάδα, ανάλογα με τη καταλληλότητα των περιοχών, να κατασκευαστούν νέα πυροφυλάκια. Τα αποτελέσματα του μοντέλου εξήχθησαν με τη μορφή επιπέδου δεδομένων ψηφιδωτής μορφής, που απεικονίζει τη καταλληλότητα με χωρική ανάλυση 25x25m. Στη συνέχεια τα εικονοστοιχεία κατηγοριοποιήθηκαν ανάλογα με τις τιμές τους σε 5 κατηγορίες ανάλογα με τη καταλληλότητα τους σύμφωνα με τον Πίνακα 15.

Κατηγορία καταλληλότητας	Τιμή εικονοστοιχείων
Εξαιρετικά ακατάλληλη	0 - 0,1
Ακατάλληλη	0,1 - 0,3
Ουδέτερη	0,3 - 0,6
Κατάλληλη	0,6 - 0,9
Εξαιρετικά κατάλληλη	0,9 - 1

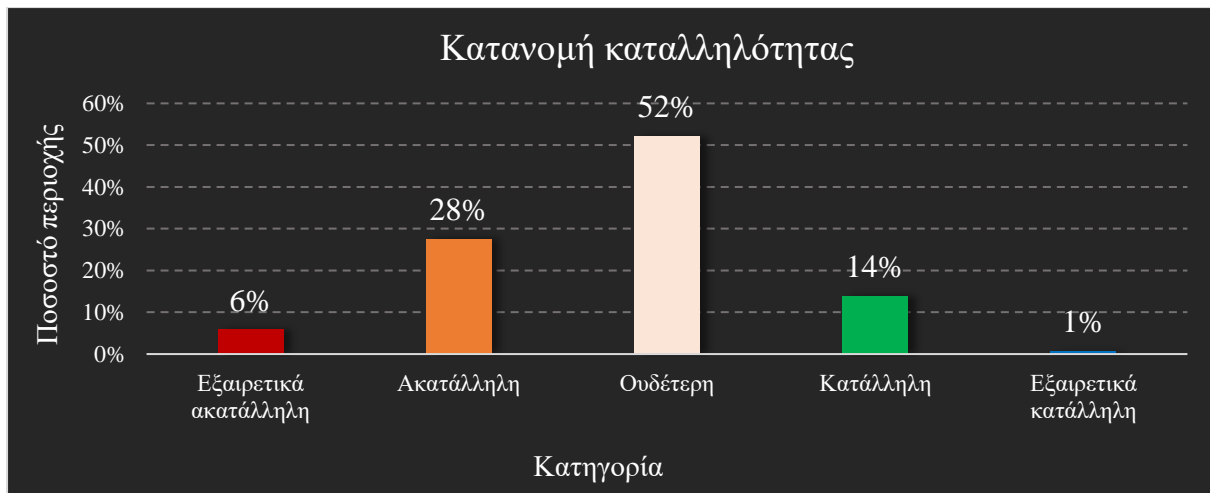
Πίνακας 15: Κατηγοριοποίηση του μοντέλου καταλληλότητας κατασκευής νέων πυροφυλακίων των αποτελεσμάτων.

Σύμφωνα με τη κατηγοριοποίηση του Πίνακα 15, στην Εικόνα 64 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου καταλληλότητας για το νομό του Έβρου, όπου η καταλληλότητα των περιοχών διαχωρίζεται με χρωματική διαβάθμιση.



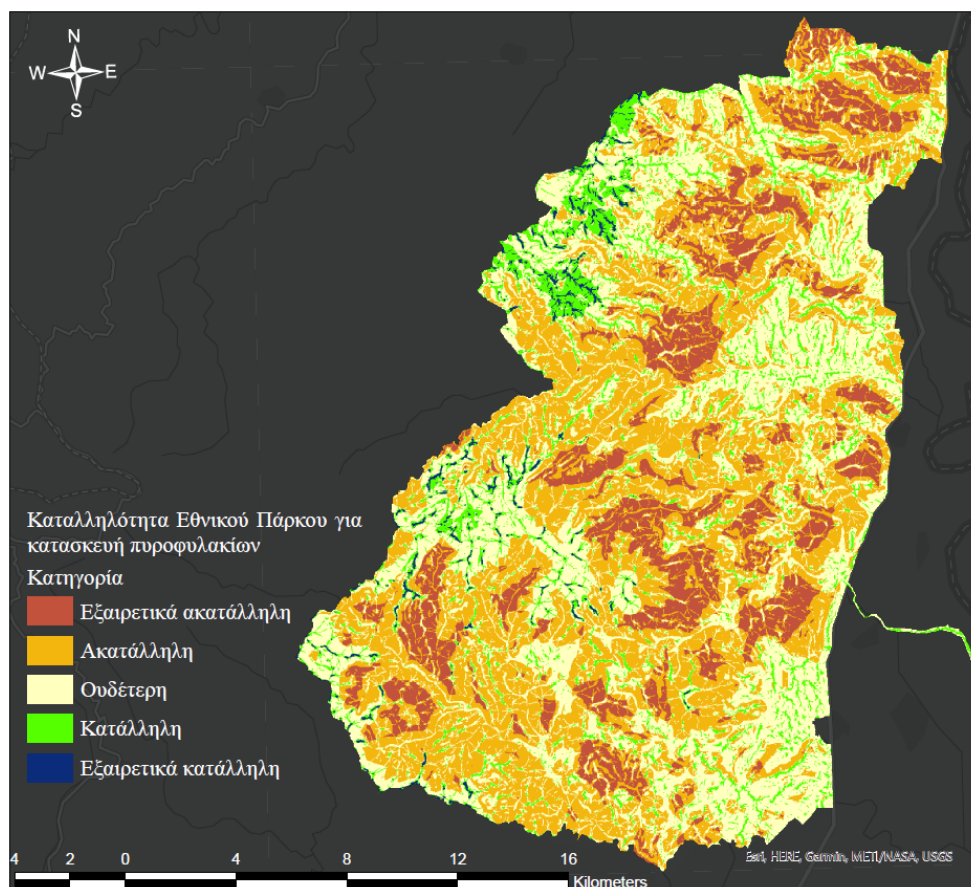
*Εικόνα 64: Χάρτης καταλληλότητας κατασκευής νέων πυροφυλακίων στο τμήμα του νομού Έβρου που εντάσσεται στην ηπειρωτική Ελλάδα.*

Το μεγαλύτερο τμήμα του νομού εντάσσεται στην ουδέτερη κατηγορία, καλύπτοντας το 52% της συνολικής έκτασης. Οι ακατάλληλες και εξαιρετικά ακατάλληλες περιοχές καταλαμβάνουν το 34%. Αντίθετα οι περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί ως κατάλληλες και εξαιρετικά κατάλληλες καταλαμβάνουν μόλις το 15%. Ένα μεγάλο μέρος των κατάλληλων περιοχών βρίσκονται στα βόρεια και νοτιοανατολικά του νομού. Οι περιοχές αυτές είναι πεδινές και βρίσκονται σε υψόμετρο μικρότερο των 300m., επομένως πληρούν μόνο 3 από τα 4 κριτήρια καταλληλότητας. Το μεγαλύτερο μέρος των ακατάλληλων περιοχών συγκεντρώνεται στο ορεινό τμήμα του νομού που ανήκει στην οροσειρά της Ροδόπης. Αναμενόμενα, στην περιοχή αυτή είναι απαγορευτική η ανέγερση πυροφυλακίων, λόγω του έντονου ανάγλυφου. Οι περιοχές πολύ υψηλής καταλληλότητας είναι πολύ περιορισμένες, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο τον εντοπισμό τους. Η αναλυτική κατανομή του ποσοστού της καταλληλότητας κατασκευής πυροφυλακίων για τη περιοχή του νομού Έβρου παρουσιάζεται στο Γράφημα 10.

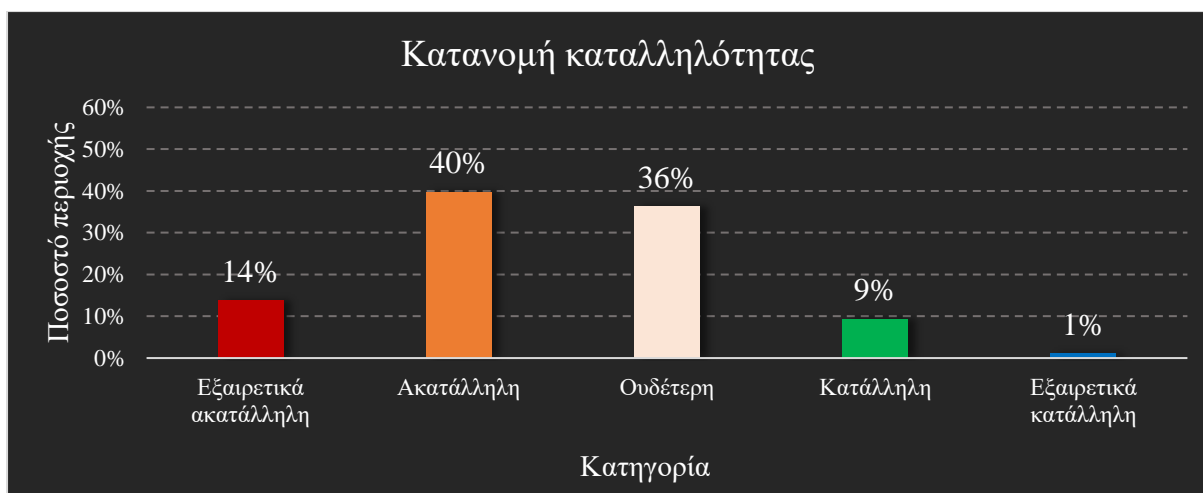


Γράφημα 10: Κατανομή του ποσοστού της καταλληλότητας κατασκευής πυροφυλακίων για τη περιοχή του νομού Έβρου.

Εστιάζοντας στη περιοχή του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου, όπως φαίνεται από την Εικόνα 65, οι περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί κατάλληλες είναι πολύ περιορισμένες. Το γεγονός αυτό είναι εμφανές από την κατανομή της καταλληλότητας των εικονοστοιχείων. Σύμφωνα με το Γράφημα 11 μόνο το 10% της έκτασης του Εθνικού Πάρκου είναι κατάλληλο για κατασκευή νέων πυροφυλακίων. Επομένως οι επιλογές τοποθεσίας που θα μπορούσαν να κατασκευαστούν πυροφυλάκια είναι εξαιρετικά περιορισμένες εντός του Εθνικού Πάρκου.



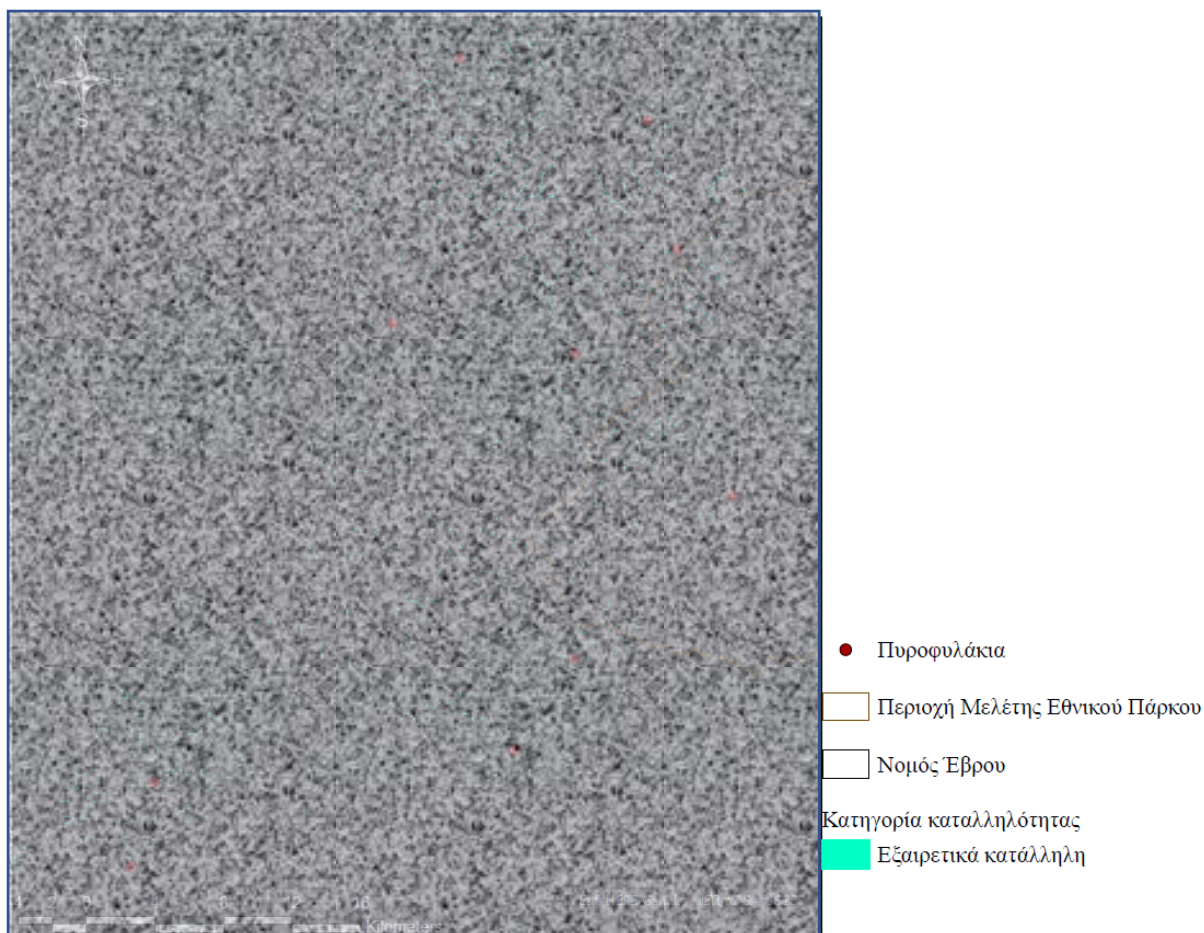
Εικόνα 65: Χάρτης καταλληλότητας κατασκευής νέων πυροφυλακίων στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.



*Γράφημα 11: Κατανομή του ποσοστού της καταλληλότητας κατασκευής πυροφυλακίων για τη περιοχή του Εθνικού Πάρκου Δάσους Λαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.*

#### 8.2.4 Επαλήθευση μοντέλου καταλληλότητας

Για την επαλήθευση του μοντέλου συγκρίθηκαν οι θέσεις των υφιστάμενων πυροφυλακίων με τις περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί ως εξαιρετικά κατάλληλες και κατάλληλες. Σύμφωνα με τα δεδομένα του Πυροσβεστικού Σώματος, στη περιοχή του νομού Έβρου υπάρχουν 12 πυροφυλάκια. Τα δύο από αυτά βρίσκονται στο βόρειο τμήμα του νομού σε πεδινές περιοχές επομένως δεν λήφθηκαν υπόψη για τη σύγκριση με τις περιοχές εξαιρετικής καταλληλότητας. Η εξαίρεση αυτή έγινε, καθώς στόχος του μοντέλου είναι να αναδειχθούν οι κατάλληλες τοποθεσίες στο ορεινό τμήμα του νομού. Αυτός ήταν ένας από τους βασικούς λόγους που κατηγοριοποιήθηκε το υψόμετρο σύμφωνα με τον Πίνακα 14. Από τα 10 πυροφυλάκια που απομένουν, τα 9 βρίσκονται σε θέσεις που συμπίπτουν με τις περιοχές εξαιρετικής καταλληλότητας, επιβεβαιώνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου. Την αξιοπιστία του μοντέλου ενισχύει περαιτέρω το γεγονός ότι τα 12 υφιστάμενα πυροφυλάκια βρίσκονται σε θέσεις που έχουν χαρακτηριστεί ως κατάλληλες. Στην Εικόνα 66, παρουσιάζονται τα υφιστάμενα πυροφυλάκια στην ορεινή περιοχή που περιβάλλει το Εθνικό Πάρκο Δάσους Λαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και οι περιοχές εξαιρετικής καταλληλότητας.



*Εικόνα 66: Τα υφιστάμενα πυροφυλάκια στην ορεινή περιοχή που περιβάλλει το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και οι περιοχές εξαιρετικής καταλληλότητας σύμφωνα με το μοντέλο. (Η εικόνα περιέχει εμπιστευτικά δεδομένα δεδομένα)*

### 8.2.5 Προτάσεις νέων θέσεων

Σύμφωνα με τις ενδεικτικές θέσεις αποκλεισμού, τις περιοχές τρωτότητας και τις περιοχές καταλληλότητας, εξετάστηκε η μεταβολή της ορατότητας από διάφορες νέες πιθανές θέσεις πυροφυλακίων. Η επιλογή κάθε θέσης έχει στόχο να βελτιώσει την παρακολούθηση των περιοχών τρωτότητας. Μετά από δοκιμές πιθανών θέσεων, επιλέχθηκαν και παρουσιάζονται οι προτεινόμενες θέσεις που επέφεραν τη σημαντικότερη βελτίωση. Συνολικά εντοπίστηκαν 4 θέσεις που μετέβαλαν σημαντικά τη παρακολούθηση των περιοχών τρωτότητας. Οι 2 θέσεις βρίσκονται εντός του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και οι άλλες 2 εντός των περιοχών Natura 2000 Τρεις Βρύσες και του Νότιου Δασικού Συμπλέγματος Έβρου. Στη συνέχεια της ενότητας κάθε θέση έχει αναλυθεί ξεχωριστά ανάλογα με τη περιοχή που εντοπίζεται.

#### 8.2.5.1 Προτεινόμενες θέσεις για παρακολούθηση του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου

Στη περιοχή του Εθνικού Πάρκου εντοπίστηκαν 2 θέσεις παρατήρησης που βελτιώνουν σημαντικά την επιτήρηση της περιοχής, καλύπτοντας το μεγαλύτερο τμήμα των περιοχών τρωτότητας.



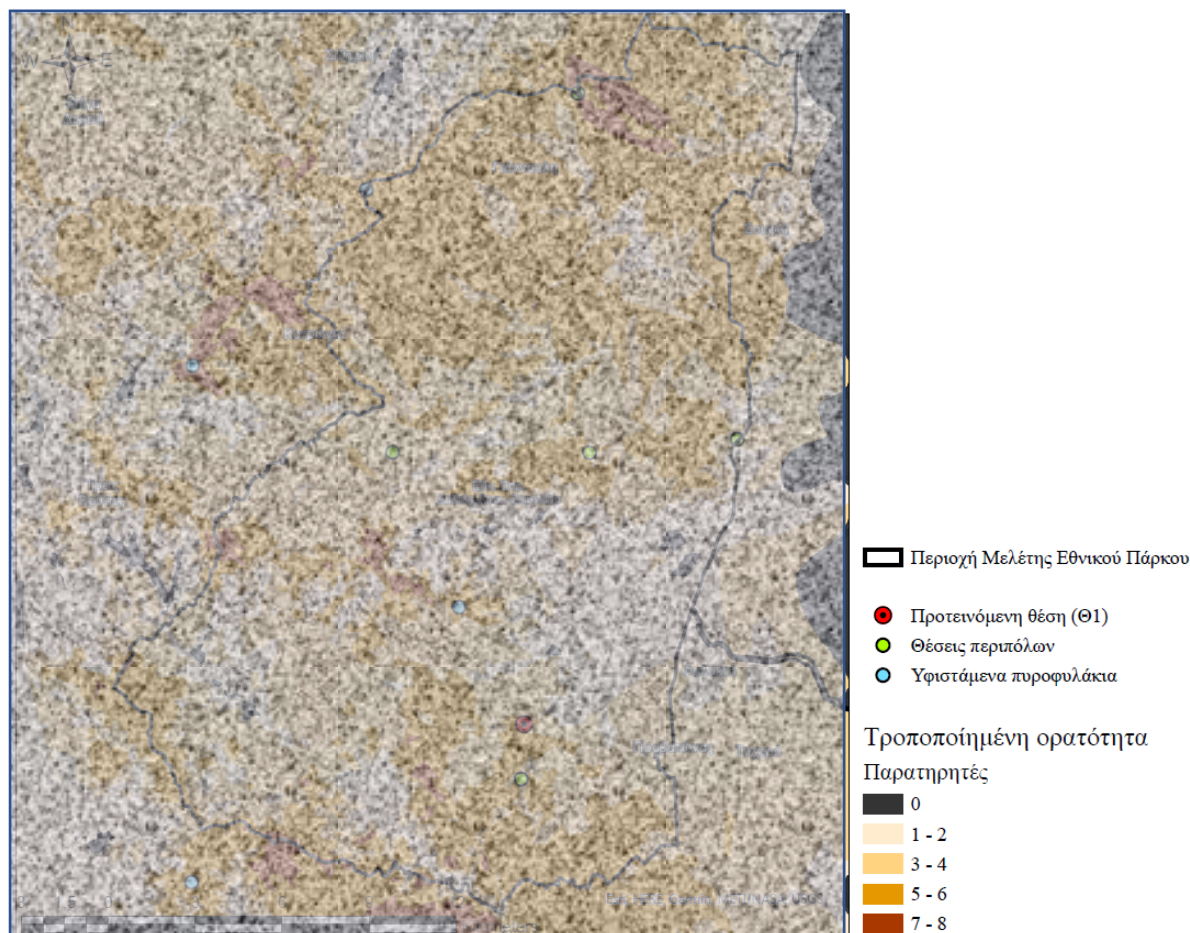
### Θέση βόρεια του οικισμού Λευκίμμη (Θ1)

Η θέση βρίσκεται σε περιοχή πολύ υψηλής καταλληλότητας, 1,9km βόρεια του οικισμού Λευκίμμη με ενδεικτικές συντεταγμένες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 16.

ΕΓΣΑ '87		WGS 84	
X	Y	Lat	Long
684.502,32	4.545.018,11	41,038035	26,196755

**Πίνακας 16:** Συντεταγμένες προτεινόμενης θέσης (Θ1) για τη βελτίωση της ορατότητας του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.

Η κατασκευή πυροφυλάκιου ύψους τουλάχιστον 5m στη συγκεκριμένη θέση, έχει ως αποτέλεσμα την πλήρη παρακολούθηση της περιοχής τρωτότητας στο ανατολικό όριο του Εθνικού Πάρκου. Η νέα κάλυψη ορατότητας του Εθνικού Πάρκου που προκύπτει με τη προσθήκη πυροφυλάκιου στη προτεινόμενη θέση, παρουσιάζεται στην Εικόνα 67. Η αρχική ορατότητα του Εθνικού Πάρκου έχει παρουσιαστεί στην Εικόνα 59. Από την σύγκριση των 2 εικόνων είναι εμφανής η μείωση των μη ορατών περιοχών στη περιοχή μελέτης.

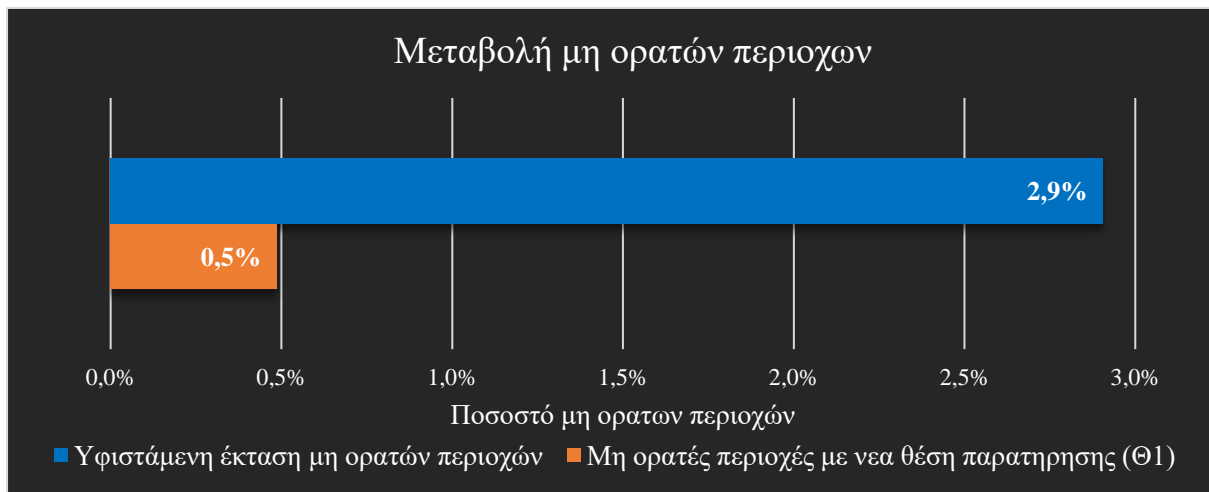


**Εικόνα 67:** Τροποποιημένη κάλυψη ορατότητας του Εθνικού Πάρκου που προκύπτει με τη προσθήκη πυροφυλάκιου ύψους 5m στη προτεινόμενη θέση (Θ1). (Η εικόνα περιέχει εμπιστευτικά δεδομένα δεδομένα)

Η προτεινόμενη θέση βρίσκεται εντός μιας από τις σημαντικότερες περιοχές πολύ υψηλού κίνδυνου πυρκαγιάς (Εικόνα 45) που εντοπίστηκε στα βόρεια του οικισμού Λευκίμμη στην

Ενότητα 7.3.1. Η περιοχή αυτή είναι πολύ κοντά στη θέση είχαν καταγραφεί οι πυρκαγιές του Οκτωβρίου 2020 και Ιουλίου 2021. Επομένως, πέρα από την επέκταση της περιοχής παρακολούθησης, η θέση προσφέρει καλύτερη επιτήρηση των εναπομεινάντων δασικών εκτάσεων, που συνεχίζουν να βρίσκονται σε πολύ υψηλό κίνδυνο.

Η ακριβής ανάλυση της μεταβολής στην ορατότητα της περιοχής πραγματοποιήθηκε με τη σύγκριση της έκτασης των μη ορατών περιοχών, πριν και μετά την προσθήκη θέσης παρατήρησης στην προτεινόμενη θέση, Θ1. Η υφιστάμενη έκταση των μη ορατών περιοχών, σύμφωνα με την ανάλυση ορατότητας είναι 12.343km<sup>2</sup> και αντιστοιχεί στο 2,9% της έκτασης του Εθνικού Πάρκου. Η έκταση αυτή μειώνεται σημαντικά με τη τοποθέτηση παρατηρητηρίου στην προτεινόμενη θέση και η νέα έκταση των μη ορατών περιοχών είναι 2.067km<sup>2</sup>, που αντιστοιχεί στο 0,5% της έκτασης του Εθνικού Πάρκου. Η μείωση που επιτυγχάνεται, όπως έχει αναφερθεί, αφορά πολύ σημαντικές περιοχές που ανήκουν στις Περιοχές Προστασίας της Φύσης και στη πλειονότητα τους έχουν χαρακτηριστεί σε υψηλό κίνδυνο πυρκαγιάς. Η αναλυτική μεταβολή των μη ορατών περιοχών παρουσιάζεται στο Γράφημα 12.

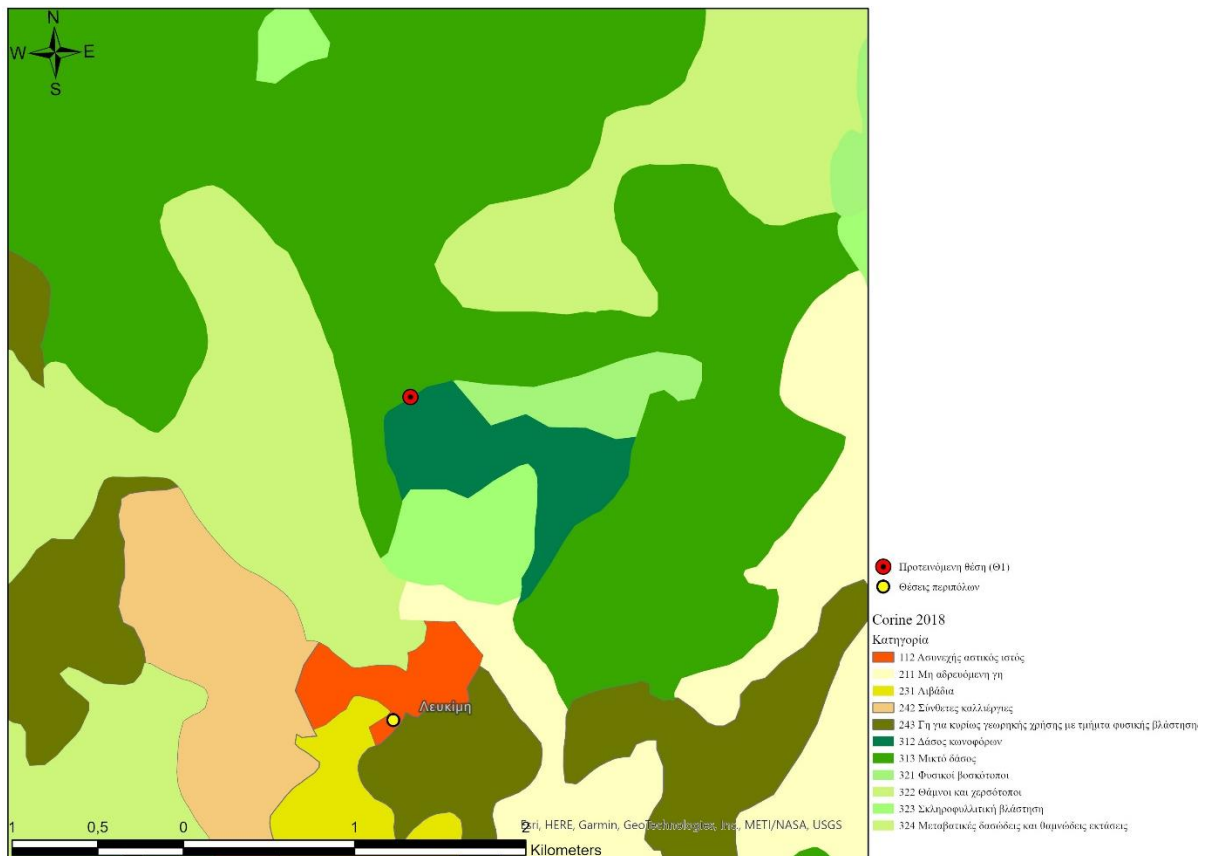


Γράφημα 12: Μεταβολή της έκτασης των μη ορατών περιοχών με την τοποθέτηση πυροφυλάκιου στη προτεινόμενη θέση Θ1, στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.

Σχετικά με τη τοποθεσία της θέσης Θ1, αυτή βρίσκεται στα όρια ακάλυπτης γης και μικτού δάσους, σύμφωνα με το χάρτη κάλυψης γης που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής στην Υποενότητα 5.1.3.1. Η ακάλυπτη γη βόρεια και δυτικά της προτεινόμενης θέσης (Εικόνα 68) είναι αποτέλεσμα των πυρκαγιών του Οκτωβρίου 2020 και του Ιουλίου 2021. Η κάλυψη γης της Εικόνας 68 παρουσιάζεται σε υπόβαθρο πρόσφατης δορυφορικής εικόνας του Sentinel-2 που καταγράφηκε στις 27 Σεπτεμβρίου 2021. Αναμενόμενα η κάλυψη γης στη περιοχή γύρω από τη προτεινόμενη θέση, διαφέρει σημαντικά με τον χάρτη του Corine 2018. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 69, οι διαφορές είναι εμφανείς στις καμένες εκτάσεις, ενώ στις υπόλοιπες δασικές περιοχές υπάρχει ταύτιση των αποτελεσμάτων.



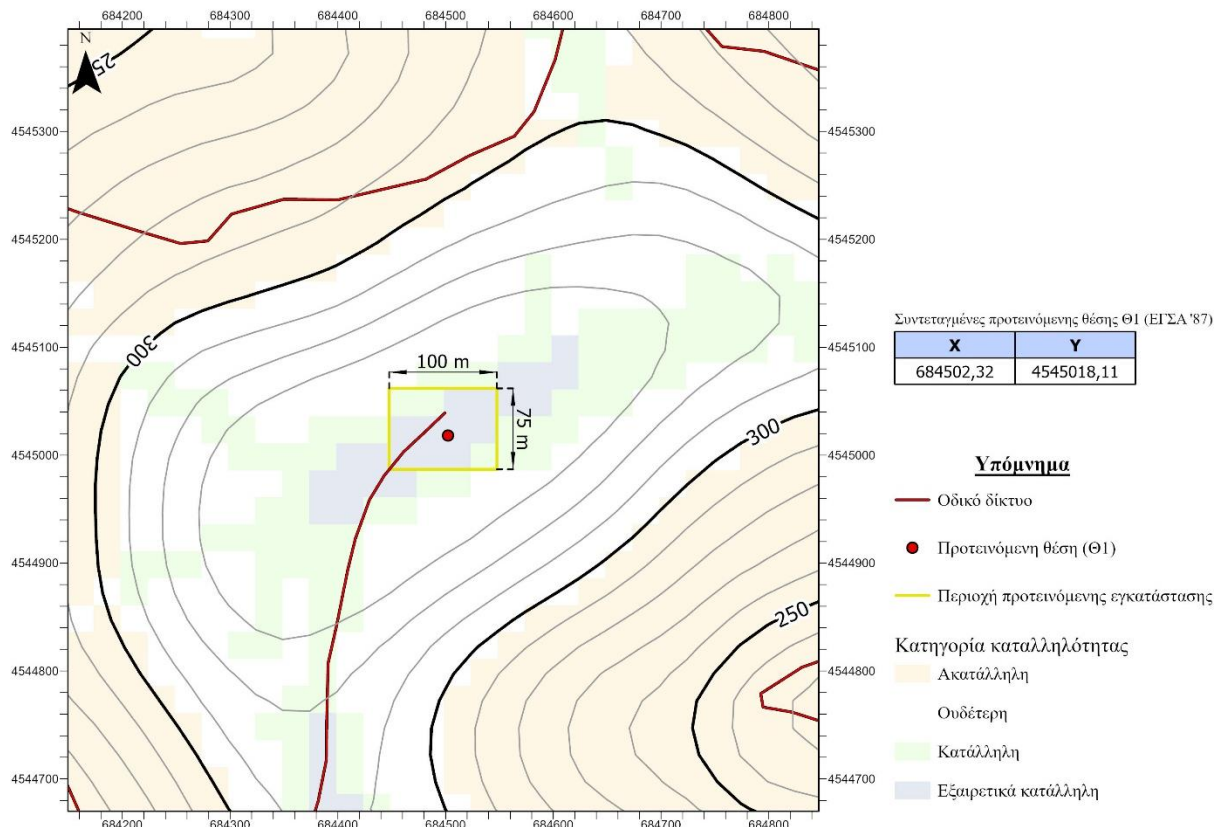
Εικόνα 68: Η προτεινόμενη θέση σε σχέση με τη κάλυψη γης του αλγορίθμου SVM σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας του Sentinel-2 που καταγράφηκε στις 27 Σεπτεμβρίου 2021.



Εικόνα 69: Η προτεινόμενη θέση σε σχέση με τη κάλυψη γης σύμφωνα με τον χάρτη Corine 2018.



Για την προτεινόμενη θέση Θ1 δημιουργήθηκε το ενδεικτικό τοπογραφικό διάγραμμα σε κλίμακα 1:4.000 της Εικόνας 70, στο οποίο παρουσιάζεται το υψόμετρο, η καταλληλότητα της περιοχής, η ενδεικτική περιοχή εγκατάστασης, το οδικό δίκτυο και οι συντεταγμένες της θέσης σε ΕΓΣΑ '87. Συγκεκριμένα, η θέση Θ1 βρίσκεται σε υψόμετρο 346m. και απέχει από το οδικό δίκτυο 17,3m. Επίσης, στην Εικόνα 70 παρουσιάζεται η καταλληλότητα της περιοχής για τη κατασκευή νέων πυροφυλακίων, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της Υποενότητας 8.2.3. Η προτεινόμενη θέση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 70, ανήκει σε μια μικρής έκτασης εξαιρετικά κατάλληλης τοποθεσίας, περίπου 14km<sup>2</sup>, που εντοπίστηκε βόρεια του οικισμού Λευκίμμη.



Εικόνα 70: Ενδεικτικό τοπογραφικό διάγραμμα της προτεινόμενης θέσης (Θ1) εντός του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου, σε κλίμακα 1:4.000.

#### Θέση νοτιοδυτικά του οικισμού της Δαδιάς (Θ2)

Η δεύτερη θέση που εντοπίστηκε στο Εθνικό Πάρκο και μεταβάλει σημαντικά τις δυνατότητες παρακολούθησης, βρίσκεται περίπου 2,3km. νοτιοδυτικά του οικισμού της Δαδιάς. Οι συντεταγμένες της προτεινόμενης θέσης σε ΕΓΣΑ '84 και WGS 84, παρουσιάζονται στο Πίνακα 17.

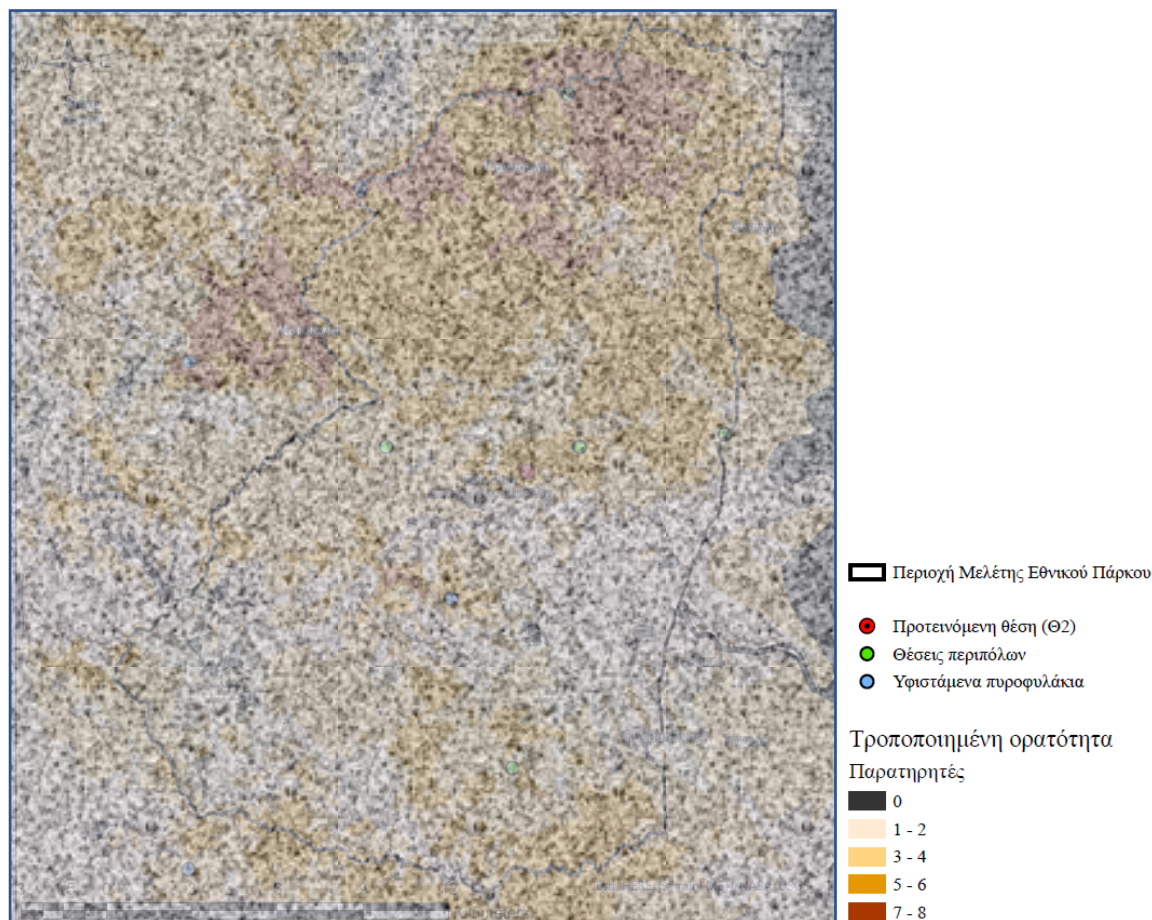
ΕΓΣΑ '87		WGS 84	
X	Y	Lat	Long
684.925,13	4.553.516,49	41,114436	26,204336

Πίνακας 17: Συντεταγμένες προτεινόμενης θέσης (Θ2) για τη βελτίωση της ορατότητας του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.

Η κατασκευή πυροφυλακίου ύψους τουλάχιστον 5m αυξάνει σημαντικά τη συνολική δυνατότητα παρατήρησης του Εθνικού Πάρκου. Η νέα κάλυψη ορατότητας του Εθνικού Πάρκου που προκύπτει με τη προσθήκη πυροφυλακίου στην προτεινόμενη θέση,

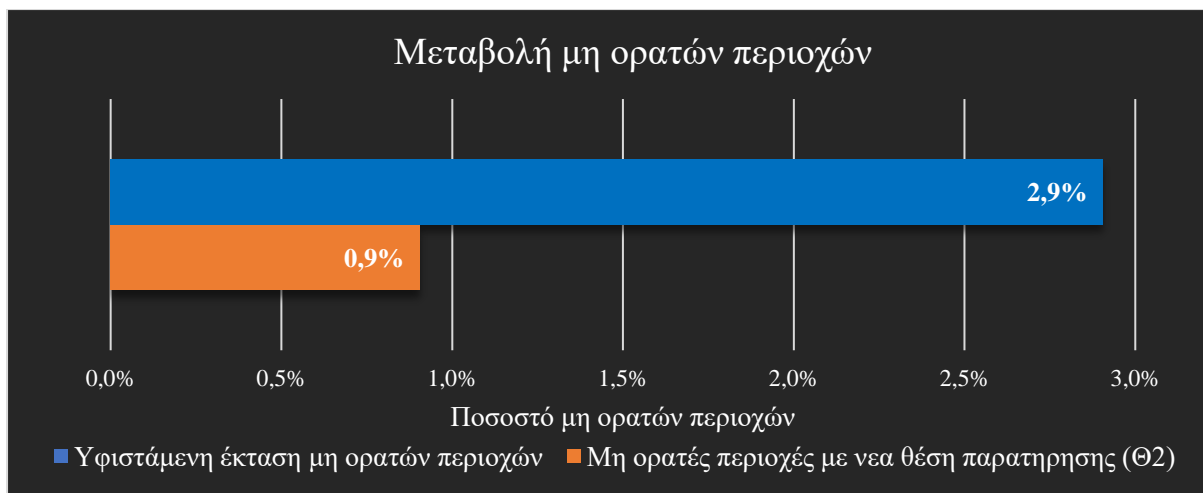


παρουσιάζεται στην Εικόνα 71. Η υφιστάμενη ορατότητα στη περιοχή του Εθνικού Πάρκου έχει παρουσιαστεί στην Εικόνα 59. Με τη ποιοτική σύγκριση των εικόνων είναι εμφανής η μείωση των μη ορατών περιοχών, ιδιαίτερα εντός των Περιοχών Προστασίας της Φύσης.



*Εικόνα 71: Τροποποιημένη κάλυψη ορατότητας του Εθνικού Πάρκου που προκύπτει με τη προσθήκη πυροφυλάκιου ύψους τουλάχιστον 5m στη προτεινόμενη θέση (Θ2). (Η εικόνα περιέχει εμπιστευτικά δεδομένα δεδομένα)*

Η βελτίωση της έκτασης ορατότητας στο Εθνικό Πάρκο είναι σημαντική, αν και μικρότερη από αυτή που σημειώθηκε από τη προηγούμενη θέση (Θ1). Η υφιστάμενη έκταση των μη ορατών περιοχών είναι 12.343km<sup>2</sup> και αντιστοιχεί το 2,9% της συνολικής έκτασης του Εθνικού Πάρκου. Η νέα θέση παρατήρησης μειώνει τη έκταση των μη ορατών περιοχών κατά 8,495km<sup>2</sup> φτάνοντας τα 3.848km<sup>2</sup>. Οι μη ορατές περιοχές του Εθνικού Πάρκου με το νέο πυροφυλάκιο καλύπτουν το 0,9% της συνολικής έκτασης. Η αναλυτική μεταβολή του ποσοστού των μη ορατών περιοχών παρουσιάζεται στο Γράφημα 13.

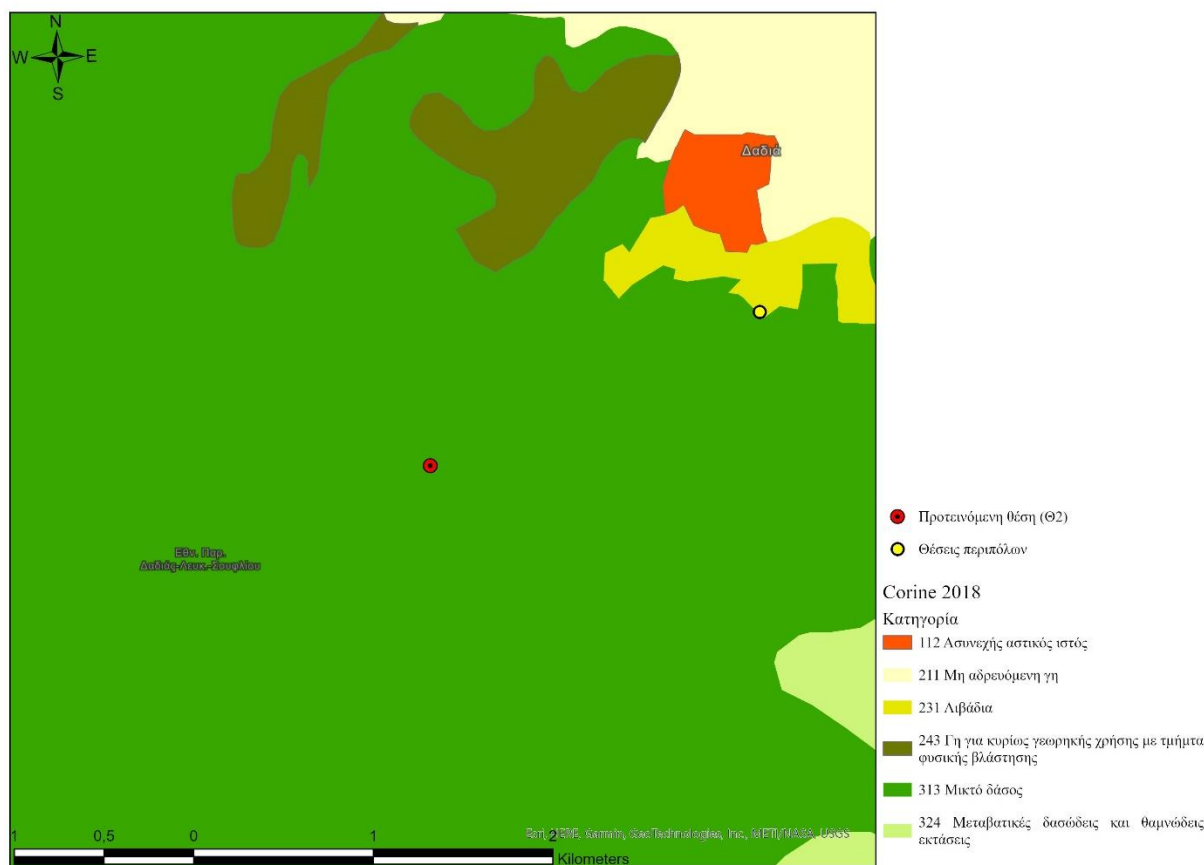


*Γράφημα 13: Μεταβολή της έκτασης των μη ορατών περιοχών με την τοποθέτηση πυροφυλάκιου στη προτεινόμενη θέση Θ2, στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.*

Η προτεινόμενη θέση σύμφωνα με τους χάρτες κάλυψης γης Corine 2018 και SVM 2021 (Ενότητα 5.1.3.1) βρίσκεται εντός μικτού δάσους. Όπως φαίνεται στις Εικόνες 72 και 73, οι δύο χάρτες συμφωνούν στην έκταση των περιοχών μικτού δάσους, που καλύπτουν και τη μεγαλύτερη έκταση περιοχής. Ο χάρτης κάλυψης που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, από τον αλγόριθμο μηχανικής εκμάθησης SVM, αναδεικνύει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη διαβάθμιση ανάμεσα στις κατηγορίες. Αντίθετα ο χάρτης Corine 2018, παρουσιάζει μεγαλύτερη ποικιλία κατηγοριών καθώς περιλαμβάνει και τη χρήση γης γεωργικών εκτάσεων και καλλιεργειών.

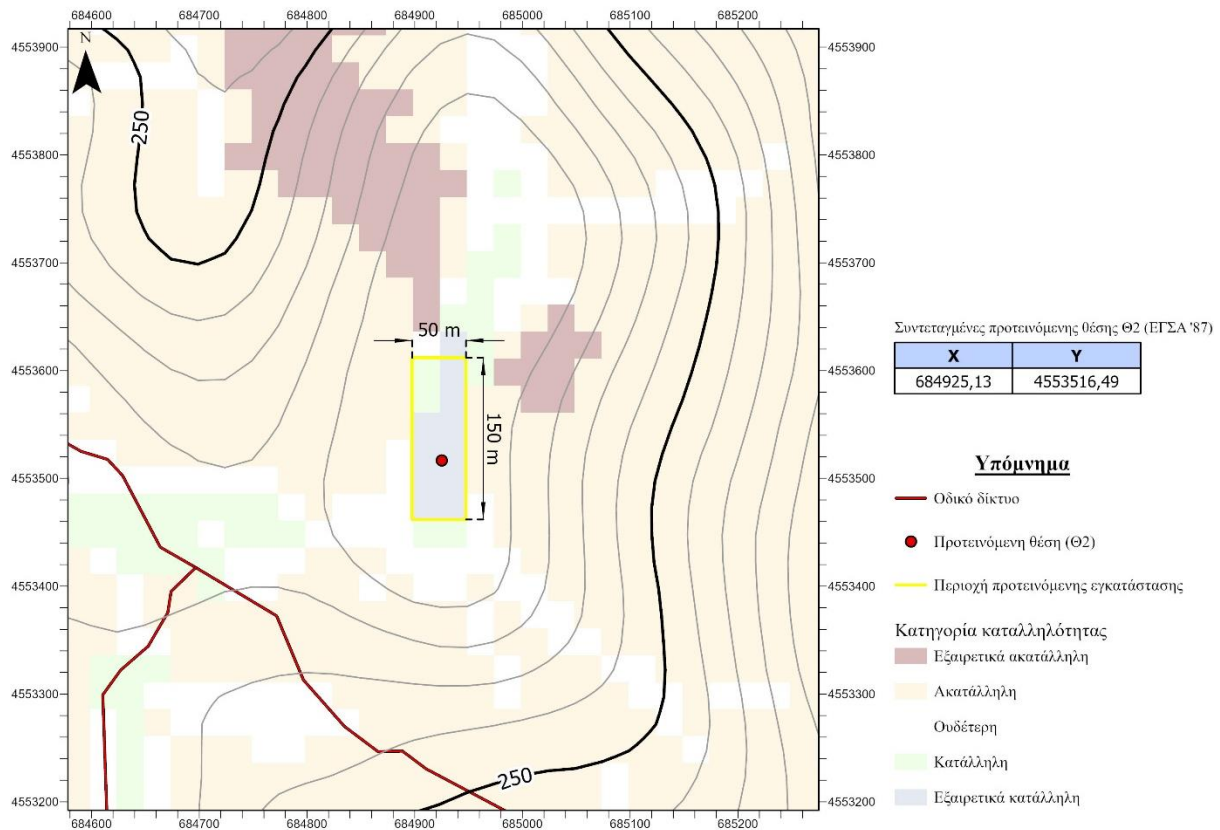


*Εικόνα 72: Η προτεινόμενη θέση σε σχέση με τη κάλυψη γης του αλγορίθμου SVM σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας του Sentinel-2 που καταγράφηκε στις 27 Σεπτεμβρίου 2021.*



Εικόνα 73: Η προτεινόμενη θέση σε σχέση με τη κάλυψη γης σύμφωνα με τον χάρτη Corine 2018.

Για την προτεινόμενη θέση Θ1 δημιουργήθηκε το ενδεικτικό τοπογραφικό διάγραμμα σε κλίμακα 1:4.000 της Εικόνας 74. Στο τοπογραφικό πέρα από τη μορφολογία του εδάφους, παρουσιάζεται το υψόμετρο, η καταλληλότητα της περιοχής, η ενδεικτική περιοχή εγκατάστασης, το οδικό δίκτυο και οι συντεταγμένες σε ΕΓΣΑ '87. Η Θ2 απέχει από τον εικονιζόμενο δρόμο 210m. και βρίσκεται σε υψόμετρο 301m. Η περιοχή υψηλής καταλληλότητας που εμπίπτει η θέση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 74, καλύπτει μια μικρή έκταση περίπου 7km<sup>2</sup>, νοτιοδυτικά του οικισμού της Δαδιάς.



Εικόνα 74: Ενδεικτικό τοπογραφικό διάγραμμα της προτεινόμενης θέσης (Θ2) εντός του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου, σε κλίμακα 1:4.000.

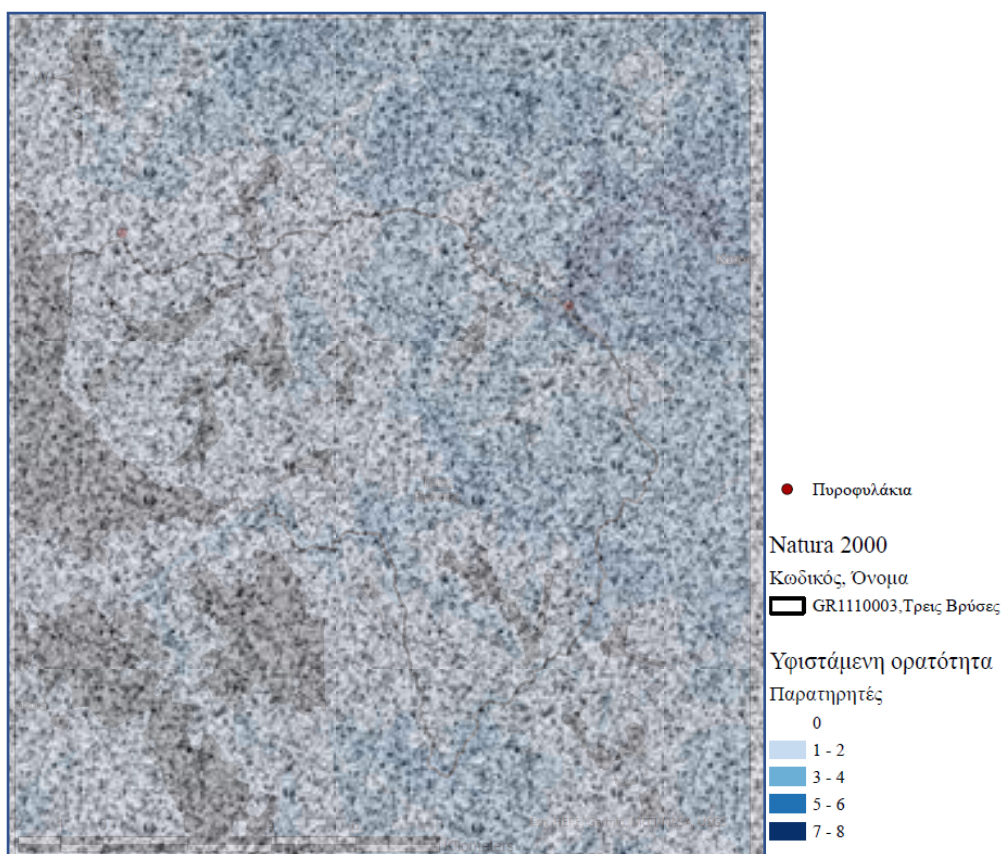
#### 8.2.5.2 Προτεινόμενη θέση για παρακολούθηση της περιοχής Natura 2000 Τρεις Βρύσες (GR1110003)

Ύστερα από έλεγχο της μεταβολής ορατότητας από διάφορες πιθανές θέσεις παρατήρησης, εντοπίστηκε μια νέα θέση που επέφερε σημαντική βελτίωση στη παρακολούθηση της περιοχής. Η θέση βρίσκεται εντός της περιοχής Natura 2000 Τρεις Βρύσες, με συντεταγμένες που παρουσιάζονται στο Πίνακα 18, 3,14 km νοτιοανατολικά του πυροφυλάκιου “Χαράκωμα”. Η θέση βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη από 4km από υφιστάμενο πυροφυλάκιο, καθώς ήταν η μοναδική πιθανή θέση, από την οποία παρατηρήθηκε σημαντική μεταβολή της ορατότητας στην περιοχή.

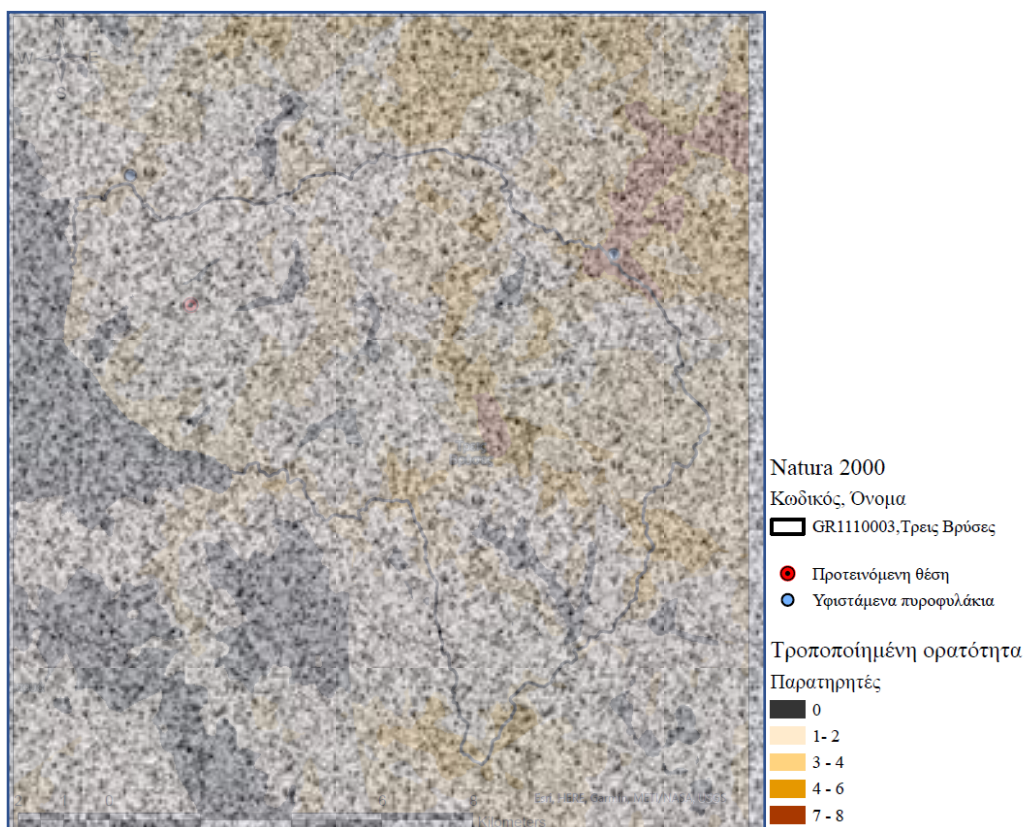
ΕΓΣΑ '87		WGS 84	
X	Y	Lat	Long
663.796,07	4.556.249,82	41,143583	25,953557

Πίνακας 18: Συντεταγμένες προτεινόμενης θέσης για τη βελτίωση της ορατότητας της περιοχής Natura 2000 Τρεις Βρύσες (GR1110003).

Η ποιοτική μεταβολή των περιοχών παρατήρησης σύμφωνα με το μοντέλο ορατότητας παρουσιάζεται στις Εικόνες 75 και 76. Στην Εικόνα 75 εμφανίζεται η υφιστάμενη ορατότητα και στην Εικόνα 76 η τροποποιημένη ορατότητα της περιοχής, με τη προσθήκη της νέα θέσης παρατήρησης σε ύψος 5m από το έδαφος. Όπως φαίνεται, η νέα θέση βελτιώνει την ορατότητα του δυτικού τμήματος της περιοχής, χωρίς όμως να επιτυγχάνεται πλήρης κάλυψη.

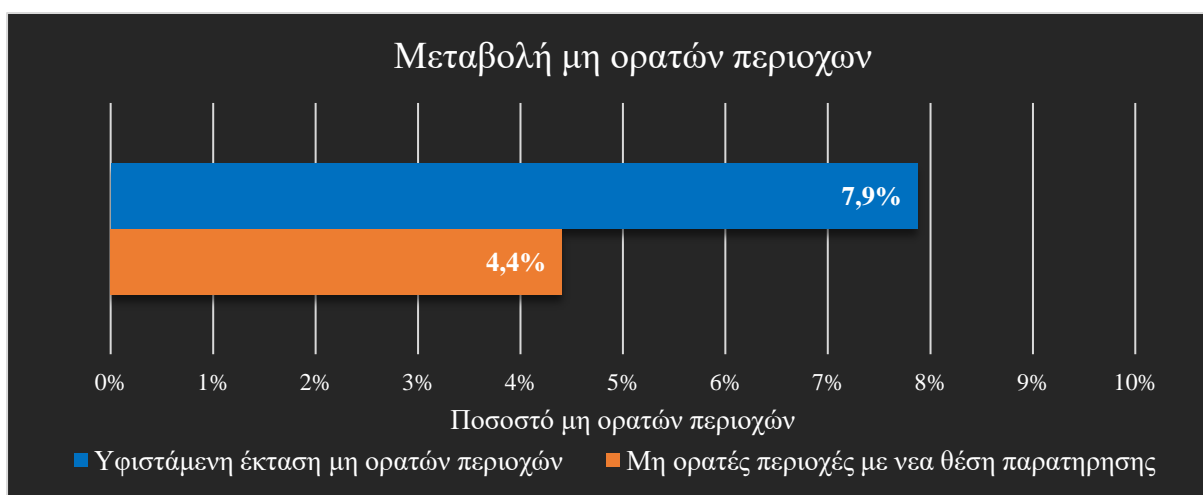


*Εικόνα 75: Υφιστάμενη ορατότητα της περιοχής Natura 2000, Τρεις Βρύσες. (Η εικόνα περιέχει εμπιστευτικά δεδομένα δεδομένα)*



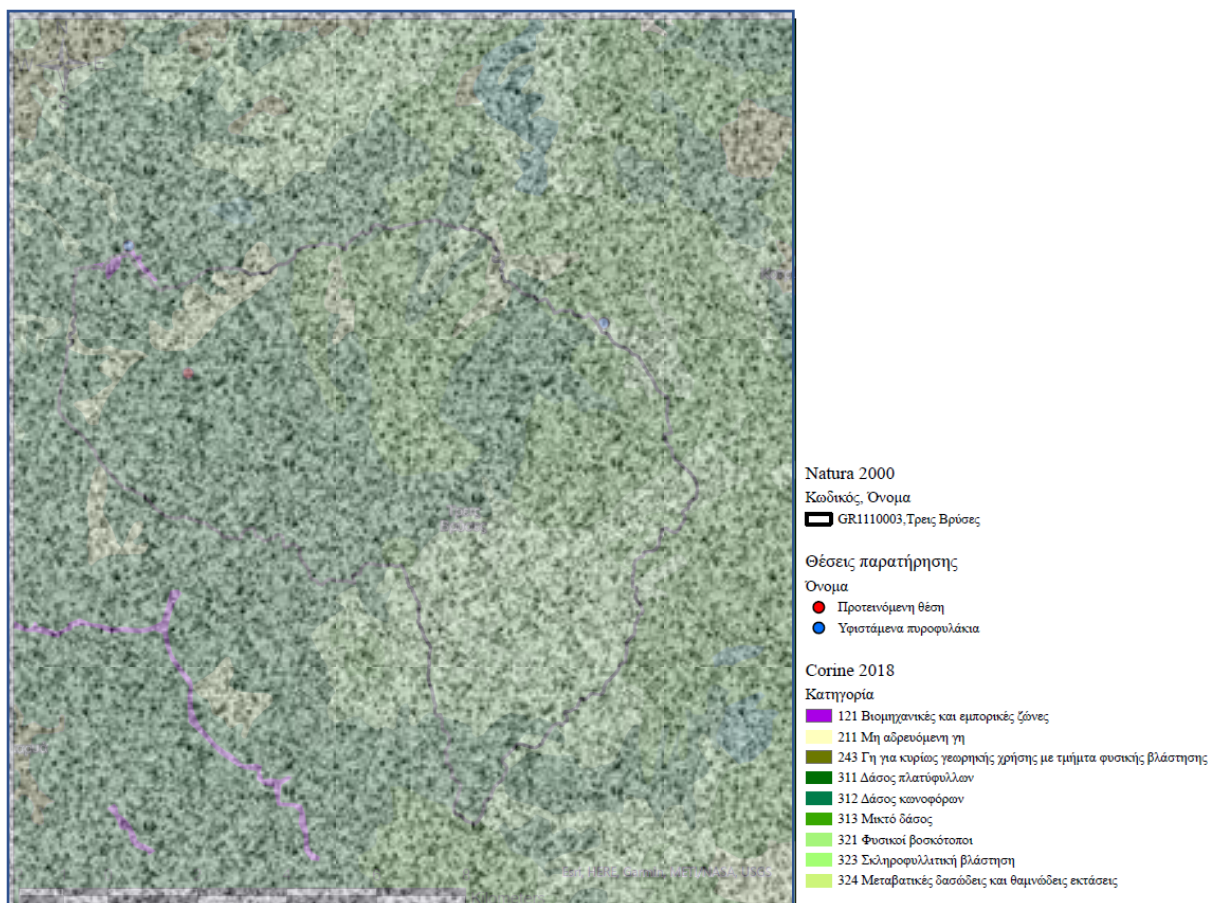
*Εικόνα 76: Τροποποιημένη ορατότητα περιοχής με τη προσθήκη της νέας θέσης παρατήρησης στην περιοχή Natura 2000, Τρεις Βρύσες. (Η εικόνα περιέχει εμπιστευτικά δεδομένα δεδομένα)*

Για να ποσοτικοποιηθεί η μεταβολή της ορατότητας στην περιοχή έγινε σύγκριση της υφιστάμενης έκτασης των μη ορατών περιοχών με τις μη ορατές περιοχές που προκύπτουν με τη νέα θέση παρατήρησης, εντός των ορίων της περιοχής Natura 2000 Τρεις Βρύσες. Η αρχική έκταση των μη ορατών περιοχών είναι 7.833km<sup>2</sup> και αντιστοιχεί στο 7,9% της συνολικής έκτασης της περιοχής Natura 2000. Η νέα θέση παρατήρησης μειώνει τις μη ορατές περιοχές κατά 44%, επιτυγχάνοντας την κάλυψη επιπλέον 3.451km<sup>2</sup> δασικών εκτάσεων. Επομένως, η νέα κάλυψη είναι 4.382 km<sup>2</sup> και αντιστοιχεί στο 4,4% της συνολικής έκτασης της περιοχής Natura 2000. Η αναλυτική μεταβολή του ποσοστού των μη ορατών περιοχών παρουσιάζεται στο Γράφημα 14.



*Γράφημα 14: Μεταβολή του ποσοστού των μη ορατών περιοχών με τη νέα θέση παρατήρησης σε σχέση με την υφιστάμενη στη περιοχή Natura 2000, Τρεις Βρύσες.*

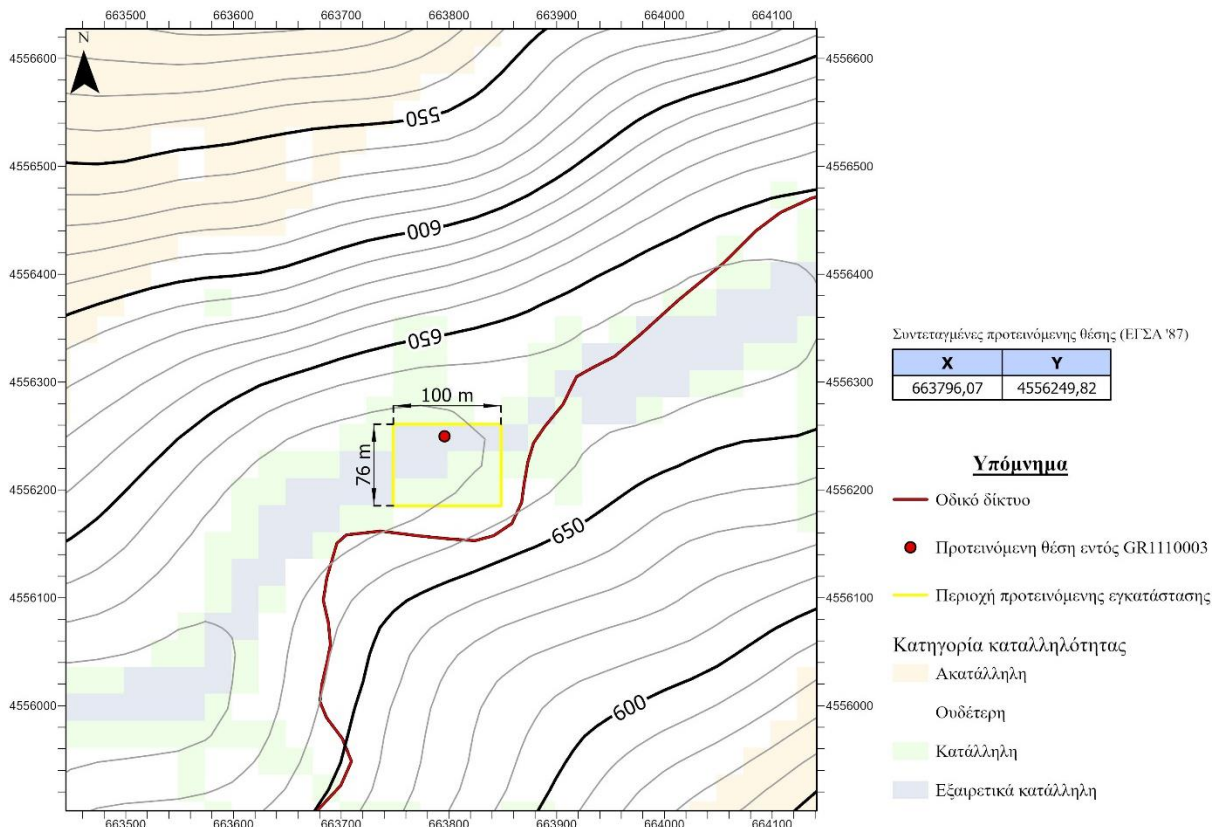
Η προτεινόμενη θέση, σύμφωνα με το χάρτη χρήσης γης Corine 2018 της Εικόνα 77, βρίσκεται εντός περιοχής δάσους πλατύφυλλων. Με βάση την τροποποίηση της ορατότητας, η νέα θέση δίνει τη δυνατότητα καλύτερης παρατήρησης του δάσους των πλατύφυλλων και του μικτού δάσους, ενώ δεν επηρεάζει την ορατότητα της περιοχής σκληροφυλλικής βλάστησης που βρίσκεται στα ανατολικά.



*Εικόνα 77: Σύγκριση της προτεινόμενης θέσης και της κάλυψη γης σύμφωνα με το χάρτη Corine 2018, εντός της περιοχής Natura 2000, Τρεις Βρύσες. (Η εικόνα περιέχει εμπιστευτικά δεδομένα δεδομένα)*

Τέλος, η προτεινόμενη θέση τοποθετείται σε υψόμετρο 673m. και απέχει 81m από δρόμο. Για τη θέση κατασκευάστηκε το ενδεικτικό τοπογραφικό διάγραμμα της Εικόνα 78, όπου παρουσιάζεται η περιοχή της προτεινόμενης εγκατάστασης και η καταλληλότητα της περιοχής σύμφωνα με το μοντέλο της Υποεπάρκειας 8.2.3, σε υπόβαθρο ισουψών καμπύλων και συντεταγμένες ΕΓΣΑ '87.





Εικόνα 78: Ενδεικτικό τοπογραφικό διάγραμμα της προτεινόμενης θέσης εντός της περιοχής Natura 2000, Τρεις Βρύσες, σε κλίμακα 1:4.000.

### 8.2.5.3 Προτεινόμενη θέση για παρακολούθηση της περιοχής Natura 2000, Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου (GR1110009)

Στην περιοχή Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου εντοπίστηκε μία θέση, η οποία αυξάνει σημαντικά την ορατότητα στη περιοχή, ιδιαίτερα στο δυτικό τμήμα της περιοχής Natura 2000. Η θέση βρίσκεται περίπου στο κέντρο του δυτικού τμήματος της περιοχής του Νοτίου Δασικού Συμπλέγματος Έβρου με συντεταγμένες που παρουσιάζονται στο Πίνακα 19 σε ΕΓΣΑ '87 και WGS 84. Η μελέτη εστίασε στον εντοπισμό θέσεων που αυξάνουν την ορατότητα του δυτικού τμήματος, καθώς εκεί εντοπίζεται το μεγαλύτερο μέρος των δασικών εκτάσεων, σύμφωνα με τον χάρτη κάλυψης γης της (Εικόνα 63).

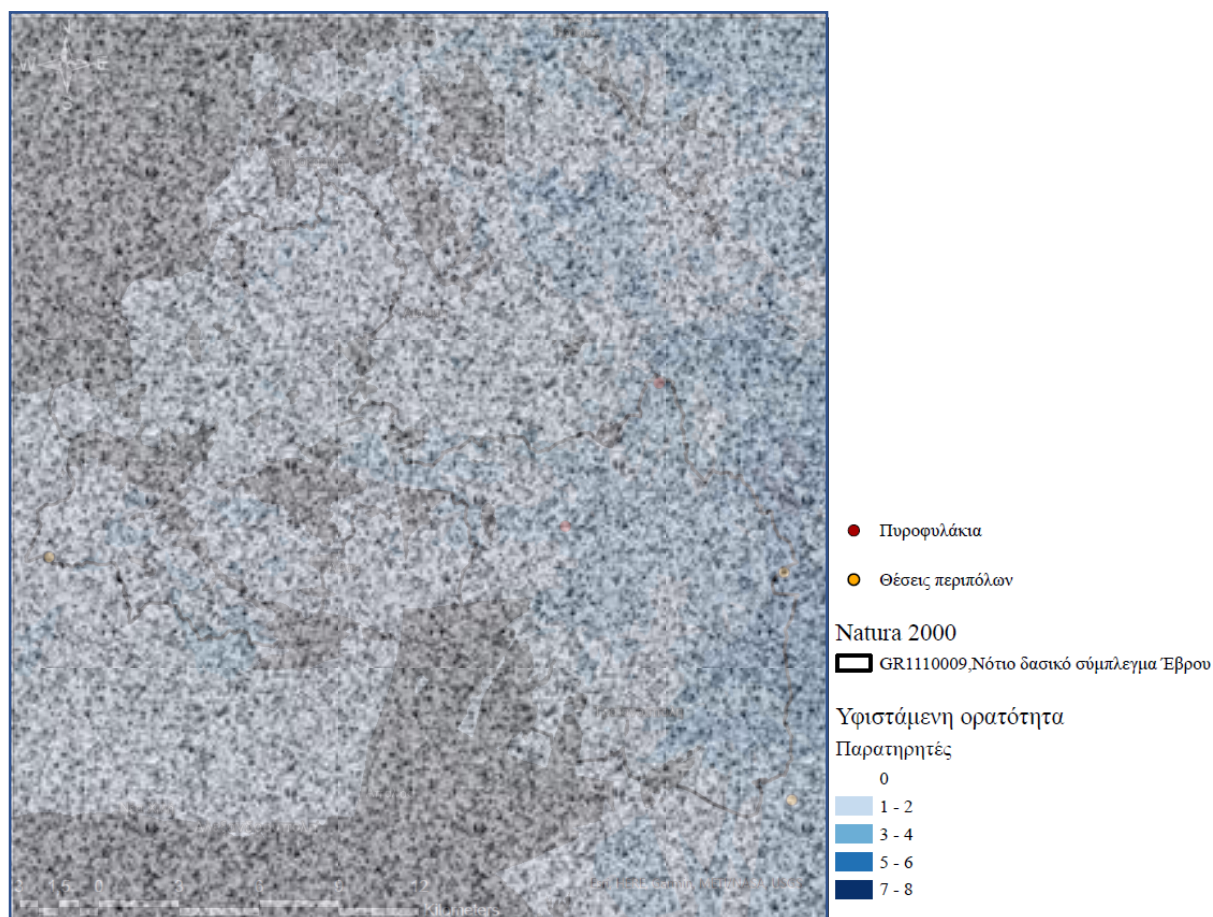
ΕΓΣΑ '87		WGS 84	
X	Y	Lat	Long
656.941,79	4.537.023,87	40,971842	25,867022

Πίνακας 19: Συντεταγμένες προτεινόμενης θέσης για τη βελτίωση της ορατότητας της περιοχής Natura 2000 Τρεις Βρύσες (GR1110003).

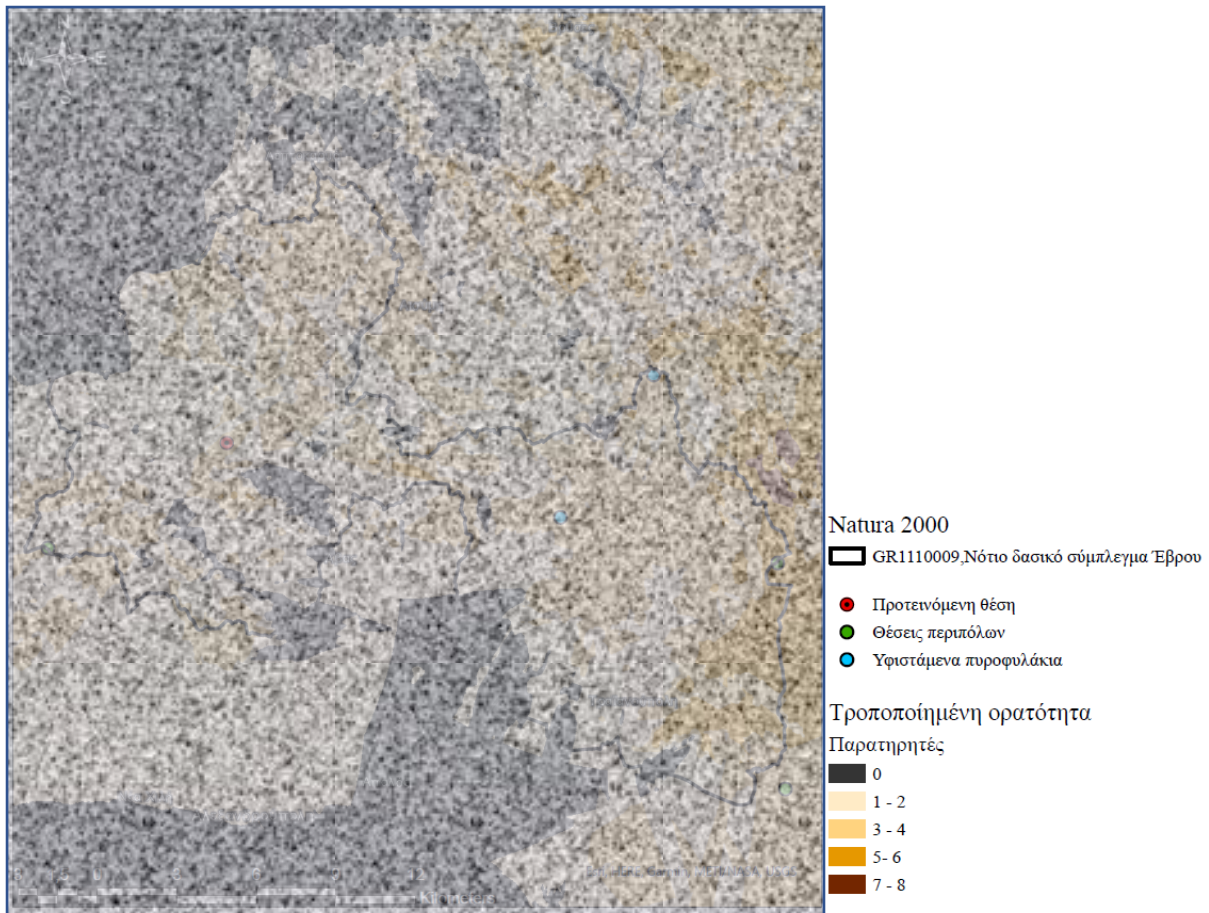
Η μεταβολή των παρατηρούμενων περιοχών σύμφωνα με το μοντέλο ορατότητας παρουσιάζεται στις Εικόνες 79 και 80. Στην Εικόνα 79 παρουσιάζεται η υφιστάμενη κάλυψη ορατότητας της περιοχής. Σε αυτή είναι εμφανείς οι εκτάσεις των μη ορατών περιοχών που εντοπίζονται κυρίως στο δυτικό τμήμα της περιοχής Natura. Σύμφωνα με τη τροποποιημένη κάλυψη ορατότητας της Εικόνας 80, οι μη ορατές περιοχές μειώνονται σημαντικά. Η κάλυψη



ορατότητας της περιοχής δεν είναι πλήρης, όμως όπως θα φανεί στη συνέχεια από τη ποσοτική μεταβολή των μη ορατών εκτάσεων, η μείωση είναι σημαντική.

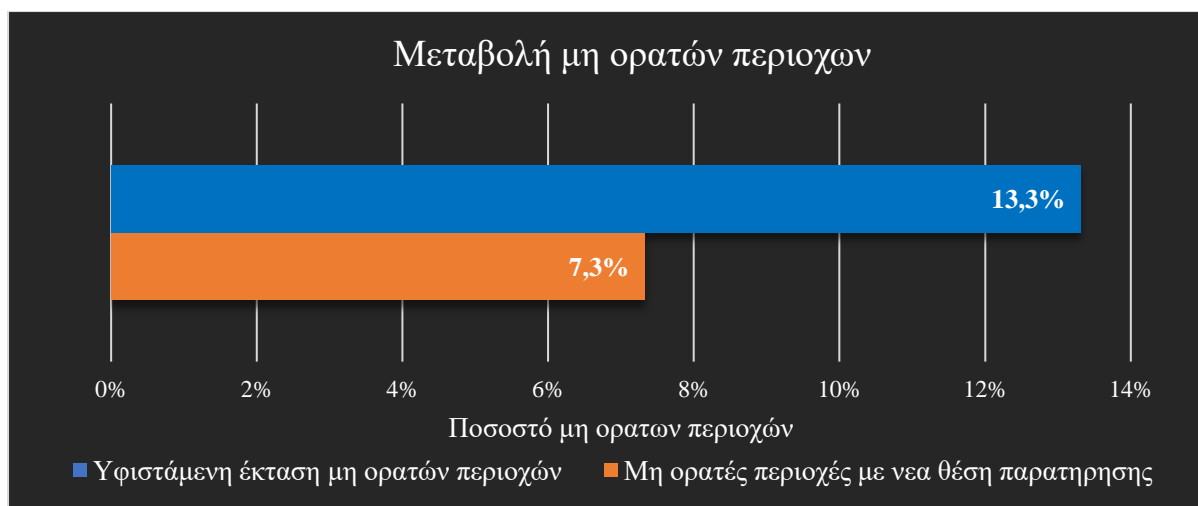


*Εικόνα 79: Υφιστάμενη ορατότητα της περιοχής Natura 2000, Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου. (Η εικόνα περιέχει εμπιστευτικά δεδομένα δεδομένα)*



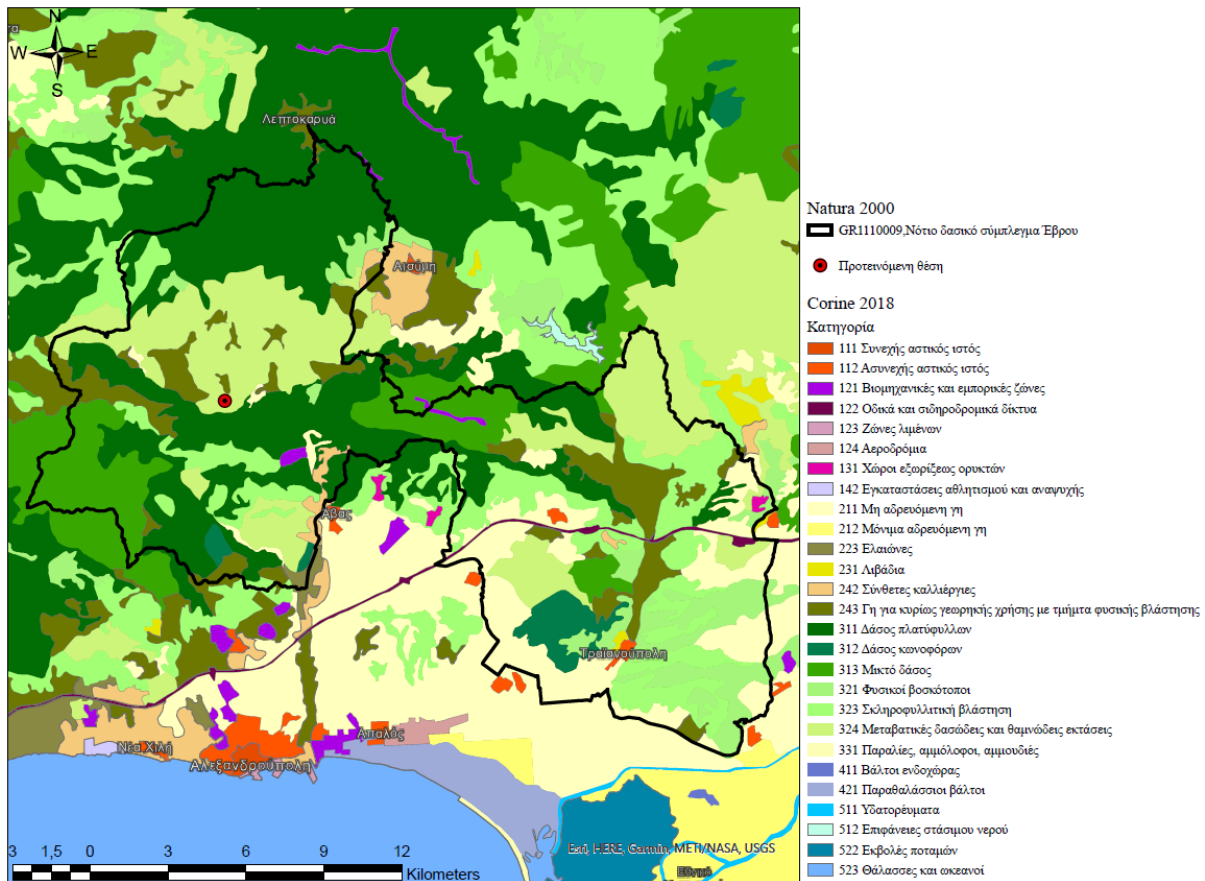
*Εικόνα 80: Τροποποιημένη ορατότητα περιοχής με τη προσθήκη της νέας θέσης παρατήρησης στη περιοχή Natura 2000, Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου. (Η εικόνα περιέχει εμπιστευτικά δεδομένα δεδομένα)*

Όπως και στην προηγούμενη υποενότητα, για να ποσοτικοποιηθεί η μεταβολή της ορατότητας στην περιοχή έγινε σύγκριση της υφιστάμενης έκτασης των μη ορατών περιοχών με τις μη ορατές περιοχές που προκύπτουν με τη νέα θέση παρατήρησης. Η αρχική έκταση των μη ορατών περιοχών είναι  $39.601\text{km}^2$  και αντιστοιχεί στο 13,3% της συνολικής έκτασης της περιοχής Natura 2000. Η νέα θέση παρατήρησης μειώνει τις μη ορατές περιοχές κατά 45%, επιτυγχάνοντας τη κάλυψη επιπλέον  $17.800\text{km}^2$  δασικών εκτάσεων. Επομένως, η νέα κάλυψη είναι  $21.801\text{km}^2$  και αντιστοιχεί στο 7,3% της συνολικής έκτασης της περιοχής Natura 2000. Η αναλυτική μεταβολή του ποσοστού των μη ορατών περιοχών παρουσιάζεται στο Γράφημα 15.



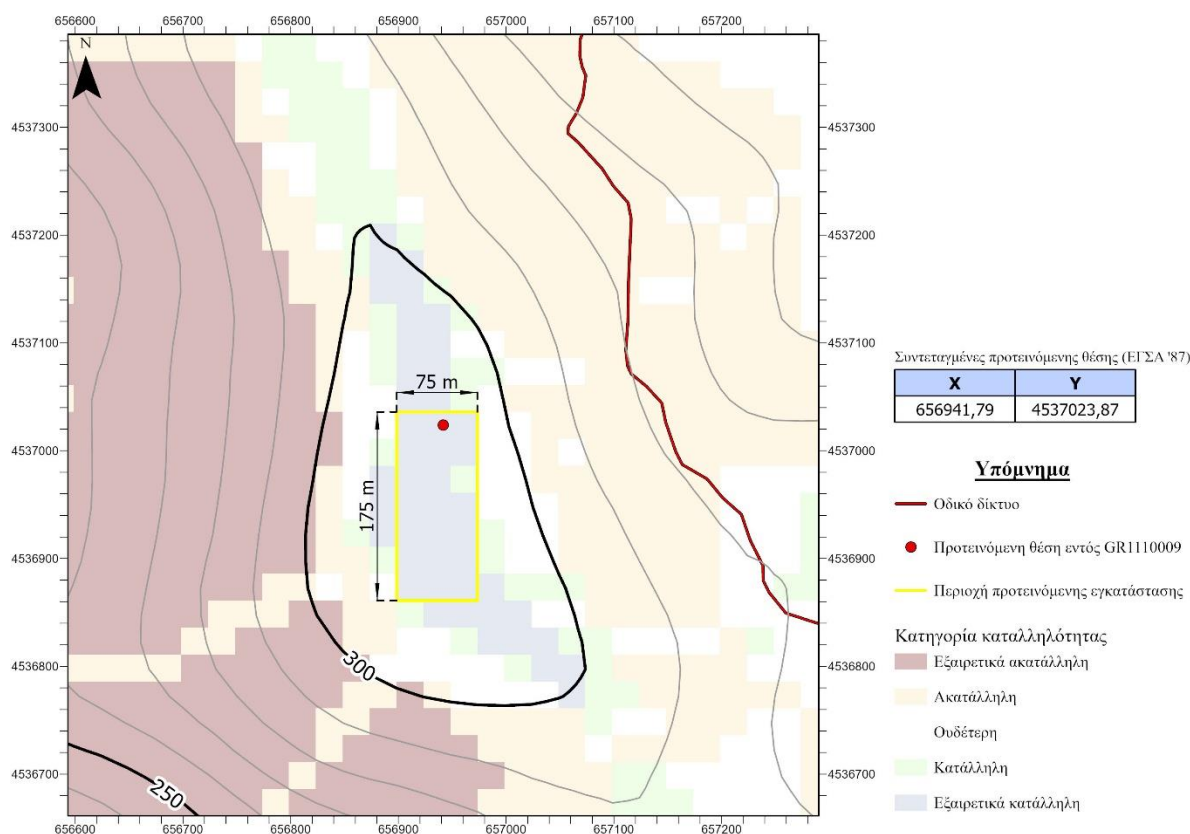
*Γράφημα 15: Μεταβολή του ποσοστού των μη ορατών περιοχών με τη νέα θέση παρατήρησης στη περιοχή Natura 2000, Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου.*

Η προτεινόμενη θέση, σύμφωνα με το χάρτη χρήσης γης Corine 2018 της Εικόνα 81, βρίσκεται εντός περιοχής που χαρακτηρίζεται ως μεταβατική δασώδης. Με βάση τη τροποποίηση της ορατότητας, η νέα θέση δίνει τη δυνατότητα καλύτερης παρατήρησης του δάσους των πλατύφυλλων του δυτικού τμήματος της περιοχής Natura 2000. Αντίθετα η θέση δεν προσφέρει βελτίωση στην ορατότητά του ανατολικού τμήματος. Η κάλυψη της γης στην ανατολική περιοχή σύμφωνα με το χάρτη (Εικόνα 63), που προέκυψε από την ανάλυση της Ενότητας 5.1.3.1 και με το χάρτη Corine 2018, περιλαμβάνει κυρίως μη αρδευόμενες εκτάσεις και χαμηλή θαμνώδης βλάστηση.



Εικόνα 81: Σύγκριση της προτεινόμενης θέσης και της κάλυψη γης σύμφωνα με το χάρτη Corine 2018, εντός της περιοχής Natura 2000, Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου.

Όπως και στις προηγούμενες προτεινόμενες θέσεις, έτσι και για την περίπτωση της θέσης παρατήρησης εντός της περιοχής Natura 2000, Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου, δημιουργήθηκε το ενδεικτικό τοπογραφικό διάγραμμα της σε κλίμακα 1:4.000 της Εικόνας 82. Στην Εικόνα 82 παρουσιάζονται το οδικό δίκτυο, η προτεινόμενη θέση, η ενδεικτική έκταση της προτεινόμενης εγκατάστασης, η καταλληλότητα της περιοχής σύμφωνα με το μοντέλο της Υποενότητας 8.2.3, σε υπόβαθρο ισοϋψών καμπύλων και συντεταγμένες ΕΓΣΑ '87. Συγκεκριμένα, η προτεινόμενη θέση βρίσκεται σε υψόμετρο 309m. και απέχει από το οδικό δίκτυο 181m.



Εικόνα 82: Ενδεικτικό τοπογραφικό διάγραμμα της προτεινόμενης θέσης εντός της περιοχής Natura 2000, Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου, σε κλίμακα 1:4.000.

### 8.3 Διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων παρακολούθησης

Στα πλαίσια της μελέτης για τη βελτίωση της παρακολούθησης της περιοχής του νομού Έβρου, ιδιαίτερα στην ευρύτερη περιοχή του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου και στις περιοχές που εντάσσονται στο δίκτυο Natura 2000, διερευνήθηκαν εναλλακτικές λύσεις παρακολούθησης. Το κόστος ενός νέου πυροφυλάκιου είναι σημαντικό, για παράδειγμα η κατασκευή ενός ξύλινου πυροφυλάκιου ύψους 4m. κοστίζει περίπου 7.100€<sup>[101]</sup>. Ειδικά στη περίπτωση που επιλεγεί να κατασκευαστεί νέο μόνιμο πυροφυλάκιο η λειτουργία του θα πρέπει να συνδυάζεται με άλλες χρήσεις, εκτός του εντοπισμού των πυρκαγιών, όπως για προσωρινή κατοικία του πυροφύλακα ή δασοφύλακα, ως καταφύγιο ή ως θερινός ή χειμερινός ξενώνας των τοπικών δασικών υπαλλήλων<sup>[102]</sup>. Επομένως, είναι σημαντική η μελέτη πιθανών εναλλακτικών λύσεων, που δίνουν τη δυνατότητα διεύρυνσης της παρακολούθησης των περιοχών τρωτότητας.

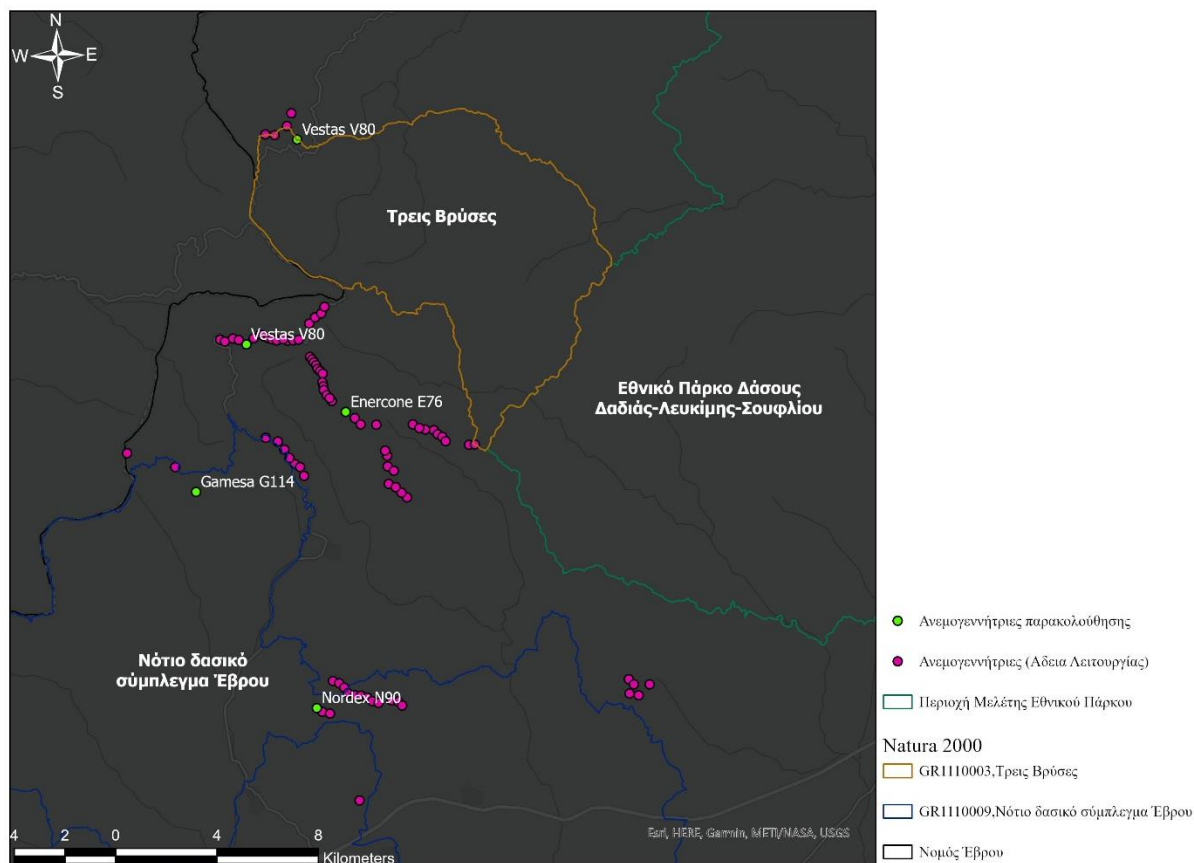
Αποτελεσματική και λιγότερο δαπανηρή λύση αποτελεί η αξιοποίηση υφιστάμενων υποδομών για την παρακολούθηση των περιοχών. Στην προκειμένη περίπτωση διερευνήθηκε θεωρητικά η μεταβολή στην ορατότητα, με τη τοποθέτηση συσκευών παρακολούθησης σε ανεμογεννήτριες που λειτουργούν στην περιοχή (διαθέτουν άδεια λειτουργίας). Η εφαρμογή οπτικών συστημάτων παρακολούθησης σε αιολικά πάρκα έχει προταθεί τόσο για την διασφάλιση της λειτουργίας των ανεμογεννητριών<sup>[103]</sup> όσο για τη προστασία των πτηνών<sup>[104]</sup>. Επομένως, στο μοντέλο εναλλακτικής παρακολούθησης προτείνεται παράλληλα με τη βασική λειτουργία τους, κάμερες να αξιοποιηθούν για την προστασία των δασών από τις πυρκαγιές.

Οι κάμερες, όταν υπάρχουν, τοποθετούνται σε κατάλληλα σημεία πάνω στις ανεμογεννήτριες ή βρίσκονται εντός των αιολικών πάρκων σε υπερυψωμένους πυλώνες. Οι δύο λύσεις είναι δυνατόν να συνεισφέρουν σημαντικά στην διεύρυνση της υφιστάμενης περιοχής παρακολούθησης. Αυτό συμβαίνει, καθώς οι ανεμογεννήτριες ως επί των πλείστων είναι τοποθετημένες σε περίοπτες θέσεις, ώστε να μη διαταράσσεται η ροή του ανέμου από τη τραχύτητα του εδάφους. Ειδικότερα, στην περίπτωση που η κάμερα είναι τοποθετημένη στην ανεμογεννήτρια μπορεί να επιτευχθεί πανοραμική παρακολούθηση της περιοχής, καθώς το ύψος μιας τυπικής ανεμογεννήτριας είναι υψηλότερο από 50m. Τα στοιχεία αυτά καθιστούν θεωρητικά τις ανεμογεννήτριες και τα αιολικά πάρκα ιδανικά σημεία παρακολούθησης.

Στην παρούσα ενότητα διερευνήθηκε η μεταβολή της ορατότητας από τη τοποθέτηση συστήματος παρακολούθησης (κάμερα) στην άτρακτο 5 ανεμογεννητριών που βρίσκονται εντός της περιοχής μελέτης. Η επιλογή τους έγινε με βάση την απόσταση τους από της περιοχές τρωτότητας και την μεταξύ τους απόσταση. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν ανεμογεννήτριες όσο το δυνατόν πιο κοντά στις περιοχές τρωτότητας και όσον το δυνατόν πιο απομακρυσμένες μεταξύ τους. Σε περιπτώσεις που υπήρχαν πολλές ανεμογεννήτριες που πληρούσαν τα κριτήρια σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, η επιλογή έγινε με βάση το ύψος της ατράκτου. Έπειτα από επαναλήψεις του εναλλακτικού μοντέλου ορατότητας επιλέχθηκαν οι 5 ανεμογεννήτριες του Πίνακα 20, όπου παρουσιάζεται ο τύπος, το ύψος της ατράκτου και οι συντεταγμένες σε ΕΓΣΑ '87<sup>[41]</sup>. Η χωροθέτηση των επιλεγμένων ανεμογεννητριών του Πίνακα 20 σε σύγκριση με τις περιοχές του δικτύου Natura 2000 παρουσιάζεται στο χάρτη της Εικόνας 83.

α/α	Τύπος Α/Γ	Ύψος ατράκτου (m)	X	Y
1	Vestas V80	60	660872,00	4550408,00
2	Nordex N90	80	663658,54	4536068,56
3	Gamesa G114	80	658888,00	4544589,00
4	Vestas V80	60	662881,86	4558478,79
5	Enercone E76	85	664792,00	4547738,00

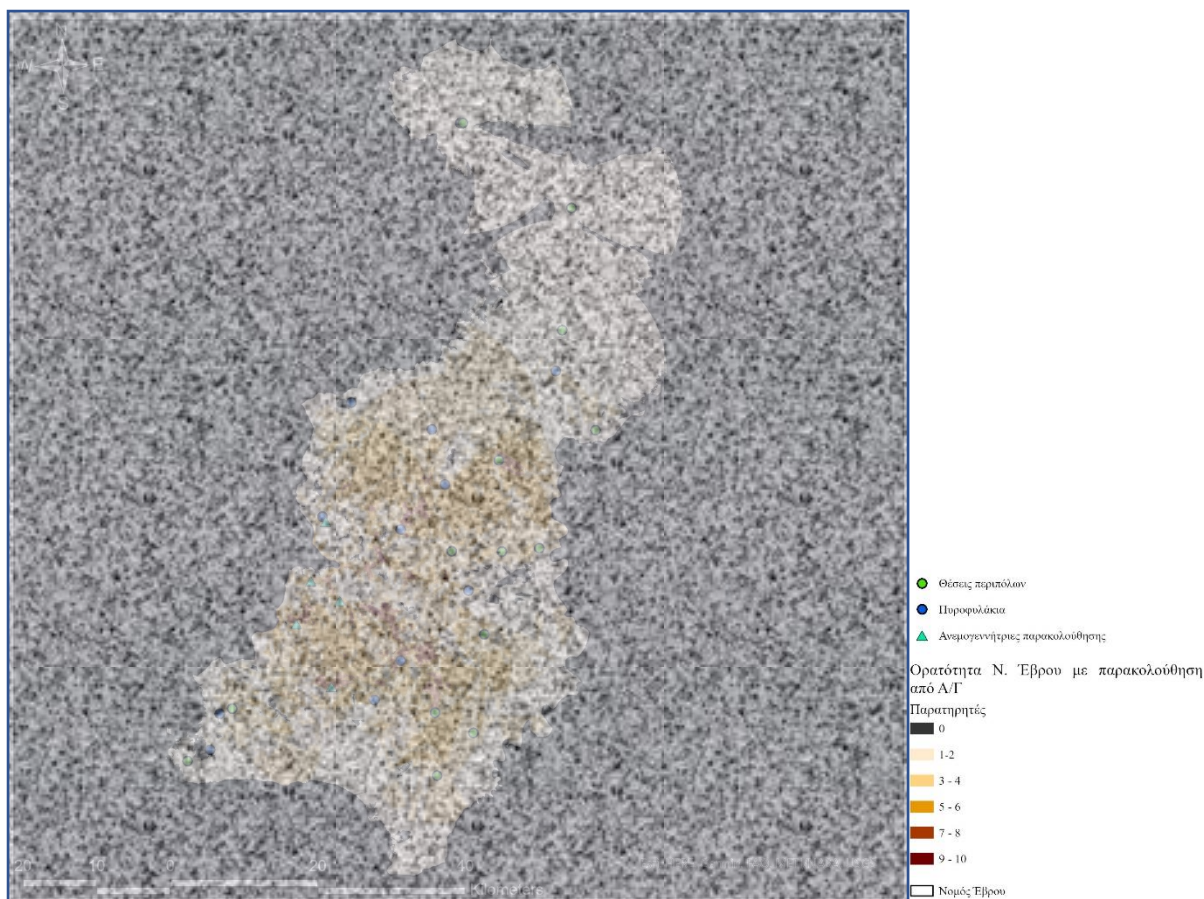
*Πίνακας 20: Χαρακτηριστικά και συντεταγμένες των ανεμογεννητριών που επιλέχθηκαν στο εναλλακτικό μοντέλο βελτίωσης ορατότητας.*



**Εικόνα 83:** Οι ανεμογεννήτριες παρακολούθησης που ενσωματώθηκαν στο μοντέλο παρακολούθησης του νομού Έβρου. Στην εικόνα παρουσιάζονται οι προστατευόμενες περιοχές και οι ανεμογεννήτριες που διαθέτουν Άδεια Λειτουργίας.

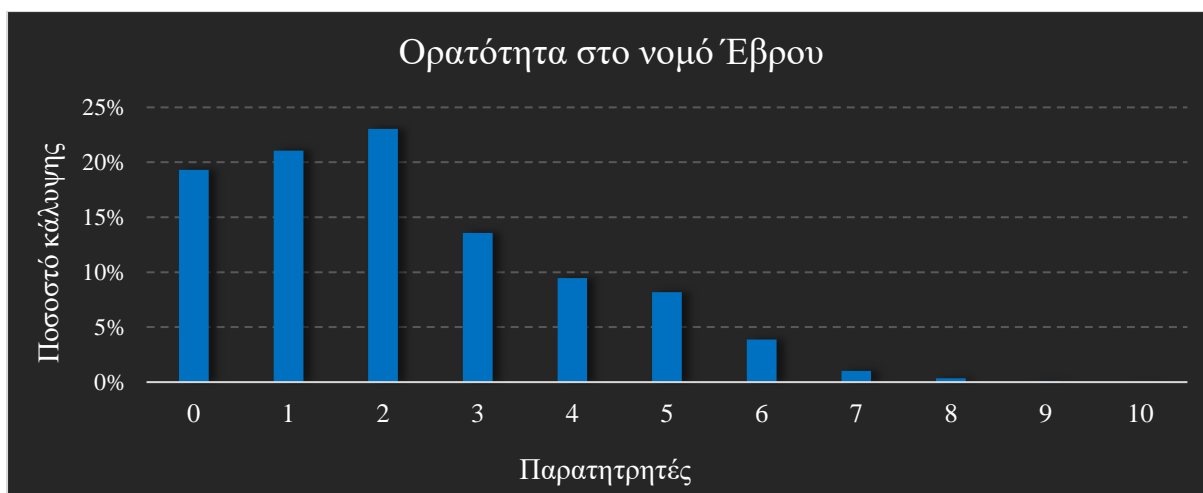
Στην παράμετρο του ύψους των παρατηρητών, για τις ανεμογεννήτριες, στο μοντέλο ορατότητας χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του ύψους ατράκτου από τον Πίνακα 20. Οι υπόλοιπες παράμετροι του μοντέλου ορατότητας παρέμειναν ίδιες με αυτές που εκτιμήθηκαν στην Ενότητα 8.1.1. Η νέα κάλυψη ορατότητας του νομού Έβρου με τις θέσεις των 5 ανεμογεννητριών και των υφιστάμενων υποδομών παρακολούθησης του Πυροσβεστικού Σώματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 84. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι στο μοντέλο έχει γίνει η υπόθεση ότι οι συσκευές παρατήρησης στις ανεμογεννήτριες δίνουν τη δυνατότητα περιμετρική κάλυψη του τοπίου. Η περιμετρική παρακολούθηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με μία η περισσότερες συσκευές.





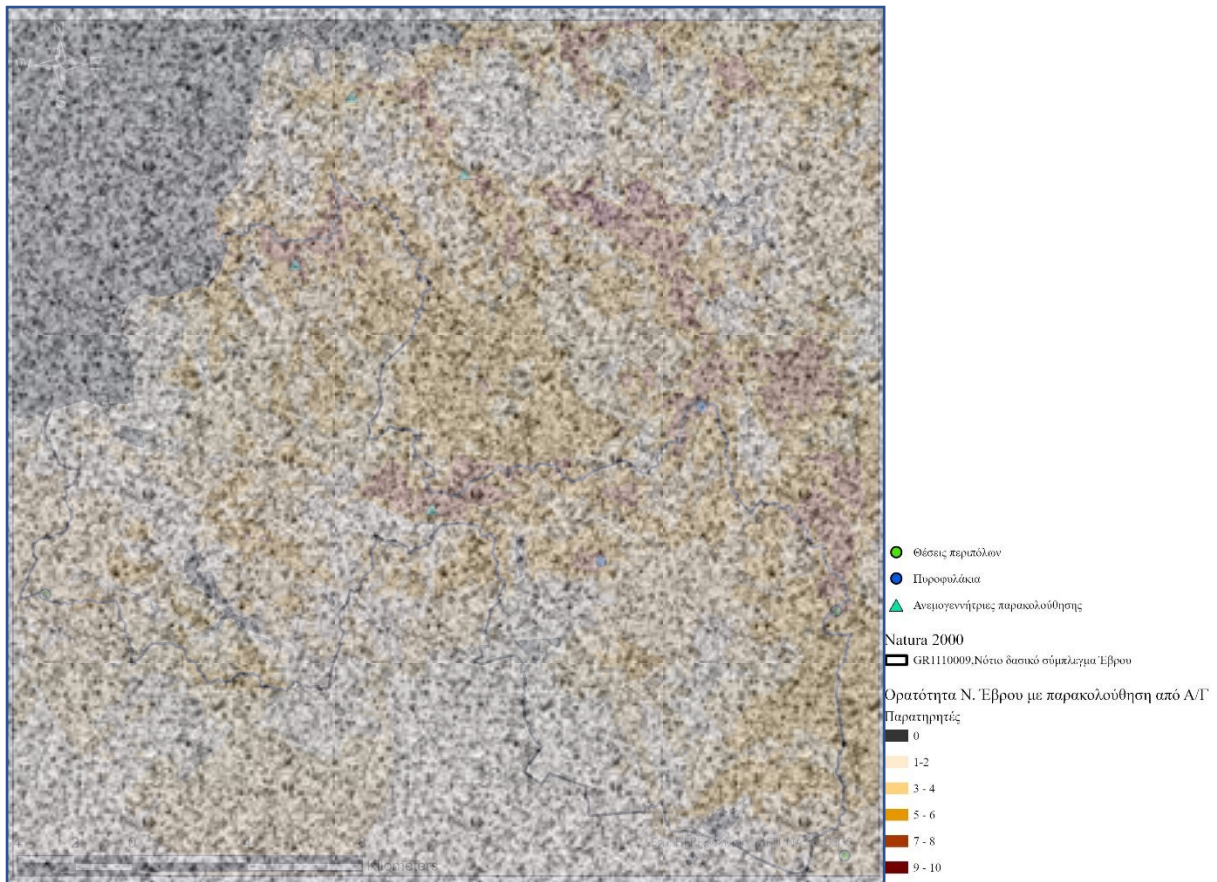
*Εικόνα 84: Τροποποιημένη ορατότητα στο νομό Έβρου με τη προσθήκη θεωρητικών συσκευών παρακολούθησης στις 5 επιλεγμένες ανεμογεννήτριες της περιοχής. (Η εικόνα περιέχει εμπιστευτικά δεδομένα δεδομένα)*

Η βελτίωση της παρακολούθησης του νομού Έβρου με τη σύγκριση των Εικόνων 58 και 84 είναι εμφανής. Ιδιαίτερα στο νότιο τμήμα του Νομού η αύξηση των περιοχών παρακολούθησης έχει αυξηθεί σημαντικά συμπεριλαμβανομένων των περιοχών τρωτότητας. Αναλυτικότερα, σύμφωνα με το Γράφημα 16, οι μη ορατές περιοχές καλύπτουν το 19,3% του Νομού, ενώ το 36,6% παρακολουθείται από 3 ή περισσότερους παρατηρητές. Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα με την υφιστάμενη κατανομή της ορατότητας που παρουσιάζεται στο Γράφημα 7, καταγράφεται μείωση των μη ορατών περιοχών κατά 3,7% και αύξηση των περιοχών που παρακολουθούνται από 3 ή περισσότερους παρατηρητές κατά 9,6%. Όπως αναφέρθηκε, είναι σημαντικό ότι οι μεταβολές αυτές αφορούν το νότιο τμήμα του Νόμου, όπου εντοπίζονται οι περιοχές τρωτότητας, καθώς και το σημαντικότερο μέρος των δασικών εκτάσεων.

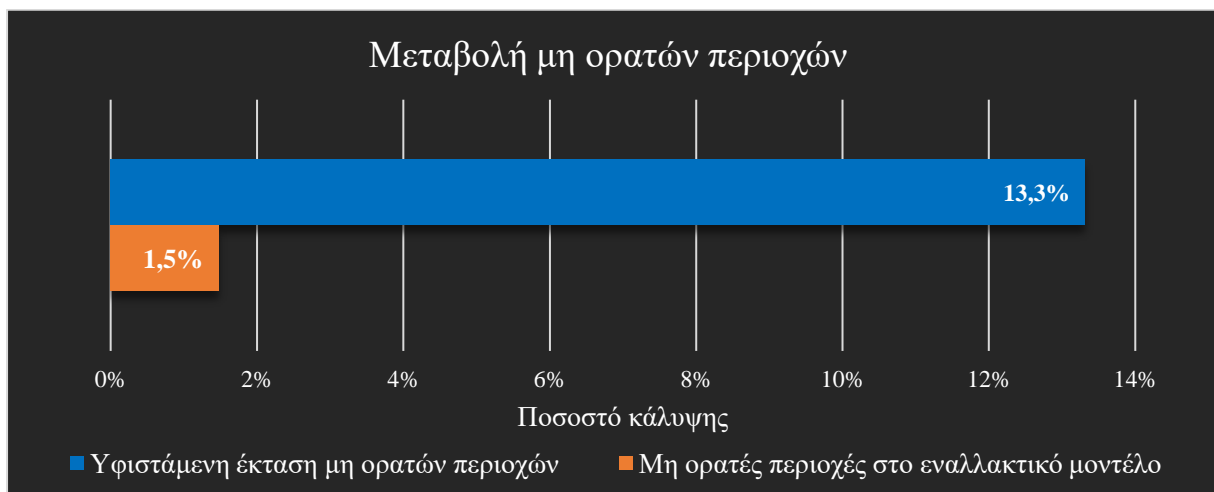


*Γράφημα 16:* Κατανομή της ορατότητας στο Ν. Έβρου με τη προθήκη θεωρητικών συσκευών παρακολούθησης στις 5 επιλεγμένες ανεμογεννήτριες, όπου παρουσιάζεται το ποσοστό κάλυψης ανάλογα με τον αριθμό των παρατηρητών που έχουν οπτική επαφή με τις ορατές περιοχές σύμφωνα με την Εικόνα 84.

Ειδικότερα, η μεγαλύτερη βελτίωση ορατότητας εντοπίζεται στη περιοχή **Natura 2000, Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου (GR1110009)**. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 85 η παρακολούθηση της περιοχής είναι σχεδόν πλήρης, καλύπτοντας τόσο της δασικές περιοχές του ανατολικού τμήματος όσο και το δυτικό τμήμα. Η υφιστάμενη έκταση των μη ορατών περιοχών είναι 39.601 km<sup>2</sup>, που αντιστοιχεί στο 13,3% της συνολικής έκτασης της περιοχής Natura 2000. Η μη ορατές περιοχές στο εναλλακτικό σενάριο παρακολούθησης μειώνονται κατά 35.194 km<sup>2</sup> φτάνοντας τα 4.408 km<sup>2</sup>. Η νέα έκταση των μη ορατών περιοχών, όπως φαίνεται στο Γράφημα 17, αντιστοιχεί στο 1,5% της συνολικής έκτασης. Βάση της εξωτερικής ακτίνας ορατότητας ( $r_{max}$ ) 15.000m. του μοντέλου, η μεταβολή στην παρακολούθηση της περιοχής οφείλεται στη προσθήκη συσκευών παρακολούθησης στις 3 νοτιότερες ανεμογεννήτριες της Εικόνας 83, τύπων Nordex N90, Gamesa G114 και Enercon E76.



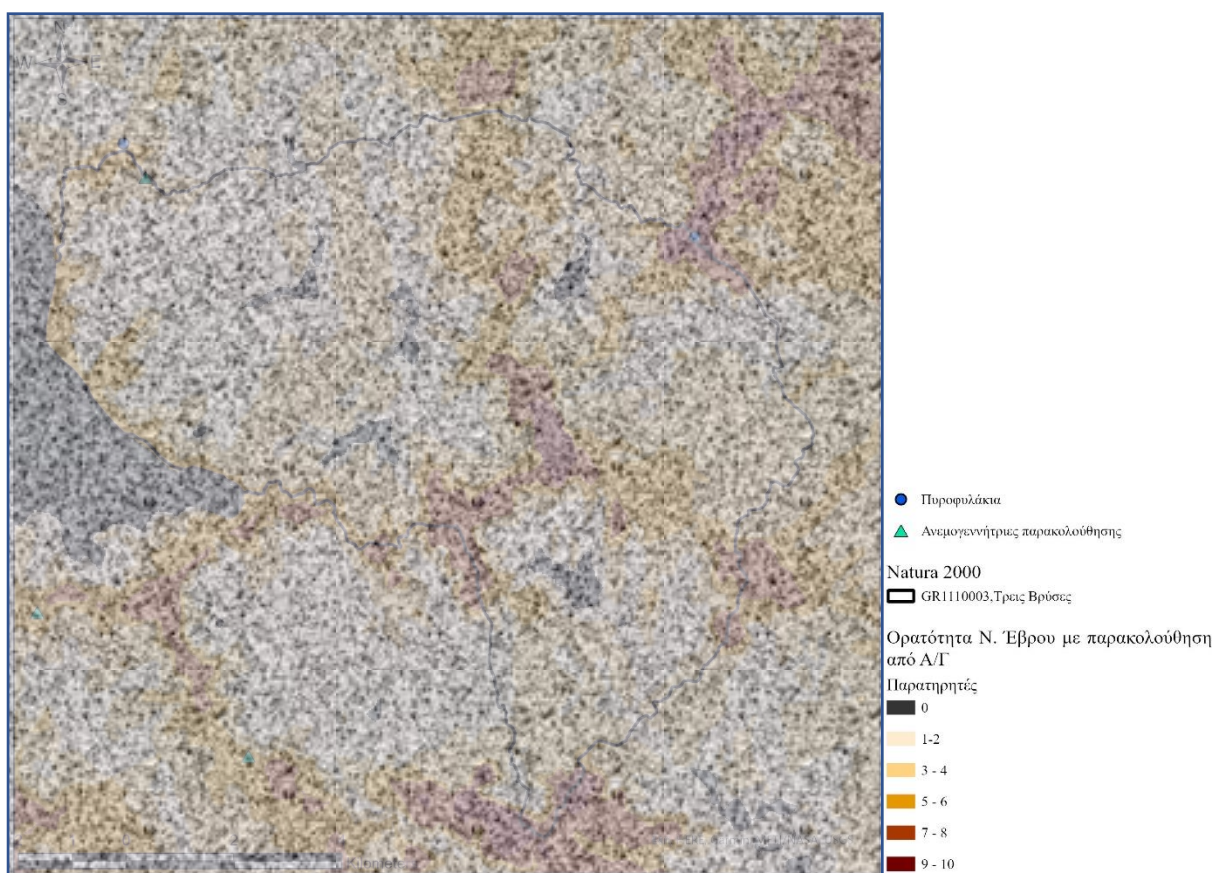
**Εικόνα 85:** Ορατότητα στη περιοχή Natura 2000, Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου (GR1110009) με τη προσθήκη συστημάτων παρακολούθησης στις 5 επιλεγμένες ανεμογεννήτριες. (Η εικόνα περιέχει εμπιστευτικά δεδομένα δεδομένα)



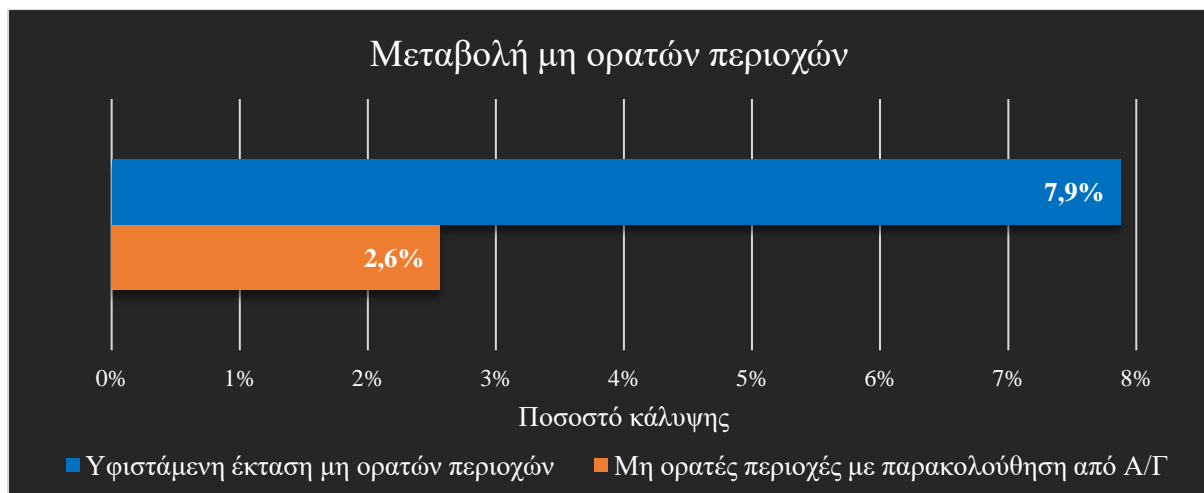
**Γράφημα 17:** Μεταβολή του ποσοστού των μη ορατών περιοχών με το εναλλακτικό σενάριο παρακολούθησης στην περιοχή Natura 2000, Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου.



Σημαντική αύξηση ορατότητας καταγράφηκε στην περιοχή **Natura 2000, Τρεις Βρύσες (GR1110003)**. Η τροποποιημένη ορατότητα σύμφωνα με το μοντέλο συνδυαστικής παρακολούθησης στην περιοχή παρουσιάζεται στην Εικόνα 86. Η μεταβολή της περιοχής παρακολούθησης, σε σχέση με την υφιστάμενη της Εικόνας 75, είναι εμφανής. Συγκεκριμένα, η υφιστάμενη έκταση των μη ορατών περιοχών είναι 7.833km<sup>2</sup> και αντιστοιχεί στο 7,9% της συνολικής έκτασης της περιοχής Natura 2000. Όπως φαίνεται στο Γράφημα 18, σύμφωνα με το μοντέλο εναλλακτικής παρακολούθησης, οι μη ορατές περιοχές είναι 2.551km<sup>2</sup>, που αντιστοιχούν στο 2,6% της συνολικής έκτασης των 99.472km<sup>2</sup> της περιοχής Natura 2000. Η παρακολούθηση εντός της περιοχής Natura διαμορφώνεται από τις 3 βορειότερες ανεμογεννήτριες, τύπου Vestas V80 και Enercone E76 της Εικόνας 83. Οι θέσεις των ανεμογεννητριών αυτών φαίνονται στην Εικόνα 86.

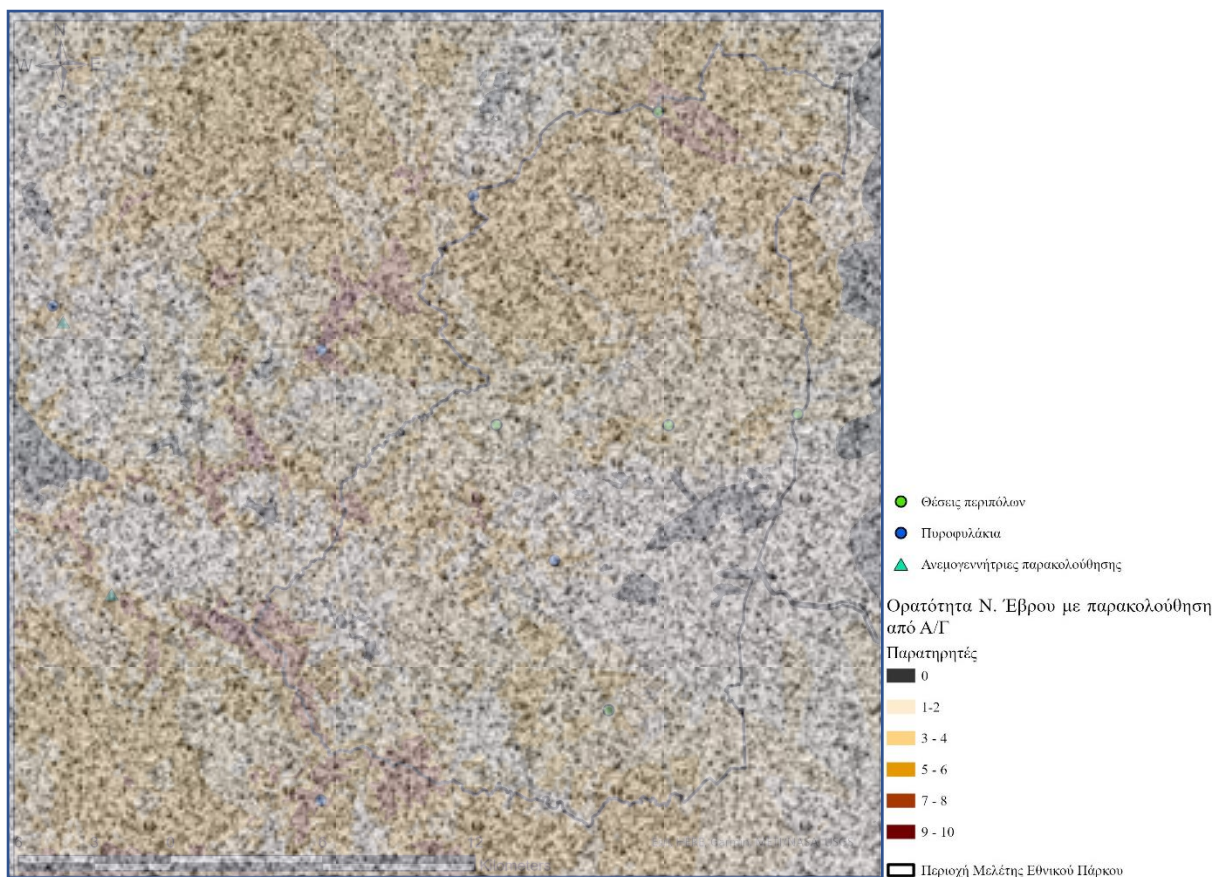


*Εικόνα 86: Ορατότητα στην περιοχή Natura 2000, Τρεις Βρύσες (GR1110003) με τη προσθήκη συστημάτων παρακολούθησης στις 5 επιλεγμένες ανεμογεννήτριες. . (Η εικόνα περιέχει εμπιστευτικά δεδομένα)*

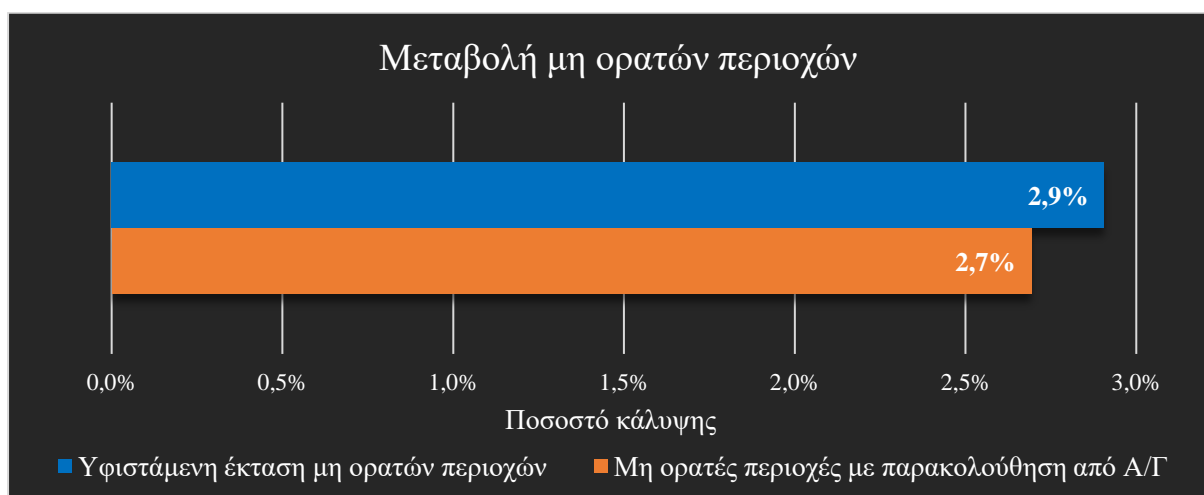


*Γράφημα 18: Μεταβολή του ποσοστού των μη ορατών περιοχών με το εναλλακτικό σενάριο παρακολούθησης στην περιοχή Natura 2000, Τρεις Βρύσες.*

Αντίθετα με τα αποτελέσματα των δυο προηγούμενων περιοχών, η χωροθέτηση των ανεμογεννητριών παρακολούθησης στο μοντέλο εναλλακτικής ορατότητας δεν μεταβάλλει σημαντικά την παρακολούθηση στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου. Συγκρίνοντας την υφιστάμενη παρακολούθηση της περιοχής που παρουσιάζεται στην Εικόνα 59 με τη νέα παρακολούθηση της Εικόνα 87, είναι εμφανές ότι η μεταβολή είναι πολύ μικρή. Συγκεκριμένα, η υφιστάμενη έκταση των μη ορατών περιοχών από 12.343km<sup>2</sup> μειώθηκε κατά 905km<sup>2</sup>, καλύπτοντας τελικά 11.438km<sup>2</sup>. Σύμφωνα με το Γράφημα 19, η υφιστάμενη έκταση των μη ορατών περιοχών, που αντιστοιχεί στο 2,9%, μειώνεται μόλις 0,2%. Η μικρή μεταβολή εντοπίζεται στις περιοχές που βρίσκονται στα νοτιοανατολικά του Εθνικού Πάρκου, ενώ αμετάβλητη παραμένει η μη ορατή περιοχή στα ανατολικά.



Εικόνα 87: Ορατότητα στο Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου με τη προσθήκη συστημάτων παρακολούθησης στις 5 επιλεγμένες ανεμογεννήτριες. . (Η εικόνα περιέχει εμπιστευτικά δεδομένα δεδομένα)



Γράφημα 19: Μεταβολή του ποσοστού των μη ορατών περιοχών με το εναλλακτικό σενάριο παρακολούθησης στην περιοχή του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου.



# 9. Συμπεράσματα





## 9 Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο 2 έγινε σαφές ότι στην περίπτωση που δεν επιτευχθεί σημαντική μείωση των αέριων ρύπων, αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά ο κίνδυνος εμφάνισης ακραίων φαινομένων. Ακραία φαινόμενα όπως οι καύσωνες, η παρατεταμένη ξηρασία και η μείωση των βροχοπτώσεων αυξάνουν τον κίνδυνο πυρκαγιάς, ανάλογα με τη γεωγραφική θέση κάθε περιοχής. Η Ελλάδα συμπεριλαμβάνεται στις περιοχές ιδιαίτερα αυξημένου κινδύνου πυρκαγιάς και **τις επόμενες δεκαετίες ο κίνδυνος αυτός θα αυξηθεί σημαντικά**, απειλώντας τα πολύτιμα εθνικά οικοσυστήματα, τις ανθρώπινες ζωές αλλά και τις υποδομές. Συνεπώς και προκειμένου να μειωθεί αυτός ο κίνδυνος, είναι επιτακτική ανάγκη η συστηματική μελέτη του κινδύνου πυρκαγιάς, των παραμέτρων που τον συνθέτουν καθώς και των προληπτικών μεθόδων μετριάσης του.

Τα Σ.Γ.Π. δίνουν τη δυνατότητα ανάλυσης του συνολικού ρίσκου πυρκαγιάς. Οι παράγοντες κινδύνου πυρκαγιάς (Πίνακας 2) και η τρωτότητα μιας περιοχής, που συνθέτουν το συνολικό κίνδυνο, εξαρτώνται από πολλούς και διαφορετικούς παράγοντες. Κάθε ένας από αυτούς τους παράγοντες αποτελεί αντικείμενο μελέτης διαφορετικών επιστημονικών κλάδων. **Τα Σ.Γ.Π προσφέρουν την ιδανική πλατφόρμα, ώστε όλες αυτές οι διαφορετικές επιστήμες να συνδυαστούν προκειμένου να μελετηθούν οι παράγοντες κινδύνου, ο κίνδυνος πυρκαγιάς καθώς και οι μέθοδοι μείωσής του.**

Στο Κεφάλαιο 5, οι παράγοντες που συνθέτουν τον κίνδυνο πυρκαγιάς και της τρωτότητα μιας γεωγραφικής περιοχής, μπορούν να απεικονιστούν και να αναλυθούν με ακριβή και σαφή τρόπο με τη βοήθεια των Σ.Γ.Π. Κάποιοι από αυτούς, όπως το υψόμετρο, μπορούν να απεικονιστούν άμεσα σε Σ.Γ.Π. με τη μορφή επιπέδων πληροφορίας. Οι περισσότεροι όμως από τους παράγοντες για να απεικονιστούν, χρειάζεται να πραγματοποιηθεί περαιτέρω ανάλυση των πρωτογενών δεδομένων. Τα περισσότερα Σ.Γ.Π. προσφέρουν δυνατότητες ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων ώστε να υπολογιστούν και να απεικονιστούν με εύκολο τρόπο οι παράγοντες της κλίσης του εδάφους, του προσανατολισμού του εδάφους, της απόστασης από τους δρόμους και της απόστασης από τους οικισμούς. Κάποιοι παράγοντες για να απεικονιστούν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μια πιο εξειδικευμένη ανάλυση. Ο δείκτης TWI που δείχνει τη συγκέντρωση του νερού σαν αποτέλεσμα της τοπογραφίας, υπολογίζεται από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Οι μαθηματικές πράξεις μέσα από τις οποίες υπολογίζεται ο TWI μπορούν να πραγματοποιηθούν στο περιβάλλον των Σ.Γ.Π., ενώ τα ενδιάμεσα επίπεδα πληροφορίας που παράγονται μπορούν να αξιοποιηθούν σε περαιτέρω αναλύσεις. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζει τόσο τον κίνδυνο όσο και την τρωτότητα μιας περιοχής είναι η κάλυψη της γης. Η απεικόνιση της κάλυψης απαιτεί την επεξεργασία και ανάλυση πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων. Τα Σ.Γ.Π. προσφέρουν μια πληθώρα εργαλείων με τα οποία μπορεί να επιτευχθεί η ανάλυση τέτοιων εικόνων. Το αποτέλεσμα κάθε εργαλείου επεξεργασίας παράγει μια διαφορετική απεικόνιση της κάλυψης γης που μπορεί να εξυπηρετήσει διαφορετικές ανάγκες. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, έγινε εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής εκμάθησης (SVM, UML) για να παραχθούν λεπτομερείς εικόνες κάλυψης γης και αλγεβρικών υπολογισμών των δορυφορικών εικόνων για την αποτύπωση μιας γενικότερης απεικόνισης της κάλυψης γης, μέσω του δείκτη βλάστησης NDVI. Οι δορυφορικές εικόνες μπορούν να αξιοποιηθούν και στην μελέτη άλλων δεικτών που σχετίζονται με το κίνδυνο πυρκαγιάς όπως ο NDWI και ο NDMI. Τέλος, τα Σ.Γ.Π. μπορούν να συμβάλουν στην εκτίμηση των κλιματικών παραμέτρων κινδύνου πυρκαγιάς μέσα από την επεξεργασία δεδομένων μετεωρολογικών σταθμών. Η ανάλυση των σημειακών μετρήσεων



μετεωρολογικών σταθμών με την εφαρμογή της Γεωστατιστικής μπορεί να αποτυπώσει πιθανολογικά τη μεταβολή των παραμέτρων σε μια γεωγραφική περιοχή με συνεχή τρόπο.

Στο Κεφάλαιο 7 οι παράγοντες κινδύνου που ανήκουν στη τοπογραφία, την ανθρώπινη δραστηριότητα και τη κάλυψη γης συνδυάστηκαν, με τη βοήθεια της μεθοδολογίας ΑΗΡ, σε περιβάλλον Σ.Γ.Π. για να αποτυπωθεί ο κίνδυνος πυρκαγιάς, σε μια από τις σημαντικότερες προστατευόμενες περιοχές της Ελλάδας, το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου. Παράλληλα, με την εφαρμογή του αλγορίθμου μηχανικής εκμάθησης SVM στο μοντέλο κινδύνου συμπεριλήφθηκαν οι αλλαγές στην κάλυψη γης έως το 2021. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό ενός χάρτη κινδύνου αναφοράς για το έτος 2021, χωρικής ανάλυσης 25x25m. **Τα αποτελέσματα του χάρτη κινδύνου ανέδειξαν 3 βασικές περιοχές που παρουσιάζουν πολύ υψηλό κίνδυνο πυρκαγιάς.** Η πρώτη σημαντική περιοχή κινδύνου εντοπίζεται στο βόρειο τμήμα, κοντά στον οικισμό Γιαννούλη. Η δεύτερη και πιο εκτενής περιοχή εντοπίζεται στο κέντρο του Εθνικού Πάρκου περιμετρικά της νοητής ευθείας που ενώνει τον οικισμό Κοτρωνία με τον οικισμό Λαγυνά. Η τρίτη και τελευταία περιοχή εντοπίζεται νότια και συγκεκριμένα στο βόρειο τμήμα του οικισμού Λευκίμμη. Γενικότερα, σύμφωνα με το μοντέλο κινδύνου, ο κίνδυνος πυρκαγιάς στη περιοχή του Εθνικού Πάρκου είναι υψηλός. Φυσικά, αυτό συμβαίνει σε περιόδους που οι μετεωρολογικοί παράγοντες συνθέτουν ένα γενικό πλαίσιο υψηλής επικινδυνότητας και ετοιμότητας στη περιοχή. **Κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων ο χάρτης κινδύνου αναφοράς μπορεί να διαβαθμίσει το κίνδυνο πυρκαγιάς στο Εθνικό Πάρκο με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.** Η αποτύπωση της λεπτομερούς διαβάθμισης κινδύνου μπορεί να αξιοποιηθεί από το Πυροσβεστικό Σώμα και τους φορείς διαχείρισης του Εθνικού Πάρκου για την καλύτερη πρόληψη πυρκαγιάς στη περιοχή. **Οι περιοχές πολύ υψηλού και υψηλού κινδύνου στο χάρτη αναφοράς υποδεικνύουν τις τοποθεσίες που χρειάζεται να εστιάσουν οι δράσεις πυροπροστασίας.**

Οι παράγοντες κινδύνου, εκτός της κάλυψης γης, με βάση τους οποίους εκτιμήθηκε ο κίνδυνος πυρκαγιάς παραμένουν αμετάβλητοι για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Το γεγονός αυτό επέτρεψε, το μοντέλο κινδύνου να αποτελέσει τη βάση για να μελετηθεί η επίδραση της αλλαγής της κάλυψης γης στο κίνδυνο πυρκαγιάς, από το έτος 2019 έως το έτος 2021. Στη χρονική περίοδο των δυο ετών καταγράφηκαν 2 σημαντικά γεγονότα που μετέβαλαν τη κάλυψη γης στη περιοχή. Το πρώτο ήταν η πυρκαγιά τον Οκτώβριο του 2020 και η δεύτερη τον Ιούλιο του 2021. Η λεπτομερής ανάλυση της μεταβολής κινδύνου στις πληγείσες περιοχές πριν και μετά τις πυρκαγιές (Ενότητα 7.4), ανέδειξε την ικανότητα του μοντέλου κινδύνου να ενσωματώνει τη μεταβολή στη κάλυψη γης και να τη μεταφράζει σε κίνδυνο πυρκαγιάς. Ο συνδυασμός της κάλυψης γης μέσω του αλγορίθμου SVM και των υπόλοιπων παραγόντων κινδύνου στο μοντέλο μπορεί να συμπεριλάβει τις μεταβολές στη κάλυψη γης με μεγάλη ακρίβεια (Παράρτημα Ι). **Με αυτό το τρόπο μπορεί ο κίνδυνος πυρκαγιάς για μια περιοχή να ανανεώνεται ετησίως και να ενσωματώνονται σε αυτόν οι μεταβολές στη κάλυψη γης.** Όλες οι πληροφορίες που χρειάζεται ο αλγόριθμος SVM εμπεριέχονται στις ελεύθερες και εύκολα προσβάσιμες πολυφασματικές εικόνες των δορυφόρων Sentinel-2. **Ο χάρτης κινδύνου του μοντέλου ενσωματώνοντας τις μεταβολές στην αλλαγή χρήσης γης, μπορεί να αξιοποιηθεί για την καλύτερη χωροθέτηση των μέσων πυροπροστασίας στη περιοχή μελέτης.** Είναι σημαντικό ότι οι μεταβολές αποτυπώνονται, χωρίς να απαιτούνται δεδομένα για τις εκτάσεις γης που έχουν μεταβληθεί ή έχουν πληγεί από πυρκαγιές.

Στο μοντέλο κινδύνου πυρκαγιάς της περιοχής του Εθνικού Πάρκου δεν συμπεριλήφθηκαν οι μετεωρολογικοί παράγοντες κινδύνου. Οι μετεωρολογικοί παράγοντες κινδύνου

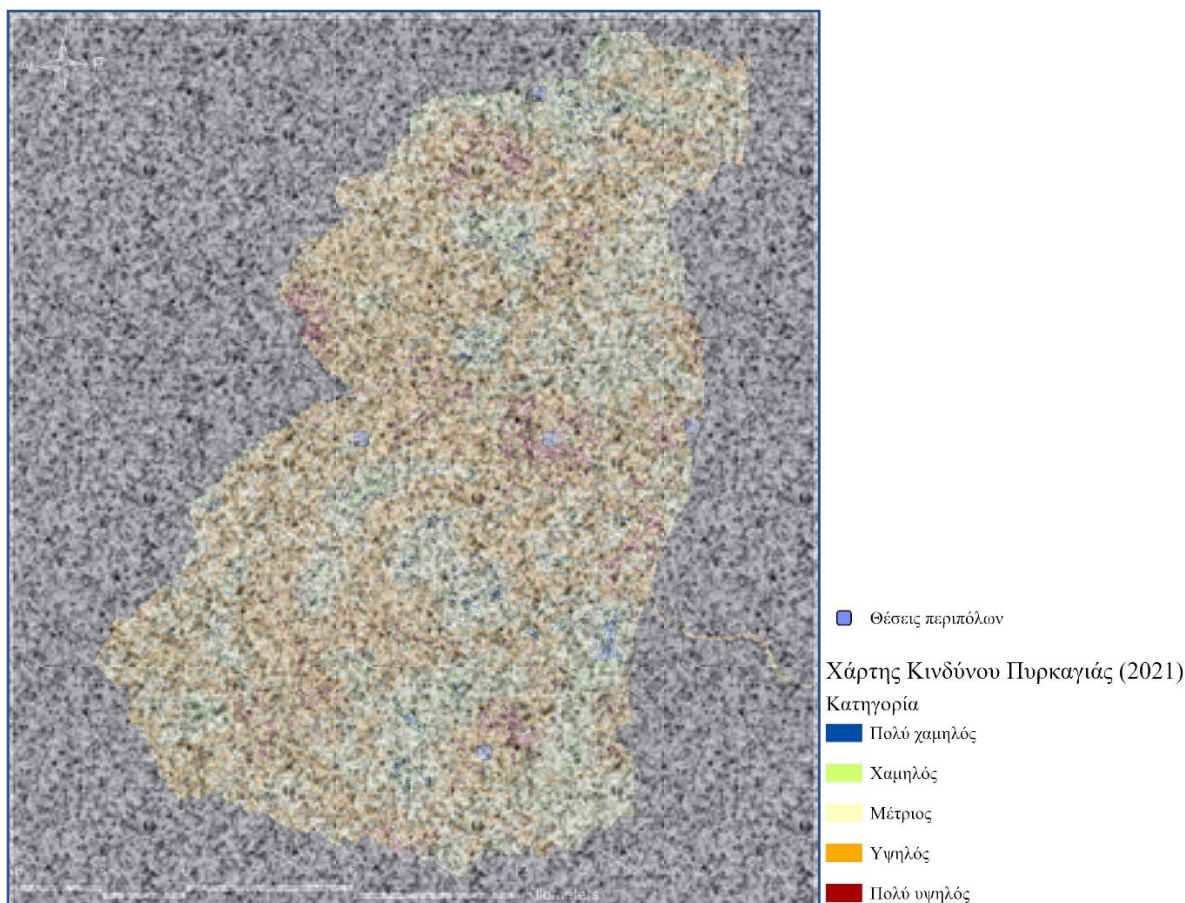
μεταβάλλονται δυναμικά, επομένως είναι εξαιρετικά δύσκολο να κατασκευαστούν χάρτες κινδύνου αναφοράς για διαφορετικά έτη, που να μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους. Το προτεινόμενο μοντέλο κινδύνου είναι αρκετά ευέλικτο και μπορεί να τροποποιηθεί με κατάλληλη αλλαγή των συντελεστών βάρους, ώστε να συμπεριλάβει μετεωρολογικούς παράγοντες κινδύνου σε μελλοντικές έρευνες. Το ίδιο ισχύει και σε περιπτώσεις που είναι δυνατή η πρόσβαση σε πιο εξειδικευμένα δεδομένα που σχετίζονται με περιοχές ανθρώπινης δραστηριότητας και υποδομών. Για παράδειγμα είναι εύκολο με μικρές τροποποιήσεις στους συντελεστές σχετικής βαρύτητας να ενσωματωθούν δεδομένα για το δίκτυο ηλεκτροδότησης και τις περιοχές συγκέντρωσης απορριμμάτων, που αποτελούν περιοχές κινδύνου πυρκαγιάς.

Στο κεφάλαιο 8, διερευνήθηκαν οι δυνατότητες παρακολούθησης του Πυροσβεστικού Σώματος από τα πυροφυλάκια και τις περιπόλους στο νομό Έβρου, με την εφαρμογή του μοντέλου ορατότητας (Ενότητα 8.1.1). Το υφιστάμενο δίκτυο των υποδομών παρακολούθησης, σε πλήρη λειτουργία, καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα του Νομού. **Συγκεκριμένα το 88% του Νομού παρακολουθείται από τουλάχιστον ένα παρατηρητή και το μεγαλύτερο μέρος των περιοχών αυτών περιέχουν δασικές εκτάσεις και Προστατευόμενες Περιοχές. Ιδιαίτερα στο το Εθνικό Πάρκο Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου η κάλυψη φτάνει το 97% της συνολικής έκτασης.** Παράλληλα, όπως φαίνεται στη Εικόνα 88, οι περίπολοι εντός του Εθνικού Πάρκου τοποθετούνται πολύ κοντά στις περιοχές πολύ υψηλού κινδύνου πυρκαγιάς, επιτρέποντας την άμεση επέμβαση σε περίπτωση που διαπιστωθεί εστία φωτιάς. Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι υφιστάμενες υποδομές παρακολούθησής καλύπτουν επαρκώς το μεγαλύτερο μέρος του Νομού και ιδιαίτερα τις ευαίσθητες περιοχές που εντάσσονται στο δίκτυο Natura 2000.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου (Ενότητα 8.1.2) δημιουργήθηκε ένα μοντέλο καταλληλότητας με το οποίο εντοπίστηκαν περιοχές που θα μπορούσαν να κατασκευαστούν νέα πυροφυλάκια. Οι περιοχές καταλληλότητας (Πίνακας 15) καλύπτουν μια εξαιρετικά μικρή περιοχή συγκριτικά με την έκταση του νομού Έβρου. Συγκεκριμένα, οι κατάλληλες περιοχές καλύπτουν το 14% και οι περιοχές εξαιρετικής καταλληλότητας μόλις το 1%. Επομένως, η δημιουργία ενός μοντέλου που μπορεί να τις αναγνωρίσει είναι εξαιρετικά σημαντικό. Στα πλαίσια του μοντέλου καταλληλότητας υπολογίστηκαν οι συντελεστές βαρύτητας για τους 4 παράγοντες, που συντελούν στην διαβάθμιση των περιοχών ανάλογα με τη καταλληλότητα τους. **Με βάση αυτούς τους συντελεστές, το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα και σε άλλες περιοχές μελέτης, ενώ τα δεδομένα που χρειάζονται είναι ελεύθερα και εύκολα προσβάσιμα από οποιονδήποτε φορέα.** Παράλληλα, σε περιπτώσεις που υπάρχουν περισσότεροι παράγοντες καταλληλότητας, όπως πληροφορίες για το είδος του εδάφους, μπορούν να ενταχθούν στο μοντέλο και να περιορίσουν ακόμα περισσότερο τις περιοχές καταλληλότητας. **Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου στο νομό Έβρου και μετά από αλληπάλληλες δοκιμές πιθανών θέσεων, εντοπίστηκαν 4 θέσεις που θα μπορούσαν να φιλοξενήσουν νέα πυροφυλάκια και όπως αποδείχτηκε θα βοηθούσαν σημαντικά στην διεύρυνση της παρακολούθησης των ευαίσθητων προστατευόμενων περιοχών του Νομού.** Για την επιλογή των θέσεων συνδυάστηκαν τα αποτελέσματα του μοντέλου ορατότητας από τις υφιστάμενες υποδομές παρακολούθησης του Πυροσβεστικού Σώματος, το καθεστώς προστασίας κάθε περιοχής, η κάλυψη γης και το μοντέλο κινδύνου πυρκαγιάς του Κεφαλαίου 7. Κάθε μια από τις 4 θέσεις βελτιώνει την ορατότητα σε συγκεκριμένες περιοχές που εντάσσονται σε κάποιο καθεστώς προστασίας. Οι 2 θέσεις Θ1 και Θ2 που βρίσκονται εντός του Εθνικού Πάρκου Δάσους Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου πρακτικά εκμηδενίζουν τις μη



ορατές περιοχές, βελτιώνοντας την ήδη πολύ καλή παρακολούθηση της περιοχής. Με τη κατασκευή πυροφυλάκιου ύψους τουλάχιστον 5m στη θέση Θ1 (Εικόνα 67) η παρακολουθούμενη περιοχή αυξάνεται από 97,1% σε 99,5%, ενώ αυξάνονται οι παρατηρητές που παρακολουθούν το νότιο τμήμα του Εθνικού Πάρκου. Δεδομένου ότι στο νότιο τμήμα του Εθνικού Πάρκου έχουν καταγραφεί οι σημαντικότερες πυρκαγιές τη τελευταία 20ετία, είναι σημαντικό να ενισχυθεί η παρακολούθηση της συγκεκριμένης περιοχής. Η κατασκευή πυροφυλάκιου στη Θέση Θ2 (Εικόνα 71) μεταβάλλει με παρόμοιο τρόπο την παρακολούθηση του Εθνικού Πάρκου. Η υφιστάμενη περιοχή παρακολούθησης που καλύπτει το 97,1% αυξάνεται σε 99,1%. Παράλληλα, η συγκεκριμένη κατασκευή αυξάνει τους παρατηρητές που παρακολουθούν το κεντρικό τμήμα του Εθνικού Πάρκου όπου εντοπίστηκε και το μεγαλύτερο μέρος των περιοχών πολύ υψηλού κινδύνου πυρκαγιάς στην Ενότητα 7.3.1. Οι υπόλοιπες 2 θέσεις βρίσκονται εντός των περιοχών του δικτύου Natura 2000, Τρεις Βρύσες (GR1110003) και Νότιο Δασικό Σύμπλεγμα Έβρου (GR1110009) αντίστοιχα. Η κατασκευή πυροφυλάκιου στη πρώτη θέση, που βρίσκεται στη περιοχή Τρεις Βρύσες, αυξάνει τη κάλυψη της ορατότητας από 92,1% σε 95,6%. Παρόμοια αύξηση καταγράφηκε από τη κατασκευή πυροφυλάκιου στη θέση εντός του Νότιου Δασικού Συμπλέγματος Έβρου, καθώς αυξάνει τη κάλυψη της ορατότητας από 86,7% σε 92,7%. **Το σημαντικότερο προτέρημα που καταγράφηκε με τη κατασκευή πυροφυλακίων στις 4 θέσεις, πέρα από την επέκταση της ορατότητας, είναι η αύξηση του αριθμού των παρατηρητών που παρακολουθούν τις προστατευόμενες περιοχές.** Με αυτό το τρόπο μειώνεται σημαντικά η πιθανότητα να διαφύγει κάποια εστία από τη παρακολούθηση κάποιου παρατηρητή. Παράλληλα, οι θέσεις αυτές πέρα από τη κατασκευή νέων πυροφυλακίων, θα μπορούσαν να διερευνηθούν σε περίπτωση που χρειαστεί να αντικατασταθεί κάποιο πυροφυλάκιο στο μέλλον. Επίσης, υποδομές που υφίστανται ή θα κατασκευαστούν στο μέλλον κοντά στις θέσεις αυτές θα μπορούσε να εξετασθούν, ώστε να διευρύνουν τη παρακολούθηση του Νομού.



*Εικόνα 88: Οι θέσεις των περιπόλων σε σχέση με το χάρτη κινδύνου αναφοράς του Εθνικού Πάρκου Δάσους Λαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου. . (Η εικόνα περιέχει εμπιστευτικά δεδομένα δεδομένα)*

Παράλληλα με το μοντέλο καταλληλότητας, στην Ενότητα 8.3, διερευνήθηκε ένα εναλλακτικό μοντέλο επέκτασης της περιοχής ορατότητας, με την τοποθέτηση συσκευών παρακολούθησης σε αιολικά πάρκα. Οι συσκευές θα μπορούσαν να τοποθετηθούν πάνω στις ανεμογεννήτριες ή εντός των ορίων των αιολικών πάρκων σε υπερυψωμένους πυλώνες και πέρα από τη διασφάλιση της λειτουργίας των ανεμογεννητριών δίνουν τη δυνατότητα παρακολούθησης των δασικών εκτάσεων. Η εφαρμογή αυτών των πρακτικών θα μπορούσε να λειτουργήσει ως αντισταθμιστικός παράγοντας για τη κατασκευή μελλοντικών αιολικών πάρκων εντός των προστατευόμενων περιοχών, εξυπηρετώντας τόσο τον επενδυτή όσο και τους φορείς προστασίας των περιοχών.

Τα επόμενα χρόνια αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά τόσο η χρονική περίοδος όσο και η ένταση των κυμάτων καύσωνα και ξηρασίας, με αποτέλεσμα την αύξηση του κινδύνου πυρκαγιάς σε πολλές περιοχές της Ελλάδας. Σε αυτό το πλαίσιο, όλο και περισσότεροι δημόσιοι και ιδιωτικοί φορείς ενδέχεται να χρειαστεί να εντοπίσουν και στη συνέχεια να διαχειριστούν το κίνδυνο πυρκαγιάς στη περιοχή ευθύνης τους. Με τη συγκεκριμένη μελέτη προτείνεται μια ευέλικτη ροή εργασιών που μπορεί σε μεγάλο βαθμό να καλύψει αυτές τις ανάγκες. Με βάση ελεύθερα, αξιόπιστα και εύκολα προσβάσιμα δεδομένα, δημιουργήθηκε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο μελέτης και διαχείρισης του κινδύνου πυρκαγιάς. Σε αυτό συμπεριλαμβάνονται αναλυτικές περιγραφές της επεξεργασίας των αρχικών δεδομένων και του συνδυασμού τους, ώστε να μπορεί το μοντέλο να επαναληφθεί και να εφαρμοστεί σε



διαφορετικές περιοχές. Παράλληλα, οι μεθοδολογίες υπολογισμού των συντελεστών βάρους μπορούν να τροποποιηθούν με κατάλληλο τρόπο, ώστε τα μοντέλα κινδύνου και καταλληλότητας να συμπεριλάβουν πιο εξειδικευμένους παράγοντες, ανάλογα με τις ανάγκες μελλοντικών μελετών. Είναι πλέον επιτακτική ανάγκη να συνεχίσει η εντατική μελέτη εντοπισμού και διαχείρισης του κινδύνου πυρκαγιάς. Η σοβαρότητα του θέματος επιτάσσει οι μελέτες να είναι προσβάσιμες σε όσο το δυνατόν περισσότερους ενδιαφερόμενους φορείς από ανοικτές βάσεις δεδομένων. **Τα Σ.Γ.Π. με τις δυνατότητες παρουσίασης και επεξεργασίας δεδομένων, αποτελούν το σημαντικότερο εργαλείο για τη δημιουργία ενός κοινού πλαισίου διαχείρισης και μελέτης του κινδύνου πυρκαγιάς στη Ελλάδα, που θα έχουν πρόσβαση όλοι οι ενδιαφερόμενοι φορείς**



# 10. Παραρτήματα

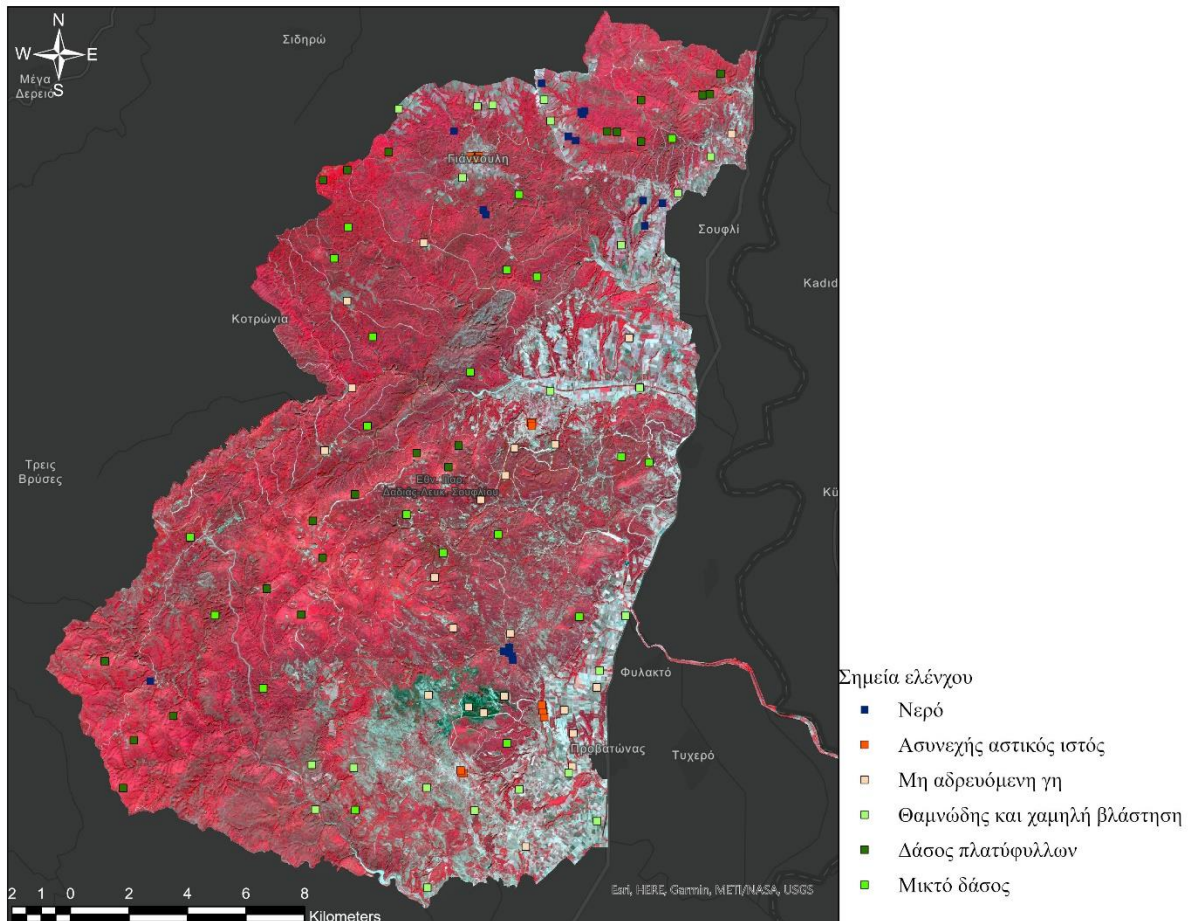




## Παράρτημα I

### Εκτίμηση ακρίβειας αποτελεσμάτων SVM

Για την εκτίμηση της ακρίβειας του μοντέλου της κάλυψης γης έγινε ανάλυση ακρίβειας με τον υπολογισμό του συντελεστή  $k$ . Αρχικά, επιλέχθηκαν 118 τυχαία σημεία ελέγχου από την εικόνα του συνδυασμού των φασματικών καναλιών B04, B03 και B08, πάνω στη οποία έγινε η κατηγοριοποίηση. Τα σημεία αυτά στη συνέχεια κατατάχθηκαν προσεκτικά σε μια από τις 6 κατηγορίες χρήσης γης όπως φαίνεται στην εικόνα. Η κατηγοριοποίηση αυτή έγινε εντελώς ανεξάρτητα από τα αποτελέσματα του αλγορίθμου μηχανικής εκμάθησης.



**Εικόνα:** Τα 118 τυχαία σημεία ελέγχου που επιλέχθηκαν από τη εικόνα του συνδυασμού των φασματικών καναλιών B04, B03 και B08 του δορυφόρου Sentinel-2.

Στη συνέχεια, τα σημεία μετατράπηκαν σε δεδομένα ψηφιδωτής μορφής (pixels) χωρικής ανάλυσης 10x10m ώστε να μπορούν να συγκριθούν με τα αποτελέσματα της εικόνας της κάλυψης γης σύμφωνα με τον αλγόριθμο SVM. Τα δύο επίπεδα δεδομένων ψηφιδωτής μορφής, των σημείων ελέγχου και της τελικής κάλυψης γης, συνδυάστηκαν ώστε να γίνει δυνατή η εξαγωγή του πίνακα σφαλμάτων (Πίνακας). Ο πίνακας αυτός ουσιαστικά δείχνει πόσα από τα τυχαία σημεία ελέγχου που επιλέχθηκαν συμπίπτουν με τα τελικά αποτελέσματα της χρήσης γης.



Μοντέλο SVM	Σ.Ε. Νερό	Σ.Ε. Αστικός ιστός	Σ.Ε. Μη αρδευόμενη γη	Σ.Ε. Χαμηλή βλάστηση	Σ.Ε. Δάσος πλατύφυλλων	Σ.Ε. Μικτό δάσος	sum
Νερό	16	0	0	0	0	0	16
Αστικός ιστός	0	15	0	0	0	0	15
Μη αρδευόμενη γη	0	0	22	11	0	0	33
Χαμηλή βλάστηση	2	0	0	10	0	0	12
Δάσος πλατύφυλλων	0	0	0	0	22	0	22
Μικτό δάσος	0	0	0	0	0	20	20
sum	18	15	22	21	22	20	118

*Πίνακας:* Πίνακας σφαλμάτων που δείχνει πόσα από τα τυχαία σημεία ελέγχου (Σ.Ε.) που επιλέχθηκαν συμπίπτουν με τα τελικά αποτελέσματα της χρήσης γης (Μοντέλο SVM).

Από το πίνακα σφαλμάτων μπορεί πλέον να υπολογιστεί ο συντελεστής  $k$  που δείχνει πόσο πιστή είναι η απεικόνιση της χρήσης γης από τον αλγόριθμο SVM. Ο συντελεστής  $k$  του Cohen είναι ένα στατιστικό μέγεθος που δείχνει τη συμφωνία ανάμεσα σε δυο ανεξάρτητους παρατηρητές. Η τιμή 1 σημαίνει ότι οι δυο παρατηρητές συμφωνούν απόλυτα ενώ η τιμή 0 ότι δεν υπάρχει καμία συσχέτιση ανάμεσα τους. Γενικά, θεωρείται ότι είναι από πιο αξιόπιστους τρόπους ελέγχου συμφωνίας και έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα σε μελέτες κατηγοριοποίησης εικόνων. Ο συντελεστής υπολογίζεται από τη σχέση

$$k = \frac{N \sum_{i=1}^n x_{ii} - \sum_{i=1}^n (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^n (x_{i+} * x_{+i})}$$

όπου

$N$  είναι το σύνολο των σημείων ( $N=118$ )

$n$  είναι ο αριθμός των διαφορετικών κατηγοριών ( $n=1,2,3,4,5,6$ )

$x_{ii}$  είναι τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα σφαλμάτων

$x_{i+}$  είναι το άθροισμα των σημείων ελέγχου που ανήκουν στη κατηγορία  $i$  (άθροισμα  $i$  στήλης του πίνακα σφαλμάτων)

$x_{+i}$  είναι το άθροισμα των σημείων του μοντέλου που ανήκουν στη κατηγορία  $i$  (άθροισμα  $i$  γραμμής του πίνακα σφαλμάτων)

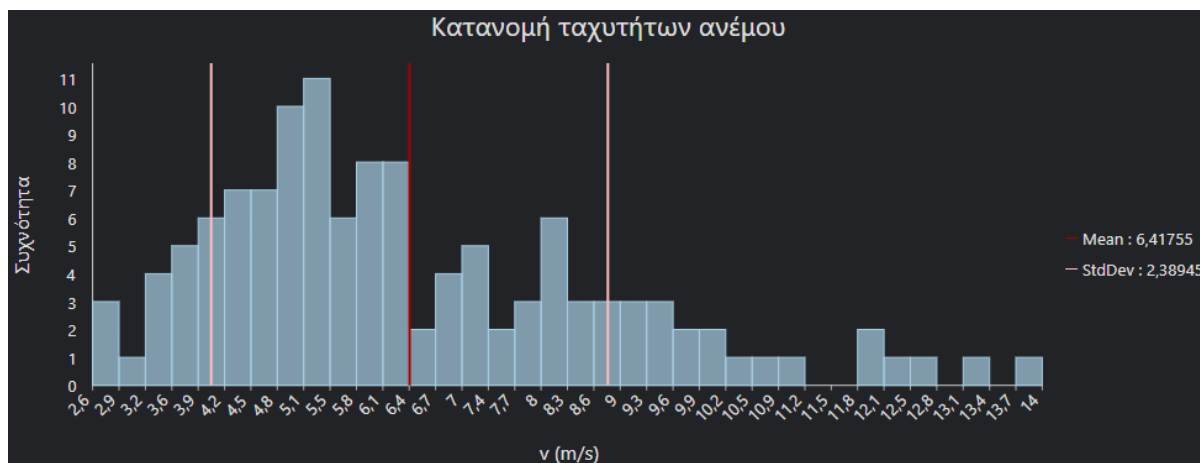
Για την περίπτωση του πίνακα 1 ο συντελεστής  $k$  έχει τη τιμή  $k=0.87$ , γεγονός που επιβεβαιώνει την ακρίβεια του χάρτη κάλυψης γης από τον αλγόριθμο SVM.

## Παράρτημα II

### Στατιστική ανάλυση δείγματος ανεμολογικών ιστών

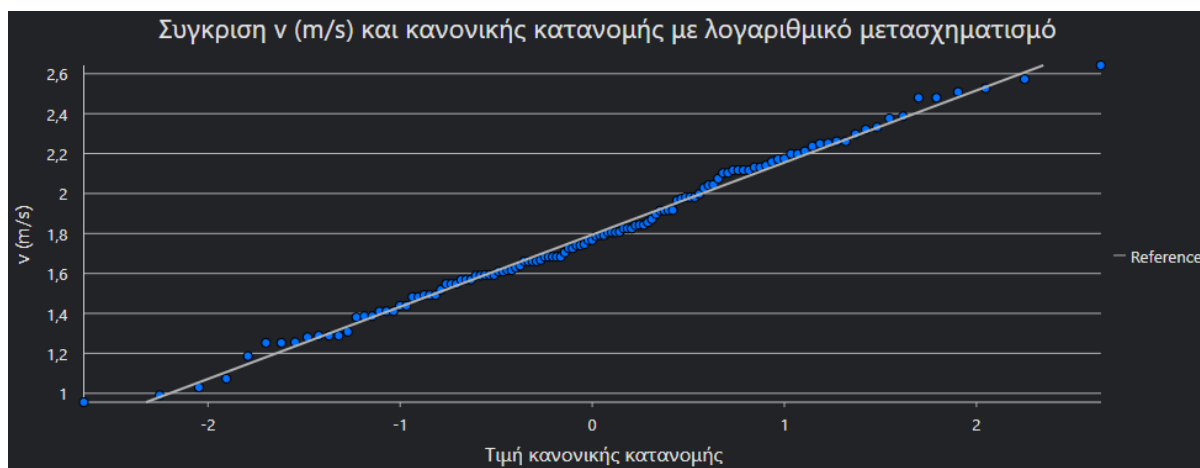
Στο δείγμα υπάρχουν χωρικά καθορισμένες μετρήσεις του ανέμου από 123 σταθμούς. Το ύψος των μετρήσεων έγινε σε αποστάσεις από 10 έως 45m και στη συνέχεια οι ταχύτητες του ανέμου ανάχθηκαν στα 30m.

Στο γράφημά 1 παρουσιάζεται η μέση τιμή του ανέμου σύμφωνα με το ιστόγραμμα από τα δεδομένα των ανεμολογικών ιστών, όπου αποτυπώνονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του δείγματος.



Γράφημα 1: Η μέση τιμή του ανέμου σύμφωνα με το ιστόγραμμα από τα δεδομένα των ανεμολογικών όπου αποτυπώνονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του δείγματος.

Η καλύτερη δυνατή προσαρμογή των δεδομένων στη κανονική κατανομή επιτυγχάνεται με λογαριθμικό μετασχηματισμό όπως φαίνεται στο γράφημα 2.

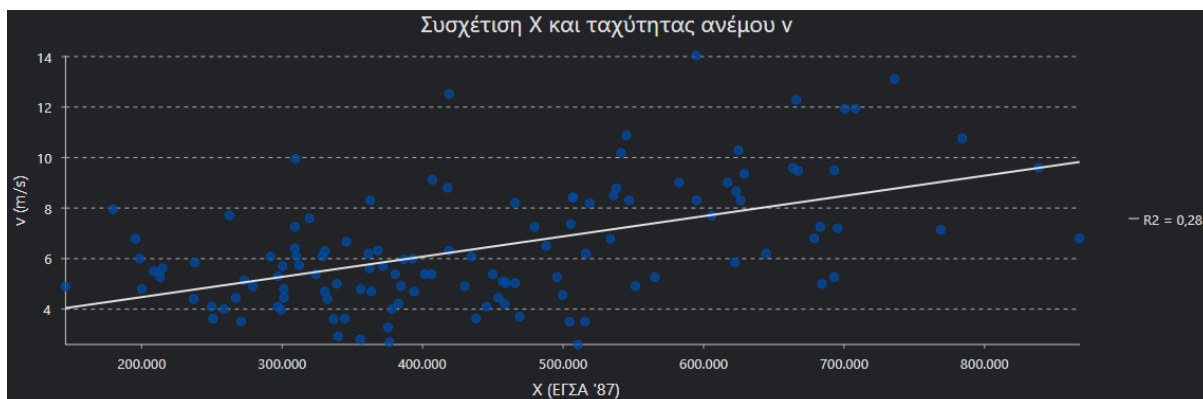


Γράφημα 2: Προσαρμογή των δεδομένων στη κανονική κατανομή με λογαριθμικό μετασχηματισμό (QQ Plot).

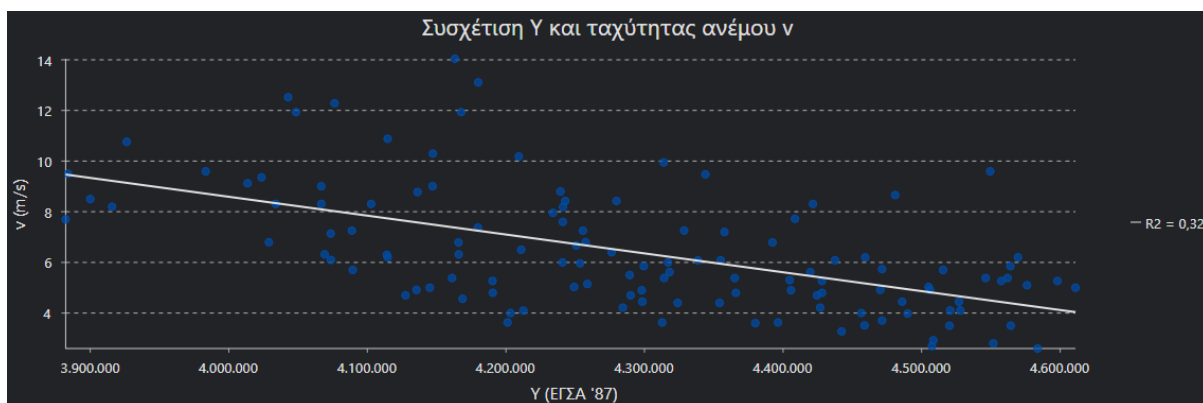
Στο δείγμα έγινε ανάλυση συσχέτισης της ταχύτητας ανέμου με τις διευθύνσεις x και y, όπως φαίνεται στα γραφήματα 3 και 4, για τον έλεγχο της στατικότητας. Από τη σύγκριση εμφανίστηκε μικρή συσχέτιση προς τις διευθύνσεις x και y, συγκεκριμένα η ταχύτητα του ανέμου εμφανίζει αύξηση καθώς αυξάνει η τιμή της συντεταγμένης x και μείωση καθώς



αυξάνει η τιμή της συντεταγμένης  $y$ . Η συσχέτιση αυτή είναι αναμενόμενη αφού οι ισχυροί άνεμοι στην Ελλάδα εμφανίζονται στην περιοχή του Αιγαίου. Τα αποτελέσματα λήφθηκαν υπόψη για την επιλογή της μεθόδου χωρικής παρεμβολής.



*Γράφημα 3:* Ανάλυση συσχέτισης της ταχύτητας ανέμου με τη διεύθυνση  $x$ . Όπως φαίνεται η ταχύτητα του ανέμου εμφανίζει μικρή αύξηση καθώς αυξάνει η τιμή της συντεταγμένης  $x$  με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0.28$ .



*Γράφημα 4:* Ανάλυση συσχέτισης της ταχύτητας ανέμου με τη διεύθυνση  $y$ . Όπως φαίνεται η ταχύτητα του ανέμου εμφανίζει μικρή μείωση καθώς αυξάνει η τιμή της συντεταγμένης  $y$ , με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0.32$ .

## Παράρτημα III

### Συνέπια μοντέλου κινδύνου πυρκαγιάς

Με δεδομένους τον πίνακα συγκρίσεων (Π) και τους συντελεστές βαρύτητας μπορεί να υπολογιστεί η προσεγγιστική ιδιοτιμή  $\lambda_{\max}$  σύμφωνα με τη σχέση

$$\Pi\psi = \lambda_{\max}\psi$$

Όπου  $\psi$  είναι το διάνυσμα με συνιστώσες τους συντελεστές βαρύτητας,  $\psi = \psi(w_1, w_2, \dots, w_7)$ . Σε αναλυτική μορφή η πιο πάνω σχέση γράφεται

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 2 \\ 0,33 & 1 & 3 & 2 & 0,5 & 0,33 & 0,33 \\ 0,33 & 0,33 & 1 & 0,5 & 0,25 & 0,5 & 0,33 \\ 0,33 & 0,5 & 2 & 1 & 0,5 & 0,33 & 0,33 \\ 0,33 & 2 & 4 & 2 & 1 & 0,33 & 0,33 \\ 0,5 & 3 & 3 & 3 & 3 & 1 & 3 \\ 0,5 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,27 \\ 0,09 \\ 0,05 \\ 0,07 \\ 0,12 \\ 0,23 \\ 0,17 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_{\max} * 0,27 \\ \lambda_{\max} * 0,09 \\ \lambda_{\max} * 0,05 \\ \lambda_{\max} * 0,07 \\ \lambda_{\max} * 0,12 \\ \lambda_{\max} * 0,23 \\ \lambda_{\max} * 0,17 \end{pmatrix}$$

Για κάθε μια από τις 7 εξισώσεις που προκύπτουν, σύμφωνα με το πολλαπλασιασμό των πινάκων υπολογίστηκε η τιμή του  $\lambda_{\max,i}$ ,  $i=1,2,3,4,5,6,7$ .

$$\lambda_{\max,i} = \frac{\sum_{j=1}^7 \Pi_{ij} * w_j}{w_i}$$

Για παράδειγμα

$$\lambda_{\max,1} = \frac{1 * 0,27 + 3 * 0,09 + 3 * 0,5 + 3 * 0,7 + 3 * 0,12 + 2 * 0,23 + 2 * 0,17}{0,27} = 7,699$$

Το  $\lambda_{\max}$  εκτιμήθηκε από τη μέση τιμή των  $\lambda_{\max,i}$ , δηλαδή

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^7 \lambda_{\max,i}}{7} = 7,526$$

Ο δείκτης συνέπιας του μοντέλου σύμφωνα με τη μεθοδολογία της AHP δίνεται από τη σχέση

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - 7}{7 - 1} = 0,088$$

Στη συνέχεια ο τελικός δείκτης αναλογίας συνέπιας (CR) υπολογίζεται με τη βοήθεια του δείκτη αναλογίας (RI) ο οποίος δίνεται από τη βιβλιογραφία, σύμφωνα με το πιο κάτω πίνακα και η τιμή του RI εξαρτάται από τον αριθμό των παραγόντων του μοντέλου.



<b>N</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

Τελικά, ο δείκτης αναλογίας συνέπειας του μοντέλου κινδύνου είναι

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,088}{1,32} = 0,07$$

## Βιβλιογραφία

1. UN Office for Disaster Risk Reduction, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, *Human cost of disasters: An overview of 20 years 2000-2019*.
2. Easterling, D., G. Meehl, C. Parmesan, S. Changnon, T. Karl, and L. Mearns, 2000, *Climate extremes, observations, modeling and impacts*. Science, 289,
3. Jentsch, A., J. Kreyling, and C. Beierkuhnlein, 2007, *A new generation of climate change experiments: events not trends*. Frontiers in Ecology and the Environment.
4. Rich, P.M., D.D. Breshears, and A.B. White, 2008, *Phenology of mixed woody-herbaceous ecosystems*. Ecology.
5. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2012, *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*.
6. European commission, 2021, *Overview of natural and man-made disaster risks the European Union may face*
7. Hegerl, G.C., F.W. Zwiers, P. Braconnot, N.P. Gillett, Y. Luo, J.A. Marengo Orsini, N. Nicholls, J.E. Penner, and P.A. Stott, 2007, *Understanding and attributing climate Change, Climate Change 2007, The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC.
8. Bulletin of the American Meteorological Society, *Explaining Extreme Events from a Climate Perspective*, <https://www.ametsoc.org/ams/index.cfm/publications/bulletin-of-the-american-meteorological-society-bams/explaining-extreme-events-from-a-climate-perspective/>
9. Gerald A. Meehl, Thomas Karl, David R. Easterling, Stanley Changnon, Roger Pielke Jr., David Changnon, Jenni Evans, Pavel Ya. Groisman, Thomas R. Knutson, Kenneth E. Kunkel, Linda O. Mearns, Camille Parmesan Roger Pulwarty, Terry Root, Richard T. Sylves, Peter Whetton, Francis Zwiers, 2000, *An introduction to trends in extreme weather and climate events: observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections*, B Am Meteorol Soc 81.
10. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013, *Climate Change 2013 The Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report*.
11. David Eckstein, Vera Kunzel, Laura Schafer, 2021, *Global Climate Risk Index 2021*, Germanwatch.
12. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013, *Climate Change 2013 The Physical Science Basis*.
13. Jesus San Miguel, Emillo Chuvieco, John Handmer, Andy Moffat, Cristina Montiel-Molina, Leif Sandahl, Domingos Viegas, *Understanding Disaster Risks: Hazard Related Risk Issues*.
14. Ganteaume, A., Camia, A., Jappiot, M., 2013. *A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe*, Environmental Management.
15. Emilio Chuvieco, Susana Martínez, María Victoria Román, Stijn Hantson, M. Lucrecia Pettinari, 2013, *Integration of ecological and socio-economic factors to assess global vulnerability to wildfire*, Global Ecology and Biogeography.
16. JRC European Commission, 2018, *Basic criteria to assess wildfire risk at the pan-European level*.
17. US Department of Agriculture & Georgia Forestry Commission, *Fire Management Study Unit*



18. Martin Kopecký, Martin Macek, Jan Wild, 2020, *Topographic Wetness Index calculation guidelines based on measured soil moisture and plant species composition*, Science of the Total Environment 75
19. Ισαάκ Παρχαρίδης, 2015, *Αρχές δορυφορικής Τηλεπισκόπησης Θεωρία και εφαρμογές*
20. Muhammad Jaleed Khan, Hamid Saeed Khan, Adeel Yousaf, Khurram Khurshid, Asad Abbas, 2018, *Modern Trends in Hyperspectral Image Analysis: A Review*, IEEE Access, vol. 6, pp. 14118-14129.
21. Αικατερίνη Γ. Ψύχα, Μιχαήλ Π. Μηνογιάννη, 2016, *Ναυτική Μετεωρολογία*
22. Κωνσταντίνος Καρτάλης, Χάρης Κοκκώσης, Δημήτρης Οικονόμου, Μάνθος Σανταμούρης, Ηλίας Αγαθαγγελίδης, Αναστάσιος Πολύδωρος, 2017, *Οι Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στην Ανάπτυξη*, Διανέοσης
23. Jinru Xue, Baofeng Su, 2017, Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications
24. Joint Research Center (JRC)-European Forest Fire Information System (EFFIS), *Fire Danger Forecast- FWI*, <https://effis.jrc.ec.europa.eu/about-effis/technical-background/fire-danger-forecast>.
25. European Forest Fire Information System (EFFIS) - European Fuel Map, 2017, based on JRC Contract Number 384347 on the “Development of a European Fuel Map”, European Commission.
26. S. K. Jenson, O. Domingue, 1988, *Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 54, No. 11, pp. 1593-1600.
27. Clayton Ballerine, 2017, *Topographic Wetness Index Urban Flooding Awareness Act Action Support Will and DuPage Counties, Illinois*.
28. USGS, *Normalized Difference Moisture Index*, <https://www.usgs.gov/landsat-missions/normalized-difference-moisture-index>
29. Bo-cai Gao, 1996, *NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space*, Remote Sensing of Environment, Volume 58, Issue 3, Pages 257-266.
30. Stuart K. McFeeters, 2013, *Using the Normalized Difference Water Index (NDWI) within a Geographic Information System to Detect Swimming Pools for Mosquito Abatement: A Practical Approach*, Remote Sensing 5(7):3544-3561
31. Li Zhao, Marta Yebra, Albert I.J.M. van Dijk, Geoffrey J. Cary, Stuart Matthews, Gary Sheridan, Schroederand, 2021, *The influence of soil moisture on surface and sub-surface litter fuel moisture simulation at five Australian sites*, Agricultural and Forest Meteorology.
32. Nyuk Hien Wong, Chun Liang Tan, Andrita Dyah Shinta Nindyani, Steve Kardinal Jusuf, *Influence of Water Bodies on Outdoor Air Temperature in Hot and Humid Climate*.
33. David M. J. S. Bowman, Grant J. Williamson, 2021, *River Flows Are a Reliable Index of Forest Fire Risk in the Temperate Tasmanian Wilderness World Heritage Area, Australia*.
34. Κων/νος Καρτάλης Χάρης Κοκκώσης, Κων/νος Φιλιππόπουλος, Αναστάσιος Πολύδωρος, Καλλιρόη Λάππα, Θάλεια Μαυράκου, 2021, *Ενσωματώνοντας την κλιματική αλλαγή στον μετασχηματισμό του αναπτυξιακού μοντέλου της Ελλάδας*, διανέοσης.



35. ESRI, How Aspect works, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-aspect-works.htm>
36. Χρήστος Χαλκιάς, *Γεωγραφική Ανάλυση με την αξιοποίηση της Γεωπληροφορικής, Εφαρμοσμένα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών*, 2015.
37. Michele Coti Zelati, Aimin Huang, Igor Kukavica, Roger Temam, Mohammed Ziane, 2014, *The primitive equations of the atmosphere in presence of vapour saturation*, *Nonlinearity* 28, 625–668.
38. Νεκτάριος Βλαχάκης, 2017, *Δυναμική των Ρευστών*, ΕΚΠΑ
39. Roland Stull, 2017, *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science*.
40. Emergency Response Coordination Centre (ERCC), *ECHO Daily Map of 06 August 2021*
41. ΠΑΕ, *Γεωπληροφοριακός χάρτης*, <https://geo.rae.gr/?lon=21.93516190242262&lat=39.20695307021666&zoom=6>
42. Burrough, P.A., R.A. McDonnell, 1998, *Principles of Geographical Information Systems*, New York: Oxford University Press.
43. Andras Bardossy, *Introduction to Geostatistics*, Institute of Hydraulic Engineering University of Stuttgart.
44. Δημήτριος Α. Βαΐοπουλος, Γεώργιος Α. Σκιάνης, 2007, *Εγχειρίδιο Στατιστική-Γεωστατιστικής*.
45. Δ. Κίτσιου, *Γεωπληροφορική με εφαρμογές στο παράκτιο και θαλάσσιο περιβάλλον*
46. Stefan Emeis, 2007, *Comparison of logarithmic wind profiles and power law wind profiles and their applicability for offshore wind profiles*.
47. A. Dewi Hartkamp, Kirsten De Beurs, Alfred Stein, Jeffrey W. White, *Interpolation Techniques for Climate Variables*, Geographic Information Systems Series 99-01
48. Tomlin, C. Dana, 1990, *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. Englewoods Cliffs, Prentice-Hall, 249 p.
49. Geoff Coyle, 2004, *The Analytic Hierarchy Process (AHP)*
50. Απόφαση 49828/2008,- ΦΕΚ 2464/Β/3-12-2008
51. Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων-Υγροτόπων, [https://www.ekby.gr/ekby/el/EKBY\\_PP\\_el.html](https://www.ekby.gr/ekby/el/EKBY_PP_el.html)
52. Vandana Singh, Vandana Bhattacharjee, C. Jeganathan, Nidhi Bhattacharjee, 2020, *Land Cover Classification using Machine Learning Techniques- A Survey*, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 9 Issue 06
53. United States Department of Agriculture, *Band Combinations Cheat Sheet*
54. Alex Smola, S.V.N. Vishwanathan, 2008, *Introduction to Machine Learning*, Cambridge University Press
55. Φορέας Διαχείρισης Εθνικού Πάρκου του Δάσους της Δαδιάς-Λευκίμης-Σουφλίου, <https://dadia-np.gr/>
56. Brian Tomaszewski, 2015, *Geographic Information Systems (GIS) for Disaster Management*
57. Pengcheng Zha, Fuquan Zhang, Haifeng Lin, Shuwen Xu, 2021, *GIS-Based Forest Fire Risk Model: A Case Study in Laoshan National Forest Park, Nanjing, remote sensing* 13, 3704
58. Ινστιτούτου Πληροφοριακών Συστημάτων, <http://geodata.gov.gr/>



59. Yves Birot, 2009, *Η Ζωή Μας με τις Διασικές Πυρκαγιές: Η Αποψη της Επιστήμης*, European Forest Institute Discussion Paper 15
60. Daniel G. Neary, Jackson M. Leonard, 2019, *Physical Vulnerabilities from Wildfires: Flames, Floods, and Debris Flows*
61. R. W. Saaty, 1987, *The Analytic Hierarchy Process – What It Is and How It Is Used*
62. Geoff Coyle, *The Analytic Hierarchy Process (AHP)*.
63. Ruth Dittrich, Stuart McCallum, 2020, *How to measure the economic health cost of wildfire – A systematic review of the literature for northern America*, International Journal of Wildland Fire, 29, 961–973.
64. Nezhad, M.M.; Heydari, A.; Fusilli, L.; Laneve, G., 2019, *Land Cover Classification by Using Sentinel-2 Images: A Case Study in the City of Rome*.
65. Shi, D.; Yang, X., 2015, *Support Vector Machines for Land Cover Mapping from Remote Sensor Imagery*. In *Monitoring and Modeling of Global Changes: A Geomatics Perspective*, Springer Netherlands: Dordrecht, pp. 265–279 ISBN 978-94-017-9812-9.
66. Cavour, M.; Duzgun, H.S.; Kemec, S.; Demirkan, 2019, *D.C. Land use and land cover classification of Sentinel 2-A: St. Petersburg case study*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci, XLII-1/W2, 13–16, doi:10.5194/isprs-archives-XLII-1-W2-13-2019.
67. Shima, L.J.; Anderson, R.R.; Carter, V.P., 1976, *The Use of Aerial Color Infrared Photography in Mapping the Vegetation of a Freshwater Marsh*. Chesapeake Science 1976, 17, 74, doi:10.2307/1351049.
68. Drabek, T.E.; Hoetmer, G.J.; 1991, *International City Management Association Emergency Management: Principles and Practice for Local Government*; International City Management Association: Washington, D.C., ISBN 978-0-87326-082-4.
69. Tomaszewski, B. *Geographic Information Systems (GIS) for Disaster Management*, 2015, CRC Press, p.p. 111
70. Zhao, P.; Zhang, F.; Lin, H.; Xu, S., 2021, *GIS-Based Forest Fire Risk Model: A Case Study in Laoshan National Forest Park, Nanjing*. Remote Sensing, 13, 3704, doi:10.3390/rs13183704.
71. Tomar, J.S.; Kranjčić, N.; Đurin, B.; Kanga, S.; Singh, S.K., 2021, *Forest Fire Hazards Vulnerability and Risk Assessment in Sirmaur District Forest of Himachal Pradesh (India): A Geospatial Approach*. IJGI, 10, 447, doi:10.3390/ijgi10070447.
72. Parajuli, A.; Gautam, A.P.; Sharma, S.P.; Bhujel, K.B.; Sharma, G.; Thapa, P.B.; Bist, B.S.; Poudel, S., 2020, *Forest Fire Risk Mapping Using GIS and Remote Sensing in Two Major Landscapes of Nepal*. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 11, 2569–2586, doi:10.1080/19475705.2020.1853251.
73. Nuthammachot, N.; Stratoulas, D., 2021, *Multi-Criteria Decision Analysis for Forest Fire Risk Assessment by Coupling AHP and GIS: Method and Case Study*. Environ Dev Sustain, 23, 17443–17458, doi:10.1007/s10668-021-01394-0.
74. Gai, C.; Weng, W.; Yuan, H., 2011, *GIS-Based Forest Fire Risk Assessment and Mapping*. In *Proceedings of the 2011 Fourth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*; IEEE: Kunming and Lijiang City, China; pp. 1240–1244.

75. Ajin, R.S.; Ciobotaru, A.-M.; Vinod, P.G.; Jacob, M.K., 2015, *Forest and Wildland Fire Risk Assessment Using Geospatial Techniques: A Case Study of Nemmara Forest Division, Kerala, India.*, 9.
76. Adaktylou, N.; Stratoulas, D.; Landenberger, R., 2020, *Wildfire Risk Assessment Based on Geospatial Open Data: Application on Chios, Greece.*, 9, 516, doi:10.3390/ijgi9090516.
77. Rahman, M.; Chen, N.; Islam, M.M.; Dewan, A.; Pourghasemi, H.R.; Washakh, R.M.A.; Nepal, N.; Tian, S.; Faiz, H.; Alam, M.; et al., 2021, *Location-Allocation Modeling for Emergency Evacuation Planning with GIS and Remote Sensing: A Case Study of Northeast Bangladesh.* Geoscience Frontiers, 12, 101095, doi: 10.1016/j.gsf.2020.09.022.
78. Kar, B.; Hodgson, M., 2008, *A GIS-Based Model to Determine Site Suitability of Emergency Evacuation Shelters.* T. GIS, 12, 227–248, doi:10.1111/j.1467-9671.2008.01097.x.
79. Li, D.; Cova, T.J.; Dennison, P.E., 2019, *Setting Wildfire Evacuation Triggers by Coupling Fire and Traffic Simulation Models: A Spatiotemporal GIS Approach.* Fire Technol 2019, 55, 617–642, doi:10.1007/s10694-018-0771-6.
80. Tang, F.; Ren, 2012, A. *GIS-Based 3D Evacuation Simulation for Indoor Fire.* Building and Environment, 49, 193–202, doi:10.1016/j.buildenv.2011.09.021.
81. Επιχειρησιακά εργαλεία στο Ενιαίο Συντονιστικό Κέντρο Επιχειρήσεων του Πυροσβεστικού Σώματος, Available online:([https://edcm.edu.gr/images/news/hdrrf/presentations2020/232-Ntassiou\\_HDRRF2020\\_ESKE-tools.pdf](https://edcm.edu.gr/images/news/hdrrf/presentations2020/232-Ntassiou_HDRRF2020_ESKE-tools.pdf))
82. Cova, T., 1999, *GIS in Emergency Management.* In *Geographical Information Systems*; pp. 845–858.
83. Difani C, Dolton L, 1992, *Battling the Oakland fire with GIS.* GIS World 5, 1, 43–5.
84. Chen, F.; Weber, K.T.; Schnase, J.L., 2012, *Assessing the Success of Postfire Reseeding in Semiarid Rangelands Using Terra MODIS.* Rangeland Ecology & Management, 65, 468–474, doi:10.2111/REM-D-11-00156.1.
85. Rwanga, S.S.; Ndambuki, J.M., 2017, *Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Using Remote Sensing and GIS*, 08, 611–622, doi:10.4236/ijg.2017.84033.
86. Schindler, S.; Poirazidis, K.; Wrba, T., 2008, *Towards a Core Set of Landscape Metrics for Biodiversity Assessments: A Case Study from Dadia National Park, Greece.* Ecological Indicators, 8, 502–514, doi:10.1016/j.ecolind.2007.06.001.
87. Αρχείο Γενικής Γραμματείας Πολιτικής Προστασίας - 2021 - Χάρτης Πρόβλεψης Κινδύνου Πυρκαγιάς Available online: [https://www.civilprotection.gr/el/archive/daily\\_map/2021](https://www.civilprotection.gr/el/archive/daily_map/2021) (accessed on 30 January 2022).
88. The Dadia-Lefkimi-Soufli Forest National Park, Press Release, 07 October 2020 Available online: <https://dadia-np.gr/?p=6370> (accessed on 22 January 2022).
89. The Dadia-Lefkimi-Soufli Forest National Park, Press Release, 14 July 2021 Available online: <https://dadia-np.gr/?p=6538> (accessed on 22 January 2022).
90. Xanthopoulos, G.; Calfapietra, C.; Fernandes, P., 2012, *Fire Hazard and Flammability of European Forest Types.* In *Post-Fire Management and Restoration of Southern European Forests*; Moreira, F., Arianoutsou, M., Corona, P., De las Heras, J., Eds.;



- Managing Forest Ecosystems; Springer Netherlands: Dordrecht, Vol. 24, pp. 79–92 ISBN 978-94-007-2207-1.
91. Romero-Calcerrada, R.; Novillo, C.J.; Millington, J.D.A.; Gomez-Jimenez, I., 2008, *GIS Analysis of Spatial Patterns of Human-Caused Wildfire Ignition Risk in the SW of Madrid (Central Spain)*. *Landscape Ecol*, 23, 341–354, doi:10.1007/s10980-008-9190-2.
  92. The Dadia-Lefkimi-Soufli Forest National Park, Press Release, 07 October 2020 Available online: <https://dadia-np.gr/?p=6370> (accessed on 22 January 2022).
  93. NASA-FIRMS Available online: <https://localhost.modaps.eosdis.nasa.gov/map/> (accessed on 16 January 2022).
  94. The Dadia-Lefkimi-Soufli Forest National Park, Press Release, 14 July 2021 Available online: <https://dadia-np.gr/?p=6538> (accessed on 22 January 2022).
  95. Ogfuz Çoban, H.; Bereket, H., 2020, *Visibility Analysis of Fire Lookout Towers Protecting the Mediterranean Forest Ecosystems in Turkey*. *Şumar. list (Online)*, 144, 407–407, doi:10.31298/sl.144.7-8.5.
  96. Akay, A.E.; Erdoğan, A. Assessment of Fire Watch Towers by Using Visibility Analysis: The Case Of. 2017, 7.
  97. Akay, A.E.; Wing, M.; Büyüksakalli, H.; Malkoçoğlu, S. Evaluation of Fire Lookout Towers Using GIS-Based Spatial Visibility and Suitability Analyzes. *Şumar. list (Online)* 2020, 144, 279–288, doi:10.31298/sl.144.5-6.5.
  98. Antonakos, A.; Lambrakis N., 2021, *Spatial Interpolation for the Distribution of Groundwater Level in an Area of Complex Geology Using Widely Available GIS Tools*. *Environ. Process.*, 8, 993–1026, doi:10.1007/s40710-021-00529-9.
  99. Pal, M.; 2005, *Random Forest Classifier for Remote Sensing Classification*. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 217–222, doi:10.1080/01431160412331269698.
  100. Oikoskopio Available online: <http://www.oikoskopio.gr/map/> (accessed on 21 February 2022).
  101. Δ/νσης Δασών Ν. Καβάλας, “Οριστική Μελέτη Κατασκευής Ενός Πυροφυλακίου Στην Θέση “Ακροβούνι” - Δασαρχείο Καβάλας”, Α.Π. 24549/7-12-2018 Available online: [http://www.damt.gov.gr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1366:948&catid=2:diagon&Itemid=73](http://www.damt.gov.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=1366:948&catid=2:diagon&Itemid=73) .
  102. Δ/νση Προστασίας Δασών Τμήμα Δασοπροστασίας & Αγροτικής Ασφάλειας, “Επικαιροποίηση των Τεχνικών Προδιαγραφών κατάρτισης μελετών Σχεδίων Αντιπυρικής Προστασίας και καθορισμός του τρόπου υπολογισμού του κόστους σύνταξης αυτών”, Α. Π.: ΥΠΕΝ/ΔΠΔ/61247/2789/26-06-2020.
  103. Cattin, R.; Kunz, S.; Heimo, A.; Russi, G.; Russi, M.; Tiefgraber, M.; 2006, *Alpine Test Site GÜTSCH: Monitoring of a wind turbine under icing conditions*. 5.
  104. McClure, C.J.W.; Martinson, L.; Allison, T.D.; 2018, *Automated Monitoring for Birds in Flight: Proof of Concept with Eagles at a Wind Power Facility*. *Biological Conservation*, 224, 26–33, doi:10.1016/j.biocon.2018.04.041.
  105. SLSTR Instrument – Sentinel-3 SLSTR Technical Guide – Sentinel Online - Sentinel Online Available online: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-3-slstr/instrument> (accessed on 20 March 2022).