



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΙΜΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Χώρο-χρονική Ανάλυση Σημείων Έναρξης Δασικών Πυρκαγιών με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών.

Για την χρονική περίοδο 2020-2024

Spatio-temporal analysis of wildfires ignitions using Geographic
Information Systems

ΔΟΓΑΝΗ ΙΩ-ΔΕΣΠΟΙΝΑ
ΜΚΚ 2202
2025

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
Ιωάννης Μανιάτης

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται χωρικά και χρονικά τα συμβάντα ενάρξεων δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα την περίοδο 2000-2024, τη χρήση εργαλείων των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, με στόχο την κατανόηση των παραγόντων που σχετίζονται με την εκδήλωση του φαινομένου, την ανάδειξη τάσεων και μοτίβων στο χώρο και τον χρόνο, καθώς και την ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης επικινδυνότητας. Η διερεύνηση των προτύπων αυτών συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση της δυναμικής των δασικών πυρκαγιών και στην υποστήριξη του προληπτικού σχεδιασμού.

Αρχικά, σε θεωρητικό πλαίσιο πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση των δασικών πυρκαγιών, με έμφαση στους παράγοντες που επηρεάζουν την έναρξη συμβάντος. Παράλληλα εξετάστηκε η συμβολή των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών ως εργαλείο ανάλυσης, διαχείρισης και υποστήριξης στη λήψη αποφάσεων σε περιβάλλοντα φυσικών κινδύνων, καθώς και η σημασία τους στην κατανόηση σύνθετων φαινομένων που συνδέονται με την κλιματική αλλαγή. Επιπλέον, μελετήθηκε ο ρόλος των μοντέλων μηχανικής μάθησης και η αξιοποίησή τους σε συνδυασμό με τα γεωχωρικά δεδομένα και για την πρόβλεψη πιθανών μελλοντικών συμβάντων.

Στο επόμενο στάδιο, το πρακτικό μέρος της εργασίας, πραγματοποιήθηκε η συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων, τα οποία οργανώθηκαν και μετασχηματίστηκαν σε κατάλληλη μορφή για την ανάλυση. Η μεθοδολογική προσέγγιση εδώ, λόγω περιορισμού στα δεδομένα ως προς την ακριβή γεωγραφική τους θέση έως και το έτος 2019, διαφοροποιείται για τις δύο αυτές περιόδους, πριν το 2020 και μετά. Συγκεκριμένα, για την πρώτη περίοδο πραγματοποιήθηκε πιο γενικευμένη χωρική ανάλυση σε επίπεδο επιχειρησιακών πολυγώνων (πολύγωνα υπηρεσιών), με στόχο την αποτύπωση της κατανομής των ενάρξεων αλλά και της καμένης έκτασης όπως αυτή είναι διαθέσιμη μέσα από τα δεδομένα ενάρξεων. Αντίθετα για την περίοδο 2020-2024, όπου υπήρχαν διαθέσιμα ακριβή χωρικά δεδομένα, κατέστη δυνατός ο εμπλουτισμός των σημείων ενάρξεων με επιπλέον γεωχωρικές και κλιματικές μεταβλητές όπως το υψόμετρο, η κλίση εδάφους, οι χρήσεις γης, η πυκνότητα πληθυσμού, ο δείκτης ξηρασίας και η μέση θερμοκρασία.

Ακολούθησε η χρονική και χωρική ανάλυση των δεδομένων και η ανάπτυξη εφαρμογών για την καλύτερη παρουσίαση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων. Τέλος εφαρμόστηκε μοντέλο μηχανικής μάθησης Random Forest, το οποίο εκπαιδεύτηκε με τα υπάρχοντα δεδομένα και αξιολογήθηκε με στόχο την πρόβλεψη της πιθανότητας κινδύνου έναρξης συμβάντος δασικής πυρκαγιάς.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ανέδειξαν σαφή χωρικά και χρονικά πρότυπα, με τις ενάρξεις να σχετίζονται κυρίως με ανθρωπογενείς δραστηριότητες και να εντοπίζονται σε αγροτικές περιοχές. Παρατηρήθηκε έντονη εποχικότητα, με αυξημένη συχνότητα κατά τους θερινούς μήνες, καθώς και συγκέντρωση των συμβάντων κατά τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες. Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι μεγάλες καμένες εκτάσεις συνδέονται με μεμονωμένα αλλά ιδιαίτερα έντονα συμβάντα. Το μοντέλο πρόβλεψης παρουσίασε ικανοποιητική απόδοση και ανέδειξε περιοχές αυξημένου κινδύνου, επιβεβαιώνοντας τη συμβολή των γεωχωρικών τεχνολογιών και της μηχανικής μάθησης στη μελέτη και διαχείριση κρίσεων και ειδικότερα των δασικών πυρκαγιών.

Abstract

This study examines spatial and temporal patterns of wildfire ignition events in Greece for the period 2000-2024, utilizing Geographic Information Systems tools. The aim is to understand the factors associated with wildfire occurrence, identify trends and patterns in both space and time, and develop a predictive model of ignition risk. The analysis of these patterns contributes to a better understanding of wildfire dynamics and supports preventive planning.

Initially, a literature review was conducted, focusing on wildfires and the key factors influencing ignition events. At the same time, the role of GIS as tool for analysis, management and decision support in natural hazard environments was examined, as well as its importance in understanding complex phenomena related to climate change. In addition, the role of machine learning models and their integration with geospatial data for predicting potential future events was investigated.

Next, corresponding to the practical component of the study, data were collected, processed and transformed into an appropriate format for analysis. Due to limitations in the spatial accuracy of the data prior to 2020, the methodological approach was distinguished between the two different time periods. Specifically, for the period up to 2019, a more generalized spatial analysis was conducted at the level of operational service areas, aiming to capture the distribution of ignition events and burned areas. In the other hand, for the period 2020-2024, where accurate spatial coordinates were available, ignition points were enriched with additional geospatial and climate variables, including elevation, slope, land use, population density, drought index and mean temperature.

Subsequently, spatial and temporal analyses were carried out, along with the development of applications and interactive maps for improved visualization of the data and the results. Finally, a Random Forest machine learning model was implemented, trained on the available data and evaluated to predict the probability of wildfire ignition incidents.

The results revealed spatial and temporal patterns, with ignition events primarily associated with human activities and predominantly occurring in agriculture and mixed areas. Strong seasonality was also observed. The predictive model demonstrated satisfactory performance and identified areas of increased risk, confirming the contribution of geospatial technologies and machine learning to the study and management of wildfire related risk.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract.....	2
Περιεχόμενα	3
Πίνακας Διαγραμμμάτων	5
Πίνακας Εικόνων	5
Πίνακας Χαρτών	5
Συνομεύσεις	5
1. Θεωρητικό υπόβαθρο	6
1.1. Εισαγωγή	6
1.2. Δασικές πυρκαγιές.....	7
1.2.1. Φωτιά, δάση και οικοσυστήματα	7
1.2.2. Αιτίες έναρξης.....	7
1.2.3. Νομοθεσία.....	8
1.3. Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών	8
1.3.1. Ορισμός και σημασία.....	8
1.3.2. Δομή & εργαλεία.....	8
1.3.3. Χρονική & χωρική ανάλυση πληροφορίας.....	9
1.3.4. Χρησιμότητα στην διαχείριση κινδύνων.....	10
1.4. Μοντέλα Πρόβλεψης.....	10
1.4.1. Μηχανική Μάθηση.....	10
1.4.2. Αλγόριθμος Random Forest.....	11
2. Μεθοδολογία	12
2.1. Δεδομένα	12
2.1.1. Συμβάντα δασικών πυρκαγιών.....	12
2.1.2. Χρήσεις γης.....	13
2.1.3. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM).....	14
2.1.4. Πυκνότητα Πληθυσμού.....	16
2.1.5. Κλιματικά δεδομένα	17
2.2. Μεθοδολογία Ανάλυσης.....	19
2.2.1. Επεξεργασία Δεδομένων.....	19
2.2.2. Μεθοδολογία Ανάλυσης.....	21
2.3. Μοντέλο Πρόβλεψης	23
2.3.1. Προετοιμασία δεδομένων	23
2.3.2. Εκπαίδευση και εφαρμογή του μοντέλου	24
2.3.3. Αξιολόγηση απόδοσης και επιλογής μοντέλου	24
2.3.4. Παραγωγή χάρτη εκτίμησης κινδύνου έναρξης	24

3.	Αποτελέσματα	26
3.1.	Περίοδος 2000-2024.....	26
3.1.1.	Αποτελέσματα χρονικής ανάλυση	26
3.1.2.	Πολύγωνα Υπηρεσιών	31
3.1.3.	Διαδραστικός χάρτης ανά Υπηρεσία	33
3.2.	Περίοδος 2020-2024.....	37
3.2.1.	Συσχέτιση δεδομένων με παραμέτρους.....	37
3.2.2.	Διαδραστικός πίνακας dashboard.....	44
3.3.	Μοντέλο πρόβλεψης	45
3.3.1.	Σημασία μεταβλητών.....	46
3.3.2.	Αποτελέσματα εκπαίδευσης και επαλήθευσης.....	46
3.3.3.	Χάρτης Εκτίμησης κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς	48
4.	Συμπεράσματα.....	49
	Βιβλιογραφία.....	51

Πίνακας Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Πλήθος ενάρξεων ανά έτος για την συνολική περίοδο μελέτης 2000-2024.....	26
Διάγραμμα 8 Άθροισμα καμένων εκτάσεων (στρέμματα) ανά έτος.....	27
Διάγραμμα 2 Διαφορά % από τη Μ.Τ. ανά έτος	28
Διάγραμμα 3 Calendar heat πλήθους ενάρξεων ανά μέρα και μήνα για το σύνολο της περιόδου 2000-2024.....	29
Διάγραμμα 4 Πλήθος ενάρξεων ανά μήνα	29
Διάγραμμα 5 Dataclock πλήθους ενάρξεων δασικών πυρκαγιών για το σύνολο των δεδομένων της περιόδου 2000-2024	30
Διάγραμμα 6 Πλήθος ενάρξεων ανά ημέρα και ώρα της ημέρας. Περίοδος 2000-2024.....	31
Διάγραμμα 7 Πλήθος ενάρξεων ανά ώρα της ημέρας. Περίοδος 2000-2024	31

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1 Λίστα πινάκων excel από το ανοιχτό αρχείο του Πυροσβεστικού Σώματος.....	12
Εικόνα 2 Στιγμιότυπο οθόνης από τον διαδραστικό χάρτη με τα πολύγωνα των υπηρεσιών.....	22
Εικόνα 3 Στιγμιότυπο οθόνης από την εφαρμογή θέασης τύπου dashboard.....	23
Εικόνα 4 Εφαρμογή τύπου dashboard για τη θέαση των δεδομένων της περιόδου 2020-2024.	44
Εικόνα 5 Στιγμιότυπο από τη σύγκριση περιοχών στην εφαρμογή dashboard.....	45

Πίνακας Χαρτών

Χάρτης 1 Χρήσεις γης Copernicus Land Cover 2018.....	14
Χάρτης 2 Υψόμετρο από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους.....	15
Χάρτης 3 Κλίση εδάφους από ψηφιακό μοντέλο εδάφους	16
Χάρτης 4 Πυκνότητα πληθυσμού ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο.....	17
Χάρτης 5 Μέση θερμοκρασία αέρα	18
Χάρτης 6 Τυποποιημένος δείκτης κατακρήμνισης (SPI)	19
Χάρτης 3-1 Πλήθος ενάρξεων δασικών πυρκαγιών ανά υπηρεσία (2000-2024).....	32
Χάρτης 3-2 Συνολική καμένη έκταση ανά υπηρεσία (2000-2024).....	33

Συντομεύσεις

ΠΥ Πυροσβεστική Υπηρεσία

ΠΣ Πυροσβεστικό Σώμα

ΓΣΠ Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών

GIS Geographic Information Systems

DEM Digital Elevation Model

DTM Digital Terrain Model

ML Machine Learning

1. Θεωρητικό υπόβαθρο

1.1. Εισαγωγή

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα από τα πιο σύνθετα και επιβαρυντικά φαινόμενα για τα φυσικά οικοσυστήματα, την κοινωνία και την οικονομία. Η κλιματική κρίση έχει εντείνει σημαντικά τη συχνότητα και την ένταση των πυρκαγιών διεθνώς, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας, της παρατεταμένης ξηρασίας, των μεταβαλλόμενων βροχοπτώσεων και της μειωμένης χιονοκάλυψης (FAO, 2024).

Σε παγκόσμιο περιβαλλοντικό πλαίσιο η Συμφωνία του Παρισιού το 2015 (United Nations, n.d.) ανέδειξε με σαφήνεια ότι ο περιορισμός της αύξησης της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας προϋποθέτει την προστασία και ενίσχυση των φυσικών καταβοθρών άνθρακα, με τα δάση να αποτελούν τον σημαντικότερο εξ αυτών. Τα δάση αποθηκεύουν τεράστιες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, συμβάλλοντας στον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα και στη ρύθμιση του κλίματος. Όταν καίγονται μειώνεται η ικανότητά τους να δεσμεύσουν άνθρακα αλλά επίσης απελευθερώνουν άμεσα μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, ενισχύοντας τον φαύλο κύκλο που επιταχύνει την κλιματική αλλαγή.

Η σχέση του ανθρώπου με τη φωτιά είναι αρχέγονη. Η χρήση της ξεκινά χιλιάδες χρόνια πριν από την εμφάνιση των οργανωμένων κοινωνιών και πολιτισμών, αποτελώντας καθοριστικό παράγοντα για την εξέλιξη του ανθρώπινου είδους. Σε πολλές περιοχές του κόσμου, η ελεγχόμενη καύση αποτελούσε και συνεχίζει να αποτελεί σημαντικό εργαλείο διαχείρισης της βλάστησης και του αγροτικού τοπίου. Παρόλα αυτά η αύξηση της ανθρώπινης πίεσης στα οικοσυστήματα, η εγκατάλειψη της υπαίθρου, οι κλιματικές μεταβολές και η συσσώρευση καύσιμης ύλης έχουν μετατρέψει τη φωτιά από λειτουργικό στοιχείο του οικοσυστήματος σε μία από τις σοβαρότερες απειλές για το φυσικό περιβάλλον.

Στην Ευρώπη η πίεση από την αστικοποίηση, τον τουρισμό, την εγκατάλειψη της καλλιεργήσιμης γης και την εξάπλωση των προαστίων των πόλεων μέσα σε δασικές περιοχές δημιουργεί πρόσθετους παράγοντες κινδύνου (Migliorini, Komac, Schwarze, & Sigmund, 2020). Οι πυρκαγιές, πέρα από την περιβαλλοντική υποβάθμιση, έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην δημόσια υγεία, την ποιότητα της ατμόσφαιρας και την τοπική οικονομία. Η διατήρηση και ορθή διαχείριση των οικοσυστημάτων είναι κρίσιμη τόσο για τη βιοποικιλότητα όσο και για τις υπηρεσίες που προσφέρουν στον άνθρωπο: τον καθαρό αέρα και νερό, προστασία από πλημμύρες και διάβρωση του εδάφους, σταθεροποίηση του κλίματος και οικονομικούς πόρους. Ωστόσο, η κλιματική κρίση αυξάνει την συχνότητα, την ένταση και τη διάρκεια των δασικών πυρκαγιών δημιουργώντας νέες προκλήσεις σε παγκόσμιο και τοπικό επίπεδο.

Η Ελλάδα, όντας μια χώρα της Μεσογείου με υψηλό κίνδυνο, βιώνει έντονα την αλλαγή του κλίματος με περιόδους παρατεταμένης ξηρασίας, υψηλές θερμοκρασίες και ισχυρούς ανέμους να οδηγούν σε ολόένα και πιο καταστροφικά συμβάντα.

Μέσα σε αυτό το περιβάλλον, η ανάγκη για μεθόδους πρόληψης και ανάλυσης των πυρκαγιών είναι περισσότερο επιτακτική από ποτέ όπως και η περεταίρω διερεύνηση της σχέσης του ανθρώπου, του πολιτισμού, της φωτιάς και του κλίματος (FAO, 2024). Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και οι τεχνικές μηχανικής μάθησης επιτρέπουν μεταξύ άλλων τη συστηματική μελέτη των χωρικών και χρονικών τάσεων, τη διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν και την ανάπτυξη εργαλείων πρόληψης και λήψης αποφάσεων. Η συνδυασμένη χρήση χωρικών

δεδομένων, επιχειρησιακών καταγραφών και αλγορίθμων πρόβλεψης μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τον προληπτικό σχεδιασμό και να συμβάλει στην μείωση των επιπτώσεων των πυρκαγιών στα οικοσυστήματα και τις κοινωνίες.

Η παρούσα εργασία βασίζεται στην αξιοποίηση των επιχειρησιακών δεδομένων ενάρξεων της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας, καθώς και σε περιβαλλοντικά και κοινωνικά δεδομένα που ήταν διαθέσιμα και με τη χρήση εργαλείων των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών επιχειρείται ανάλυση τη χωρικής και χρονικής κατανομής των ενάρξεων των δασικών πυρκαγιών, η μελέτη των παραγόντων που σχετίζονται με τη μορφολογία του εδάφους, τον πληθυσμό και κλιματικούς παράγοντες και τέλος την ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης πιθανότητας έναρξης με τη χρήση του αλγόριθμου μηχανικής μάθησης τυχαίων δασών (Random forest).

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τις δασικές πυρκαγιές, τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και τους αλγορίθμους μηχανικής μάθησης. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσεται η μεθοδολογία της ανάλυσης και οι εργασίες που γίνανε στα δεδομένα. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τέλος ακολουθούν τα συμπεράσματα στο τέταρτο κεφάλαιο.

1.2. Δασικές πυρκαγιές

1.2.1. Φωτιά, δάση και οικοσυστήματα

Η φωτιά αποτελεί χημική αντίδραση καύσης που απαιτεί την ύπαρξη τριών βασικών στοιχείων: την καύσιμη ύλη, τη θερμότητα και την ύπαρξη οξυγόνου. Η αφαίρεση ενός μόνο στοιχείου διακόπτει την διαδικασία της καύσης (Καϊλίδης & Καρανικόλα, 2004). Στα δασικά οικοσυστήματα η καύσιμη ύλη περιλαμβάνει τόσο νεκρούς όσο και ζωντανούς ιστούς της χλωρίδας, αποτελώντας βασικό παράγοντα για την εξάπλωση της πυρκαγιάς.

Οι φωτιές επηρεάζουν την βλάστηση πάνω από 400 εκατομμύρια χρόνια και πάντα επηρεάζουν την σύσταση της ατμόσφαιρας μέσω των εκπομπών αερίων που αποτελούν μέρος του βιοχημικού κύκλου (Goldammer, 2022).

Στη βιβλιογραφία οι πυρκαγιές ταξινομούνται σε πυρκαγιές υπο-εδάφους (underground), επιφανειακές ή έρπουσες (surface), πυρκαγιές κόμης (crown) και μεικτές. Το είδος της βλάστησης, η δομή του δάσους και η ποσότητα της καύσιμης ύλης καθορίζουν τη συμπεριφορά της φωτιάς (Καϊλίδης & Καρανικόλα, 2004).

Σε φυσικούς ρυθμούς, οι πυρκαγιές συμβάλλουν στην ανακύκλωση θρεπτικών συστατικών, στη μείωση της νεκρής καύσιμης ύλης και στη διατήρηση της βιοποικιλότητας (Υφαντή, 2015). Ωστόσο η αύξηση της συχνότητας και της έντασης οδηγούν σε υποβάθμιση των εδαφών, απώλεια χλωρίδας και πανίδας και αργότερα σε φαινόμενα πλημμυρών και διάβρωση του εδάφους και κατολισθήσεις.

1.2.2. Αιτίες έναρξης

Οι αιτίες έναρξης δασικής πυρκαγιάς ταξινομούνται σε δύο κύριες κατηγορίες: τις φυσικές και τις ανθρωπογενείς.

Φυσικές αιτίες μεταξύ άλλων μπορεί να είναι οι κεραυνοί, που αποτελούν και τη πιο συχνή φυσική αιτία, οι ακραίες θερμοκρασίες, η ηφαιστειακή δραστηριότητα αλλά και σεισμικά γεγονότα και κατολισθήσεις.

Στις ανθρωπογενείς αιτίες που αποτελούν και τη κύρια αιτία πυρκαγιών τόσο στην Ελλάδα όσο και διεθνώς περιλαμβάνονται η καύση υπολειμμάτων της γεωργίας και της κτηνοτροφίας, οι γεωργικές εργασίες, η αμέλεια όπως από τσιγάρο ή και τα ηλεκτρικά δίκτυα, και τέλος ο

εμπρησμός από πρόθεση. Η αύξηση της ανθρώπινης παρουσίας οδηγεί σε υψηλότερη πιθανότητα έναρξης (Δεμίρογλου, 2024).

1.2.3. Νομοθεσία

Η προστασία και η διαχείριση του δάσους και των δασικών εκτάσεων επιβάλλεται τόσο από την Εθνικό δίκαιο και τη νομοθεσία μέσα από νόμους, διατάγματα και αποφάσεις, όσο και από το Ευρωπαϊκό Δίκαιο με κανονισμούς, οδηγίες, αποφάσεις και νομολογίες του Ευρωπαϊκού δικαστηρίου, αλλά και από συμβάσεις, συνθήκες και πρωτόκολλα του Διεθνούς Δικαίου. (ΥΠΙΕΝ, 2017)

Η συνταγματική προστασία των δασών κατοχυρώνεται στο άρθρο 24 του Ελληνικού Συντάγματος, όπου η προστασία ορίζεται ως υποχρέωση του Κράτους και δικαίωμα του πολίτη. Επιπλέον με το άρθρο 117 παράγραφος 3 του Συντάγματος καθορίζεται ότι ακόμα και αν ένα δάσος καταστραφεί από φυσικές καταστροφές, θα παραμείνει δασική έκταση και δεν αποβάλλει τον χαρακτηρισμό του αυτό.

Στον Ποινικό Κώδικα τα άρθρα 264 και 265 (Νόμος 4619/2019) ορίζουν ποινές για την πρόκληση πυρκαγιάς είτε με δόλο είτε από αμέλεια, από ένα έτος έως και ισόβια κάθειρξη σε περίπτωση που η πράξη εμπρησμού είχε το ως αποτέλεσμα τον θάνατο ανθρώπου.

1.3. Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών

1.3.1. Ορισμός και σημασία

Τα Γεωγραφικά Συστήματα πληροφοριών αποτελούν ένα σύνολο λογισμικού, δεδομένων και μεθόδων που επιτρέπουν τη συλλογή, αποθήκευση, επεξεργασία και ανάλυση χωρικών δεδομένων με σκοπό την ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων με τρόπο τέτοιο ώστε να λαμβάνονται τελικά καλύτερες αποφάσεις.

Τα Γεωγραφικά συστήματα σε σχέση με τις φυσικές καταστροφές και την αντιμετώπιση κρίσεων μπορούν να υποστηρίξουν τις διαδικασίες από την πρόληψη των φαινομένων αλλά και κατά τη διάρκεια της επιχειρησιακής διαχείρισης αλλά και μετά το πέρας του φαινομένου με την καταγραφή των επιπτώσεων και την παρακολούθηση και τον σχεδιασμό της αποκατάστασης του οικοσυστήματος.

1.3.2. Δομή & εργαλεία

Η πληροφορία στα γεωγραφικά συστήματα οργανώνεται σε θεματικά επίπεδα (layers), καθένα από τα οποία αναπαριστά μια συγκεκριμένη όψη του πραγματικού κόσμου. Η δομή αυτή επιτρέπει τον συνδυασμό φυσικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών δεδομένων, προσφέροντας ένα συνεκτικό πλαίσιο για ανάλυση και λήψη αποφάσεων.

Τα χωρικά δεδομένα χωρίζονται σε vector και raster. Τα διανυσματικά δεδομένα (vector) μπορούν να αναπαρασταθούν ως σημεία, γραμμές ή πολύγωνα και αποτελούν τις οντότητες (features). Κάθε οντότητα συνοδεύεται από τον πίνακα χαρακτηριστικών του (attribute table), ο οποίος του επιτρέπει την ποσοτική και ποιοτική ανάλυση. Τα δεδομένα raster αποτελούνται από ένα κάναβο (grid) κελιών, όπου κάθε κελί φέρει μια τιμή. Ο συνδυασμός raster και vector δεδομένων αποτελεί βασικό πλεονέκτημα των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, καθώς επιτρέπει σύνθετη ανάλυση (Goodchild, 2018).

Τα σύγχρονα ΓΣΠ ενσωματώνουν ένα εκτεταμένο σύνολο εργαλείων που υποστηρίζουν τη διαχείριση, ανάλυση και μοντελοποίηση χωρικών δεδομένων.

Η διαχείριση και επεξεργασία των δεδομένων περιλαμβάνει συχνά διαδικασίες όπως τροποποίηση της γεωμετρίας ή των χαρακτηριστικών (attributes), δημιουργία ζωνών επιρροής, ομαδοποίηση βάσει κοινών πεδίων ή γεωμετρίας, υπολογισμός νέων χαρακτηριστικών κ.α. με σκοπό τον καθαρισμό και την οργάνωση των δεδομένων.

Για την εύρεση συσχετίσεων και τον συνδυασμό των δεδομένων υπάρχουν εργαλεία που επιτρέπουν τη συσχέτιση των δεδομένων με βάση χωρικές σχέσεις. Πιο σύνθετα εργαλεία ανάλυσης παράγουν νέα δεδομένα ή πραγματοποιούν σύνθετες χωρικές επεξεργασίες όπως η δημιουργία περιοχών επιρροής σημειακών φαινομένων (Thiessen/ Voronoi), ο υπολογισμός χωρικής πυκνότητας (density) και η επεξεργασία raster όπως ο υπολογισμός της κλίσης του εδάφους και του υψόμετρου από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους.

Τα ΓΣΠ παρέχουν εξελιγμένα εργαλεία για την παρουσίαση των δεδομένων με τη δημιουργία θεματικών χαρτών και διαγραμμιάτων αλλά επίσης και με δια-δραστικές εφαρμογές (web mapping) που διευκολύνουν τη διάχυση της πληροφορίας προς φορείς ή το ευρύ κοινό.

1.3.3. Χρονική & χωρική ανάλυση πληροφορίας

Η ανάλυση της πληροφορίας αποτελεί διαδικασία μετατροπής των δεδομένων σε γνώση, μέσω της αναγνώρισης σχέσεων, μοτίβο και τάσεων. Όταν τα δεδομένα διαθέτουν χωρική αναφορά και χρονική διάσταση, η ανάλυση αποκτά χωρικό και χρονικό χαρακτήρα αντίστοιχα.

Η χωρική ανάλυση εξετάζει που συμβαίνει ένα φαινόμενο και πως αυτό κατανέμεται στο χώρο, ενώ η χρονική ανάλυση μελετά το πότε συμβαίνει και πως μεταβάλλεται στο χρόνο ένα φαινόμενο. (Goodchild, 2018) Ο συνδυασμός τους επιτρέπει την κατανόηση της δυναμικής των φυσικών και των ανθρωπογενών διεργασιών.

Τα Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών αποτελούν βασικό εργαλείο για την υλοποίηση αυτής της ανάλυσης, καθώς επιτρέπουν την ταυτόχρονη διαχείριση πολλών θεματικών επιπέδων, την εκτέλεση χωρικών υπολογισμών και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων μέσω χαρτών και διαγραμμιάτων (BurroughMcDonnell2011). Η χαρτογραφική αναπαράσταση διευκολύνει την αναγνώριση μοτίβων που συχνά δεν είναι εμφανή σε απλούς πίνακες δεδομένων (MacEachren2004).

Στο πλαίσιο των δασικών πυρκαγιών, η χώρο-χρονική ανάλυση είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς οι ενάρξεις δεν κατανέμονται τυχαία ούτε στο χώρο ούτε στο χρόνο αλλά επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες μεταξύ αυτών η τοπογραφία του εδάφους, το κλίμα και οι μετεωρολογικές συνθήκες και φυσικά πολλοί ανθρωπογενείς παράγοντες όπως οι υποδομές και οι εργασίες. Μέσω της ανάλυσης μπορούν να εντοπιστούν περιοχές με υψηλή συχνότητα ενάρξεων, χρονικές περιόδους αυξημένης επικινδυνότητας και χωρικές συσχετίσεις με παραμέτρους όπως υψόμετρο, κλίση, χρήσεις γης ή πληθυσμιακή πυκνότητα (FAO, 2024).

Η χωρική και χρονική ανάλυση μετατρέπει τα ιστορικά δεδομένα σε εργαλείο λήψης αποφάσεων, γεφυρώνοντας την επιστημονική γνώση με την επιχειρησιακή διαχείριση φυσικών καταστροφών.

Οι ανάλυση σε βάθος των δεδομένων είναι κρίσιμη και αναγκαία αυτή την εποχή που βιώνουμε τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και τα φαινόμενα γίνονται πιο έντονα, συχνά και πολλές φορές ακραία με επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και ευημερία, στο περιβάλλον και την οικονομία.

1.3.4. Χρησιμότητα στην διαχείριση κινδύνων

Η χωρική και χρονική ανάλυση είναι ένα κρίσιμο εργαλείο για την διαχείριση των φυσικών κινδύνων καθώς επιτρέπει τόσο την ανάλυση και παρουσίαση των ιστορικών δεδομένων αλλά και την πρόβλεψη μελλοντικών τάσεων. Στο πεδίο των δασικών πυρκαγιών, η κατανόηση των χωρικών και χρονικών μεταβολών αποτελεί βάση τόσο για τον προληπτικό σχεδιασμό, τον καθορισμό περιοχών επιτήρησης, την κατανομή των πόρων και την ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης.

Το επιστημονικό κέντρο Beyond του Αστεροσκοπείου Αθηνών αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αυτής της προσέγγισης στην πράξη. Το κέντρο Beyond παράγει ημερήσιους χάρτες επικινδυνότητας πυρκαγιών, οι οποίοι βασίζονται σε πρόσφατα και ιστορικά δεδομένα και αξιοποιούν μοντέλα τύπου Random Forest για την εκτίμηση της πιθανότητας εκδήλωσης συμβάντος (Beyond, Αστεροσκοπείο Αθηνών, n.d.). Αυτοί οι χάρτες αποτελούν μέρος ενός πραγματικού συστήματος υποστήριξης λήψης αποφάσεων, όπου οι χωρικές και χρονικές τάσεις μετατρέπονται σε πρακτικές ενδείξεις για τα επίπεδα επιτήρησης και επιχειρησιακής ετοιμότητας.

Χαρακτηριστικό επίσης παράδειγμα εφαρμογής των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και μεθόδων μοντελοποίησης κινδύνου πυρκαγιάς αποτελεί η μελέτη των Χατζηγεωργίου, Δογάνης, Μανιάτης (Chatzigeorgiadis, Doganis, & Maniatis, 2022) στο δάσος Δαδιάς- Λευκίμης- Σουφλίου στον Έβρο. Στόχος της έρευνας ήταν η χαρτογράφηση της πιθανότητας εξάπλωσης πυρκαγιάς μέσω συνδυασμού τεχνικών μηχανικής μάθησης και πολυκριτηριακής ανάλυσης σε περιβάλλον ΓΣΠ. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν συγκεντρώσεις περιοχών υψηλού κινδύνου, με το σύνολο του εθνικού δρυμού να ταξινομείται σε υψηλές κατηγορίες επικινδυνότητας. Τα πραγματικά περιστατικά των πυρκαγιών των ετών 2020 και 2021 επιβεβαίωσαν σε σημαντικό βαθμό τη χωρική κατανομή του εκτιμώμενου κινδύνου, υπογραμμίζοντας τη χρησιμότητα αυτών των εργαλείων στη πρόληψη και το σχεδιασμό διαχείρισης των δασικών πυρκαγιών.

1.4. Μοντέλα Πρόβλεψης

Τα μοντέλα πρόβλεψης αποτελούν εργαλεία ανάλυσης που αξιοποιούν ιστορικά δεδομένα και συσχετίσεις μεταξύ μεταβλητών, με στόχο την εκτίμηση μελλοντικών καταστάσεων ή την πιθανότητα εμφάνισης ενός φαινομένου. Βασίζονται στη μαθηματική και στατιστική περιγραφή της σχέσης μεταξύ εξαρτημένων και ανεξάρτητων μεταβλητών, επιτρέποντας τη μετατροπή πολύπλοκων δεδομένων σε πληροφορία χρήσιμη για τη λήψη αποφάσεων.

Στο πλαίσιο των φυσικών καταστροφών, τα μοντέλα πρόβλεψης συμβάλλουν στον εντοπισμό χωρικών και χρονικών προτύπων κινδύνου, στη μείωση της αβεβαιότητας και στη βελτίωση του προληπτικού σχεδιασμού.

Ειδικότερα στις δασικές πυρκαγιές, η εφαρμογή προγνωστικών μοντέλων επιτρέπει τον προσδιορισμό περιοχών με αυξημένη πιθανότητα έναρξης και εξάπλωσης πυρκαγιάς, λαμβάνοντας υπόψη περιβαλλοντικούς, μορφολογικούς, κλιματικούς και ανθρωπογενείς παράγοντες. Η χαρτογράφηση της επικινδυνότητας μέσω τέτοιων μοντέλων υποστηρίζει την πρόληψη και τη βελτιστοποίηση της κατανομής επιχειρησιακών πόρων.

1.4.1. Μηχανική Μάθηση

Η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning) αποτελεί κλάδο της Τεχνητής Νοημοσύνης που αναπτύσσει αλγόριθμους ικανούς να «μαθαίνουν» πρότυπα από δεδομένα χωρίς να είναι ρητά προγραμματισμένοι για κάθε πιθανό σενάριο. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης αναλύουν

μεγάλα και πολυδιάστατα σύνολα δεδομένων, αναγνωρίζουν σχέσεις μεταξύ μεταβλητών και δημιουργούν μοντέλα που μπορούν να γενικεύσουν τη γνώση σε νέα, άγνωστα δεδομένα.

Ανάλογα με τη δομή των δεδομένων και τον στόχο της ανάλυσης, η μηχανική μάθηση διακρίνεται σε επιβλεπόμενη (supervised), μη επιβλεπόμενη (unsupervised) και ενισχυτική μάθηση (reinforcement learning). Στην περίπτωση των δασικών πυρκαγιών, χρησιμοποιείται κυρίως επιβλεπόμενη μάθηση, όπου το μοντέλο εκπαιδεύεται σε δεδομένα με γνωστή έκβαση (πχ ύπαρξη ή μη έναρξης πυρκαγιάς) ώστε να προβλέψει την κατηγορία ή την πιθανότητα εμφάνισης ενός συμβάντος σε νέα δεδομένα. Η ικανότητα των αλγόριθμων αυτών να διαχειρίζονται μη γραμμικές σχέσεις και μεγάλο αριθμό μεταβλητών και δεδομένων, τους καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλους για σύνθετα περιβαλλοντικά φαινόμενα.

1.4.2. Αλγόριθμος Random Forest

Ο αλγόριθμος Random Forest ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων συνδυαστικής μάθησης και βασίζεται στη δημιουργία ενός πλήθους τυχαίων δέντρων αποφάσεων. Κάθε δέντρο εκπαιδεύεται σε τυχαίο υποσύνολο των δεδομένων και χρησιμοποιεί τυχαίο υποσύνολο μεταβλητών σε κάθε κόμβο διαχωρισμού. Η τελική πρόβλεψη προκύπτει από το συνδυασμό των προβλέψεων όπως των δέντρων με πλειοψηφία ψήφων στην ταξινόμηση.

Η τυχαιότητα στη διαδικασία εκπαίδευσης μειώνει την υπερπροσαρμογή (overfitting) του μοντέλου και αυξάνει τη δυνατότητα γενίκευσης του. Ο αλγόριθμος random forest είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός στη μοντελοποίηση περιβαλλοντικών προβλημάτων καθώς μπορεί να χειριστεί μεγάλο αριθμό ετερογενών μεταβλητών, να αποδώσει τη σχετική σημαντικότητα κάθε παράγοντα και να μοντελοποιήσει πολύπλοκες, μη γραμμικές σχέσεις. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ευρέως στην εκτίμηση κινδύνου δασικών πυρκαγιών, όπου παράγοντες όπως το ανάγλυφο του εδάφους, οι χρήσεις γης, οι κλιματικές συνθήκες και η ανθρώπινη παρουσία αλληλοεπιδρούν δυναμικά.

Η αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου ταξινόμησης random forest αποτελεί κρίσιμο στάδιο στη διαδικασία πρόβλεψης, καθώς επιτρέπει την εκτίμηση της ικανότητας του μοντέλου να γενικεύει σε νέα δεδομένα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται μετρικές όπως η συνολική ακρίβεια (accuracy), η οποία εκφράζει το ποσοστό των σωστών προβλέψεων, καθώς και δείκτες που λαμβάνουν υπόψη την ισορροπία μεταξύ σωστών και λανθασμένων ταξινομήσεων, έχοντας κρατήσει μέρος των δεδομένων για την επαλήθευση. Ο πίνακας σύγχυσης (confusion matrix) παρέχει αναλυτική εικόνα των σωστών και λανθασμένων προβλέψεων (αληθώς θετικά, αληθώς αρνητικά, ψευδώς θετικά, ψευδώς αρνητικά), ενώ ο F1-score συνδυάζει την ακρίβεια και την ανάκληση, προσφέροντας πιο αντιπροσωπευτική μέτρηση σε περιπτώσεις ανισορροπίας δεδομένων. Επιπλέον, ο δείκτης Matthews correlation coefficient (MCC) χρησιμοποιείται για τη συνολική αποτίμηση της ποιότητας της ταξινόμησης, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα στοιχεία του πίνακα σύγχυσης και θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστος σε δυαδικά προβλήματα πρόβλεψης.

2. Μεθοδολογία

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται τα δεδομένα και οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν, η επεξεργασία των δεδομένων, η μέθοδοι για την ανάλυση και παρουσίαση των δεδομένων και η περιγραφή του αλγόριθμου που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο πρόβλεψης επικινδυνότητας έναρξης συμβάντος δασικής πυρκαγιάς.

2.1. Δεδομένα

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα δεδομένα και ο τρόπος που χρησιμοποιούνται.

Για την ανάλυση των συμβάντων έναρξης δασικών πυρκαγιών χρησιμοποιήθηκαν πολλαπλά δεδομένα από διαφορετικές πηγές, οι οποίες καλύπτουν τις χρονικές και γεωγραφικές διαστάσεις των συμβάντων όσο και περιβαλλοντικούς και κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες που σχετίζονται ή ερευνάται η σχέση τους με αυτά. Τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν περιγράφονται στα υποκεφάλαια.

2.1.1. Συμβάντα δασικών πυρκαγιών

Οι πίνακες με τα συμβάντα έναρξης δασικών πυρκαγιών προέρχονται από το [αρχείο συμβάντων](#) που διατίθεται ανοιχτό στην ιστοσελίδα του Πυροσβεστικού Σώματος σε μορφή πινάκων excel. (Πυροσβεστικό Σώμα Ελλάδος, 2025)

A. Αρχείο Συμβάντων

Δεδομένα που αφορούν τα Δασικά και Αστικά συμβάντα στα οποία επεμβαίνει το Π.Σ.

- Δασικές Πυρκαγιές 2000-2012 (Σε μορφή .xls | .xlsx)
- Δασικές Πυρκαγιές 2013 (Σε μορφή .xls | .xlsx)
- Δασικές Πυρκαγιές 2014 (Σε μορφή .xls | .xlsx)
- Δασικές Πυρκαγιές 2015 (Σε μορφή .xls | .xlsx)
- Δασικές Πυρκαγιές 2016 (Σε μορφή .xls | .xlsx)
- Δασικές Πυρκαγιές 2017 (Σε μορφή .xls | .xlsx)
- Δασικές Πυρκαγιές 2018 (Σε μορφή .xls | .xlsx)
- Δασικές Πυρκαγιές 2019 (Σε μορφή .xls | .xlsx)
- Δασικές Πυρκαγιές 2020 (Σε μορφή .xls | .xlsx)
- Δασικές Πυρκαγιές 2021 (Σε μορφή .xls | .xlsx)
- Δασικές Πυρκαγιές 2022 (Σε μορφή .xls | .xlsx)
- Δασικές Πυρκαγιές 2023 (Σε μορφή .xls | .xlsx)

Εικόνα. Λίστα πινάκων excel από το ανοιχτό αρχείο του Πυροσβεστικού Σώματος

Οι πίνακες αυτοί περιέχουν πληροφορίες για τα συμβάντα σχετικά με την ώρα έναρξης και λήξης του συμβάντος, την τοποθεσία και την υπηρεσία που ανέλαβε την διαχείριση, το πλήθος της καμένης έκτασης, το πλήθος του ανθρώπινου δυναμικού και το πλήθος των οχημάτων που

χρησιμοποιήθηκαν κατά την επιχείρηση της κατάσβεσης. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα έτη καταγραφής και οι πληροφορίες που καταγράφονταν το αντίστοιχο έτος.

Περίοδος	ημ/νια έναρξης/λήξης	Τοποθεσία	Πλήθος καμένης έκτασης	Πλήθος ανθρώπινου δυναμικού & οχημάτων
2000- 2010	ναι	Σχετική θέση (επίπεδο νομού)	ανα τύπο	όχι
2011- 2019	ναι	Σχετική θέση (επίπεδο νομού)	ανα τύπο	Ανά κατηγορία
2020- 2024	ναι	Απόλυτη θέση (x,y)	ανα τύπο	Ανά κατηγορία

Πίνακας 1 Συνοπτικός πίνακας βασικών πεδίων των συμβάντων ενάρξεων

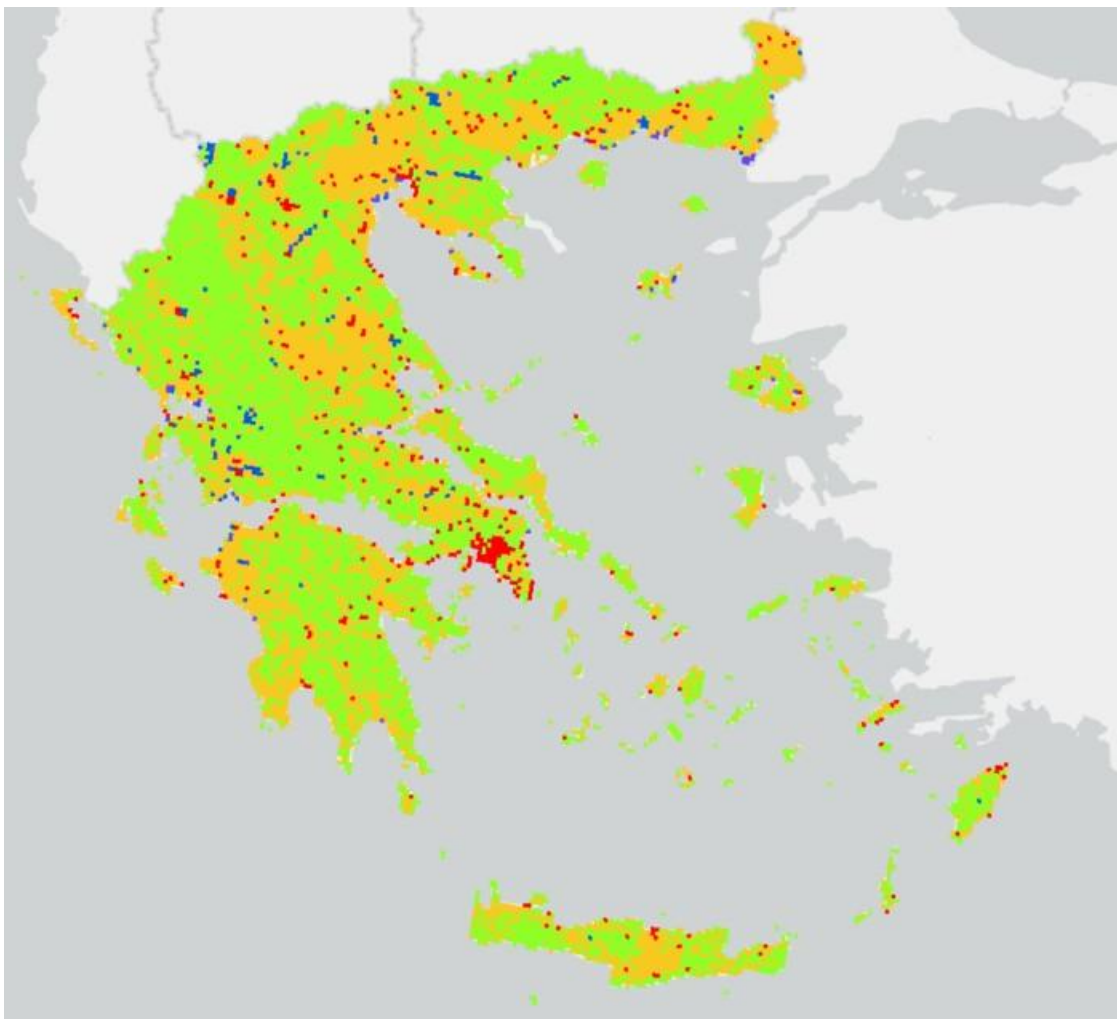
Στην παρούσα εργασία έγινε κυρίως ο διαχωρισμός στα δεδομένα που περιέχουν την πληροφορία της απόλυτης θέσης (συντεταγμένες) για τα έτη 2020-2024 και στα δεδομένα που περιέχουν την σχετική θέση (σε επίπεδο νομού) για τα έτη 2000-2019, καθώς επεξεργάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν με διαφορετικό τρόπο για την ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Οι πίνακες από τα συμβάντα ενάρξεων των δασικών πυρκαγιών αποτελούν τα κύρια δεδομένα της παρούσας μελέτης.

2.1.2. Χρήσεις γης

Τα δεδομένα για τις χρήσεις γης προέρχονται από την υπηρεσία CORINE land cover 2018 της υπηρεσίας Copernicus της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Οι χρήσεις χωρίζονται σε 5 κατηγορίες και 44 υποκατηγορίες για όλη την Ευρώπη. (European Commission, 2025)

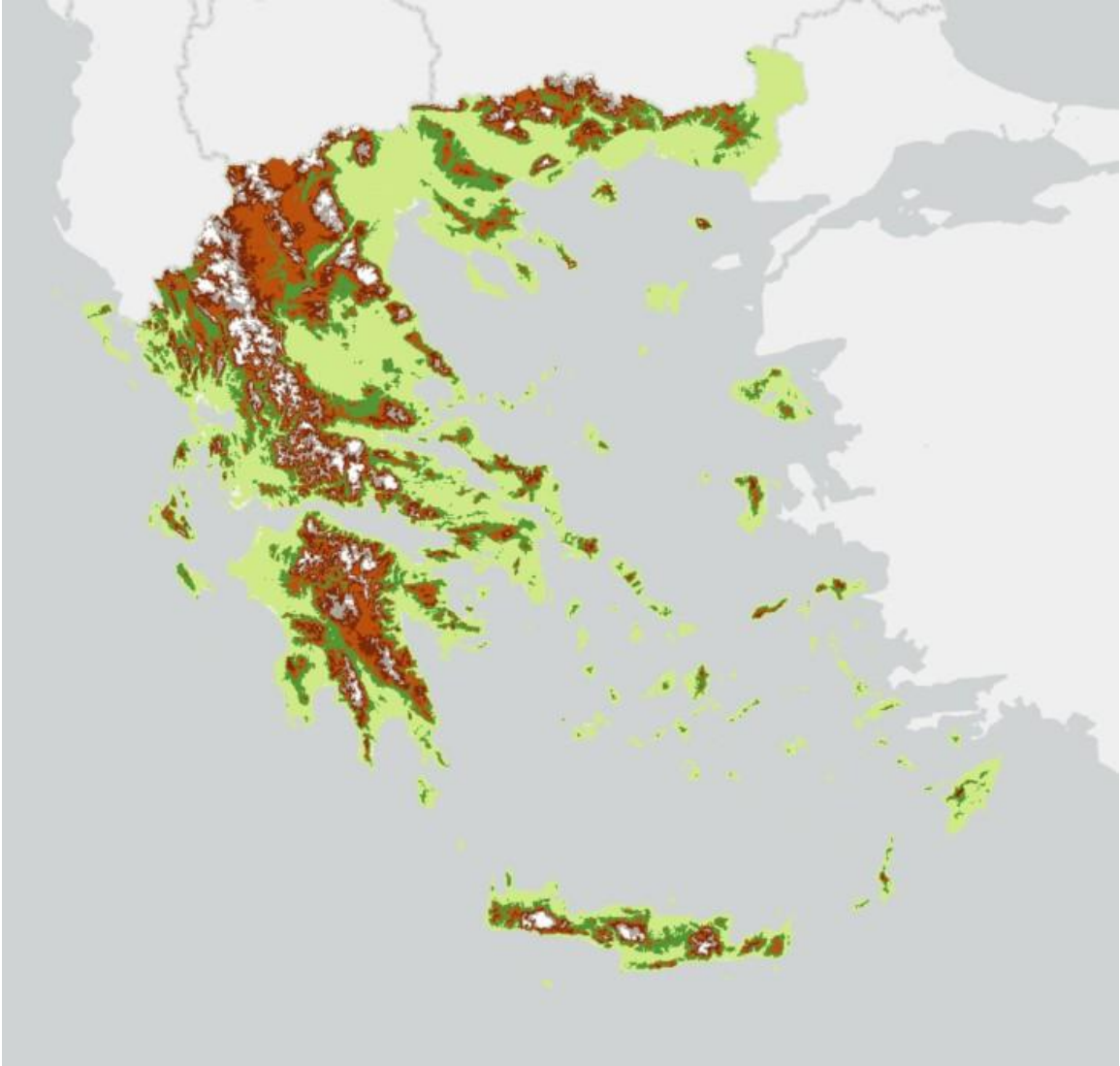
Για τα σημεία ενάρξεων την περίοδο 2020-2024 υπολογίστηκε σε ποια κατηγορία και υποκατηγορία χρήσης γης ταυτίζονταν χωρικά και καταχωρήθηκαν σαν επιπλέον πληροφορία στον περιγραφικό πίνακα για τις ενάρξεις. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν σαν ανεξάρτητη μεταβλητή στο μοντέλο πρόβλεψης.



Χάρτης 1 Χρήσεις γης Copernicus Land Cover 2018

2.1.3. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM)

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους προέρχεται επίσης από την υπηρεσία Copernicus και τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος και καλύπτει όλη την έκταση της Ευρώπης, ενώ υπάρχει και διαθέσιμη και η παγκόσμια κάλυψη. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιήθηκε είναι σε μορφή raster, έχει ανάλυση 25 μέτρα με κάθετη ακρίβεια +/- 7 μέτρα. Έχει χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί το υψόμετρο και η κλίση του εδάφους ανά σημείο έναρξης, αυτές οι τιμές έχουν χρησιμοποιηθεί και στο μοντέλο πρόβλεψης ως ανεξάρτητη μεταβλητή. (European Environment Agency, 2016)



Χάρτης 2 Υψόμετρο από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους.



Χάρτης 3 Κλίση εδάφους από ψηφιακό μοντέλο εδάφους

2.1.4. Πυκνότητα Πληθυσμού

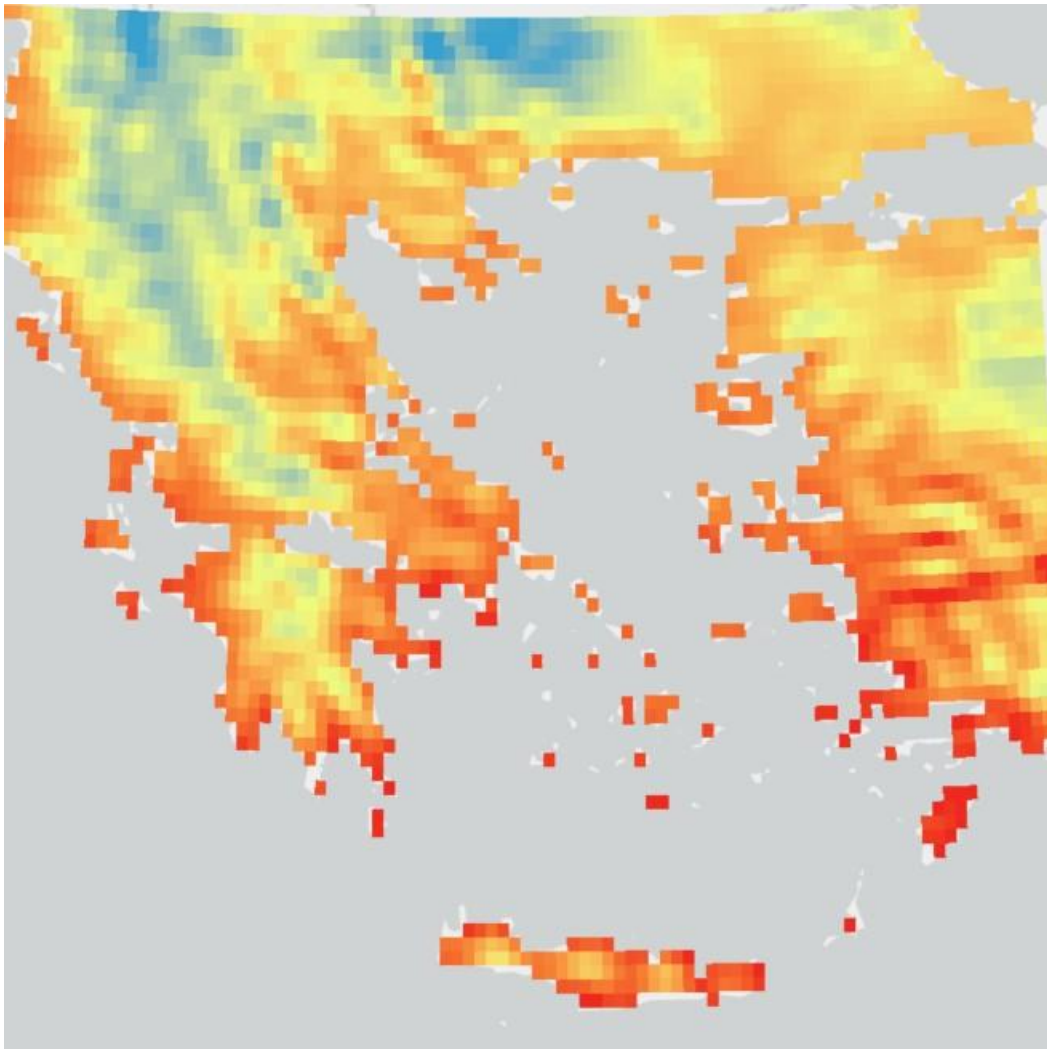
Η πυκνότητα πληθυσμού είναι raster από την συλλογή Living Atlas. Αποτυπώνει τους κατοίκους ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. Το επίπεδο πληροφορίας για την πυκνότητα πληθυσμού εκτιμά την ετήσια πυκνότητα σε πλέγμα (grid) από τα έτη 2000-2020 χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Top-down unconstrained method με εκτιμά τον πληθυσμό ανά κελί του πλέγματος με τη χρήση του μοντέλου Random Forest-based. (WorldPop, Esri, 2023)



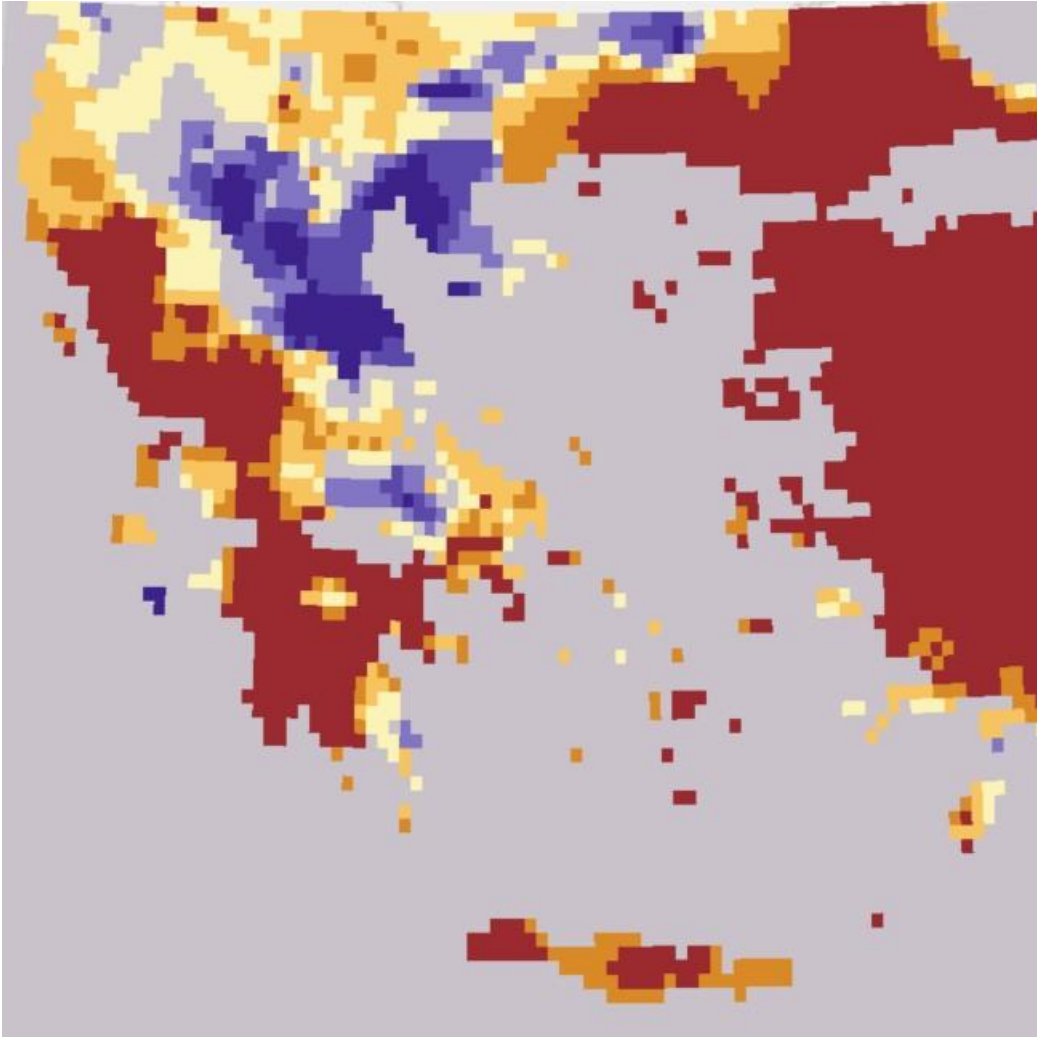
Χάρτης 4 Πυκνότητα πληθυσμού ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο

2.1.5. Κλιματικά δεδομένα

Τα κλιματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από το σύστημα επανάλυσης ERA5 του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (ECMWF), το οποίο παρέχει συνεκτικά, χωρικά συνεχόμενα και χρονικά αναλυτικά μετεωρολογικά δεδομένα. Από το σύνολο των διαθέσιμων μεταβλητών αξιοποιήθηκαν η μέση θερμοκρασία αέρα και ο δείκτης τυποποιημένης βροχόπτωσης (Standardized Precipitation Index-SPI). Η μέση θερμοκρασία αποτελεί βασικό παράγοντα που επηρεάζει την ξηρότητα της καύσιμης ύλης και τη συμπεριφορά της φωτιάς, ενώ ο SPI χρησιμοποιείται ευρέως για την ποσοτικοποίηση των συνθηκών ξηρασίας, οι οποίες σχετίζονται με αυξημένη πιθανότητα εκδήλωσης και εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών. Η ενσωμάτωση των κλιματικών παραμέτρων επιτρέπει τη συσχέτιση των ενάρξεων πυρκαγιών με τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες. (ERA5)



Χάρτης 5 Μέση θερμοκρασία αέρα



Χάρτης 6 Τυποποιημένος δείκτης κατακρήμνισης (SPI)

2.2. Μεθοδολογία Ανάλυσης

2.2.1. Επεξεργασία Δεδομένων

2.2.1.1. Οργάνωση δεδομένων

Τα δεδομένα των ενάρξεων των δασικών πυρκαγιών για την περίοδο 2000-2024 συλλέχθηκαν σε μορφή πινάκων, για την επεξεργασία τους στο περιβάλλον των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών κρίθηκε απαραίτητη η επεξεργασία των πινάκων για την ομογενοποίηση και καθαρότητά τους πριν την ανάλυση

Η διαδικασία περιλάμβανε:

- Έλεγχο και καθαρισμό των τιμών, όπως αφαίρεση κενών ή εσφαλμένων εγγραφών.
- Μετατροπή των πεδίων ημερομηνίας σε ενιαία μορφή (ηη/μμ/εε ωω:λλ), και υπολογισμός σε ξεχωριστά πεδία ώστε να είναι δυνατή η ομαδοποίηση ανά έτος, μήνα, ημέρα, ώρα.
- Μετατροπή αριθμητικών πεδίων σε κατάλληλους τύπους δεδομένων για να μπορέσουν να γίνουν οι υπολογισμοί
- Ενοποίηση ονομασιών υπηρεσιών σε όποιες εγγραφές υπήρχαν διαφοροποιήσεις
- Προσθήκη βοηθητικών πεδίων, μοναδικών Ids

Οι πίνακες για την περίοδο 2000-2019 εισήχθησαν στον ArcGIS Pro σε μορφή πινάκων βάσης (feature tables), ενώ για την περίοδο 2020-2024 λόγω της ακριβής θέσης που παρέχονταν σε συντεταγμένες x,y μετατράπηκαν σε σημειακό επίπεδο (feature points).

2.2.1.2. Δημιουργία πολυγώνων υπηρεσιών

Για την παρουσίαση των ενάρξεων στον χάρτη δημιουργήθηκαν πολύγωνα ανά υπηρεσία ώστε να υπολογιστεί το πλήθος των ενάρξεων και το σύνολο της καμένης έκτασης και να παρουσιαστούν ανά τετραετία σε διαγράμματα. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος που δημιουργήθηκαν τα πολύγωνα αυτά.

Αρχικά με βάση τα σημεία των ενάρξεων την περίοδο 2020-2024 δημιουργήθηκαν πολύγωνα Thiessen (Voronoi), τα οποία οριοθετούν τη θεωρητικά επικρατέστερη περιοχή επιρροής κάθε υπηρεσίας. Με το εργαλείο clip τα πολύγωνα αυτά κοπήκαν στα όρια της ελληνικής επικράτειας και της ακτογραμμής.

Παράλληλα για την περίοδο 2000-2019, οι πίνακες δεδομένων των ενάρξεων εισήχθησαν στο περιβάλλον του ArcGIS Pro με τη μορφή πινάκων στη βάση δεδομένων. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε συσχέτιση (relate) μεταξύ των πολυγώνων Thiessen και των πινάκων των ενάρξεων με βάση το πεδίο «υπηρεσία», με σχέση ένα προς πολλά (one to many). Η διαδικασία αυτή είχε ως αποτέλεσμα να δημιουργηθούν πολύγωνα που αντιπροσωπεύουν την κατά προσέγγιση την πιθανή περιοχή εκδήλωσης κάθε συμβάντος για την περίοδο 2000-2019.

Τα πολύγωνα αυτά στη συνέχεια μετατράπηκαν σε σημεία για να ενωθούν με την ενάρξεις της περιόδου 2020-2024 ώστε να δημιουργηθεί ένα ενιαίο επίπεδο (σημειακό) για την χρονική ανάλυση των πυρκαγιών στο σύνολο της περιόδου 2000-2024.

Για την ποσοτικοποίηση της δραστηριότητας ανά πυροσβεστική υπηρεσία για το σύνολο της χρονικής περιόδου, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο summarize within και υπολογίστηκε για κάθε πολύγωνο υπηρεσίας (Thiessen) το πλήθος των ενάρξεων και η συνολική καμένη έκταση σε ετήσια βάση.

Για την καλύτερη σύγκριση μεταξύ περιόδων, τα δεδομένα ομαδοποιήθηκαν ανά τετραετία και υπολογίστηκαν επιπλέον οι αποκλίσεις από το μέσο όρο τόσο για το πλήθος των ενάρξεων όσο και για τη συνολική έκταση. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε δια-δραστικό χάρτη στον ArcGIS Online, όπου για κάθε υπηρεσία προβάλλονται δυναμικά τα αντίστοιχα διαγράμματα.

2.2.1.3. Εμπλουτισμός δεδομένων περιόδου 2020-2024

Για της ενάρξεις της περιόδου 2020-2024 όπου υπήρχαν διαθέσιμες οι ακριβείς συντεταγμένες, ήταν δυνατός ο εμπλουτισμός των πεδίων με πρόσθετες χωρικές και περιβαλλοντικές μεταβλητές, που επέτρεψε την ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν την εκδήλωση των πυρκαγιών και την εφαρμογή του μοντέλου πρόβλεψης επικινδυνότητας.

Σε αυτό το στάδιο με τη χρήση του χωρικού εργαλείου ανάλυσης extract multi values to points, σε κάθε σημείο προστέθηκε το αντίστοιχο πεδίο και υπολογίστηκε η τιμή των παρακάτω χωρικών επιπέδων (raster):

- Χρήσεις γης (Corine Land Cover): προσδιορίστηκε ο κωδικός χρήσης γης στο σημείο έναρξης,
- Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM): εξήχθησαν οι τιμές για την κλίση του εδάφους (slope) και του υψόμετρου (elevation),
- Χωρικό επίπεδο πληθυσμιακής πυκνότητας: υπολογίστηκε η πληθυσμιακή πυκνότητα (κατ/ χλμ²)

- Δείκτης κατακρήμνισης και μέσης θερμοκρασίας όπου αντλήθηκαν οι τιμές των αντίστοιχων κλιματικών raster.

Τα παραπάνω δεδομένα συσχετίστηκαν με τα σημεία πυρκαγιών, δημιουργώντας ένα ενιαίο σύνολο δεδομένων με γεωγραφικά, περιβαλλοντικά και επιχειρησιακά χαρακτηριστικά. Το τελικό σύνολο χρησιμοποιήθηκε για

1. την δημιουργία θεματικών χαρτών και διαγραμμάτων και τη δημιουργία διαδραστικού χάρτη και διαγραμμάτων τύπου dashboard όπου απεικονίζεται η χωρική και χρονική κατανομή των ενάρξεων και
2. ως είσοδος (input) στο μοντέλο πρόβλεψης του αλγόριθμου random forest, που παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Μεταβλητή	Τύπος	Πηγή	Περιγραφή
Καμένη έκταση	Πίνακας	Πυροσβεστική Υπηρεσία	Έκταση πυρκαγιάς σε εκτάρια (ha)
Υψόμετρο	Raster	Ψηφιακό μοντέλο εδάφους	Υψόμετρο σε μέτρα
Κλίση	Raster	Ψηφιακό μοντέλο εδάφους	Κλίση σε μοίρες
Χρήσης γης	Raster	Corine Land Cover	Κατηγορία κάλυψης γης
Πυκνότητα Πληθυσμού	Raster	Worldpop	Κάτοικοι ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο
Δείκτης Κατακρήμνισης	Raster	Copernicus ERA5	Δείκτης κατακρήμνισης
Μέση θερμοκρασία	Raster	Copernicus ERA5	Μέση θερμοκρασία σε °C

Πίνακας 2 Μεταβλητές που εμπλουτίστηκαν στα δεδομένα των ενάρξεων

2.2.2. Μεθοδολογία Ανάλυσης

Η ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε δύο επίπεδα, η χρονική ανάλυση των ενάρξεων ήταν δυνατή για το σύνολο της χρονικής περιόδου 2000-2024. Για την χρονική περίοδο 2000-2019 δεν ήταν δυνατό να γίνει συσχέτιση με γεωγραφικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά όπως έγινε για την χρονική περίοδο 2020-2024, όπου υπήρχαν οι ακριβείς συντεταγμένες. Στόχος της ανάλυσης ήταν η ανάδειξη προτύπων (μοτίβο) εποχικότητας, χρονικής μεταβλητότητας και σχέσεων με γεωγραφικούς παράγοντες (κλίση εδάφους, υψόμετρο), ανθρωπογενείς (πυκνότητα πληθυσμού, κάλυψη γης) και κλιματικούς (δείκτης κατακρήμνισης, μέση θερμοκρασία).

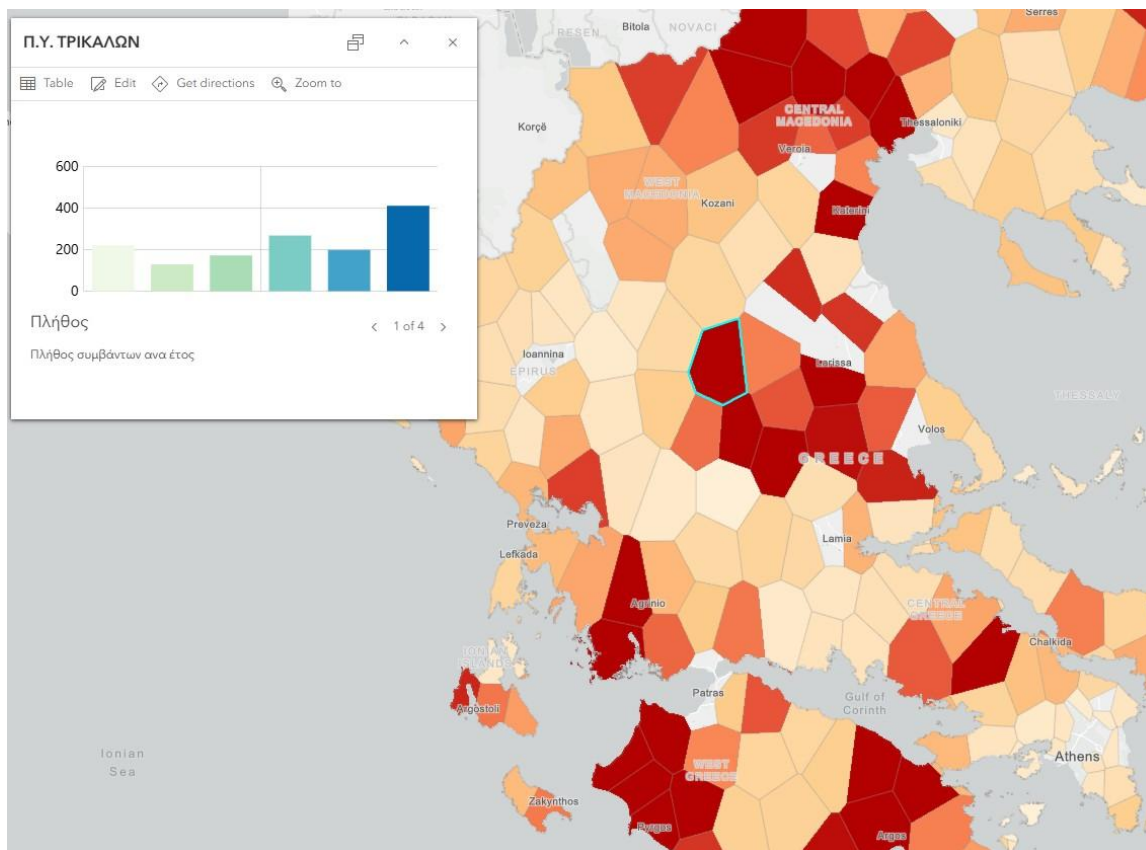
2.2.2.1. Χρονική Ανάλυση

Για τη χρονική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία Create Charts του ArcGIS Pro, με τα οποία δημιουργήθηκαν ραβδογράμματα (bar charts), ημερολογιακοί χάρτες πυκνότητας (heat calendars) και κυκλικά διαγράμματα χρόνου (data clocks). Οι αναλύσεις αυτές επέτρεψαν την παρουσίαση των της συχνότητας και εποχικότητας των πυρκαγιών ανά έτος, μήνα, ημέρα και ώρα και την αναγνώριση των χρονικών περιόδων αυξημένων συμβάντων.

Για την περίοδο 2000-2019, λόγω της έλλειψης ακριβών συντεταγμένων, δημιουργήθηκαν τα πολύγωνα Thiessen που περιγράφονται χωρίτερα για τα οποία υπολογίστηκε το πλήθος των

συμβάντων εντός των ορίων τους, το σύνολο της καμένης έκτασης, και οι αποκλίσεις από το μέσο όρο για το πλήθος και την έκταση αφού ομαδοποιήθηκαν ανά τετραετία.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε web map όπου επιλέγοντας το πολύγωνο της υπηρεσίας εμφανίζεται το παράθυρο όπου ο χρήστης μπορεί να εναλλάξει τα αντίστοιχα δυναμικά διαγράμματα.



Εικόνα 2 Στιγμιότυπο οθόνης από τον διαδραστικό χάρτη με τα πολύγωνα των υπηρεσιών

2.2.2.2. Ανάλυση δεδομένων χρονική περίοδο 2020-2024

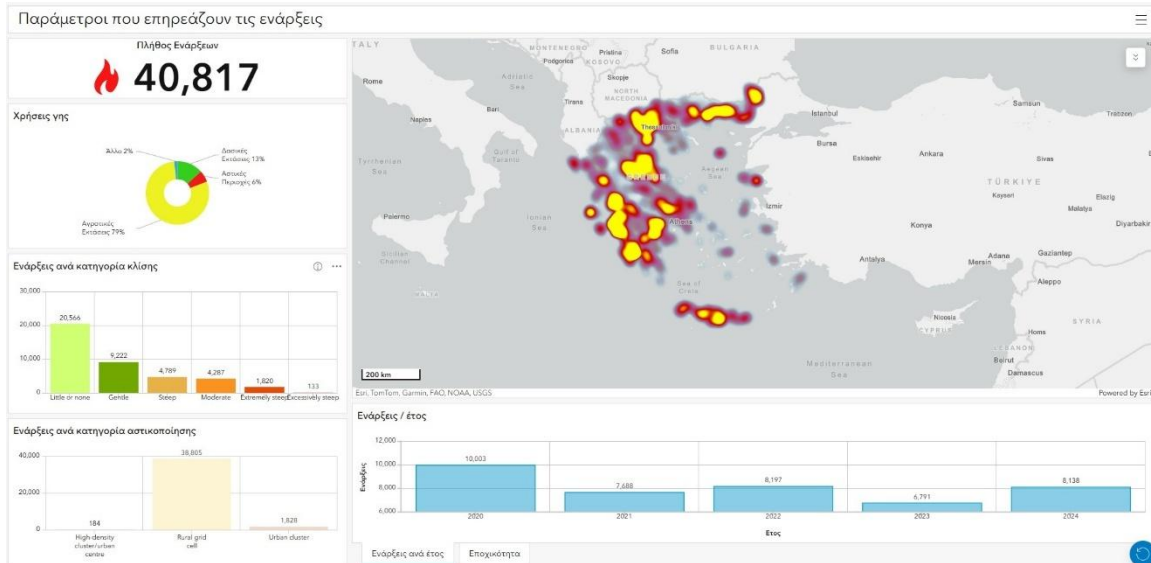
Για τις ενάρξεις των δασικών πυρκαγιών της περιόδου 2020-2024 λόγω της διαθεσιμότητας των ακριβείς συντεταγμένων ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί πιο λεπτομερής ανάλυση και συσχέτιση με γεωγραφικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά χαρακτηριστικά.

Από τις τιμές που εξήχθησαν από τα αντίστοιχα raster (υψόμετρο, κλίση, πυκνότητα πληθυσμού, δείκτης κατακρήμνισης, μέση θερμοκρασία και χρήσεις γης) δημιουργήθηκαν θεματικοί χάρτες και διαγράμματα που βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση της σχέσης μεταξύ αυτών των παραγόντων και των ενάρξεων.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε σε δια-δραστικό πίνακα ελέγχου (dashboard) στον ArcGIS Online ο οποίος περιλαμβάνει:

- Εποχικότητα πυρκαγιών ανά έτος και μήνα (bar charts)
- Κατηγορίες κλίσης εδάφους και αστικοποίησης (bar charts)
- Κύριες κατηγορίες χρήσης γης (donut chart)
- Χάρτης (με τα σημειακά επίπεδα με συμβολισμό από τις τιμές των raster και heat map πυκνότητας πλήθους των σημείων ενάρξεων)

Όλα τα γραφήματα συνδέονται δια-δραστικά με το χάρτη, επιτρέποντας τη δυναμική ανανέωση του χάρτη και των διαγραμμάτων ανάλογα με τα φίλτρα επιλογής του χρήστη. Η απεικόνιση αυτή καθιστά τη διερεύνηση των δεδομένων πιο κατανοητή και συμβάλλει στον εντοπισμό προτύπων.



Εικόνα 3 Στιγμιότυπο οθόνης από την εφαρμογή θέασης τύπου dashboard

2.3. Μοντέλο Πρόβλεψης

Για τη διερεύνηση της συσχέτισης των γεωγραφικών χαρακτηριστικών και των κοινωνικών και μετεωρολογικών παραμέτρων με την εκδήλωση δασικών πυρκαγιών και την εκτίμηση κινδύνου εκδήλωσης συμβάντος, εφαρμόστηκε μοντέλο μηχανικής μάθησης (machine learning) με τη χρήση του αλγόριθμου Random Forest (τυχαίων δασών). Ο αλγόριθμος αυτός επιλέχθηκε λόγω της ικανότητας του να χειρίζεται μη γραμμικές σχέσεις και πολυδιάστατα δεδομένα, καθώς και για την ανθεκτικότητα του απέναντι σε υπερ-προσαρμογή (overfitting).

2.3.1. Προετοιμασία δεδομένων

Για τη δημιουργία του μοντέλου πρόβλεψης αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα των ενάρξεων των δασικών πυρκαγιών της περιόδου 2020-2024 στα οποία είχαν ήδη ενσωματωθεί οι γεωγραφικές μεταβλητές (υψόμετρο, κλίση, χρήσεις γης, πυκνότητα πληθυσμού, δείκτης κατακρήμνισης και μέση θερμοκρασία), όπως έχει αναλυθεί νωρίτερα.

Για τη δημιουργία του συνόλου εκπαίδευσης του μοντέλου απαιτείται η ύπαρξη τόσο θετικών δειγμάτων (σημεία ενάρξεων) όσο και αρνητικών (σημεία χωρίς ενάρξεις). Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε σύνολο τυχαίων σημείων ελέγχου (absence data) με τη χρήση του εργαλείου create spatial sampling locations στο περιβάλλον του ArcGIS Pro.

Αρχικά δημιουργήθηκαν τυχαία σημεία στον χώρο με όμοια έκταση με αυτή του συνόλου των πραγματικών ενάρξεων και στη συνέχεια αφαιρέθηκαν τα σημεία που αλληλεπικάλυπταν (intersect) σε ακτίνα 50 μέτρων από τα πραγματικά σημεία ώστε να αποφευχθεί η χωρική συσχέτιση. Το τελικό σύνολο των δεδομένων περιλάμβανε 40.817 θετικά δείγματα, δηλαδή τα πραγματικά σημεία ενάρξεων (περίπου 40% του συνόλου) και 62.673 αρνητικά, χωρίς έναρξη

δηλαδή (περίπου 60% του συνόλου), με σύνολο δηλαδή 103.490 δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του μοντέλου.

2.3.2. Εκπαίδευση και εφαρμογή του μοντέλου

Το μοντέλο εκπαιδεύτηκε σε περιβάλλον ArcGIS Pro με τη χρήση του forest-based classification.

Ως ανεξάρτητες μεταβλητές (predictors) χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές από τα raster που είχαν υπολογιστεί νωρίτερα και αντιστοιχούν σε κάθε σημείο:

- Υψόμετρο
- Κλίση εδάφους
- Χρήσεις γης
- Πυκνότητα πληθυσμού
- Δείκτης κατακρήμνισης
- Μέση θερμοκρασία

Η εξαρτημένη μεταβλητή (target) είναι η δυαδική τιμή «έναρξη πυρκαγιάς» (1) ή «χωρίς έναρξη» (0).

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά τέσσερις διαφορετικές δοκιμές (runs) του μοντέλου, μεταβάλλοντας κάθε φορά τις παραμέτρους εκπαίδευσης, όπως:

- Τον αριθμό των δέντρων (number of trees)
- Το μέγεθος των δειγμάτων εκπαίδευσης (training sample size) και
- Το ποσοστό των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται ανά κόμβο (max features)

Η κάθε εκπαίδευση αξιολογήθηκε ως προς την απόδοσή της με βάση τα μέτρα ακρίβειας (accuracy), ευαισθησίας (sensitivity), τα out-of-bag errors και το validation του μοντέλου που εξάγονται αυτόματα από το εργαλείο.

2.3.3. Αξιολόγηση απόδοσης και επιλογής μοντέλου

Η αξιολόγηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με βάση το confusion matrix και τα στατιστικά μέτρα απόδοσης του prediction performance που δημιουργούνται από το εργαλείο. Από τα αποτελέσματα του εργαλείου μπορεί να αξιολογηθεί επίσης η συνολική ακρίβεια (accuracy), η ευαισθησία (sensitivity), το F1-score Και ο συντελεστής Matthews (MCC) για την εκτίμηση της συνολικής συσχέτισης μεταξύ προβλεπόμενων και πραγματικών τιμών.

Επίσης αξιοποιήθηκε η δυνατότητα του αλγόριθμου να υπολογίσει τη σχετική σημασία των ανεξάρτητων μεταβλητών (variable importance), ώστε να εκτιμηθεί η συνεισφορά κάθε παράγοντα στη διαμόρφωση της τελικής πρόβλεψης.

Τέλος, εξετάστηκε η συγκλίνουσα συμπεριφορά του μοντέλου μέσω της μεταβολής του Mean Square Error (MSE) σε σχέση με τον αριθμό των δέντρων (number of trees), προκειμένου να διαπιστωθεί το σημείο σταθεροποίησης της ακρίβειας και η αποδοτικότητα του μοντέλου.

2.3.4. Παραγωγή χάρτη εκτίμησης κινδύνου έναρξης

Για την παραγωγή του τελικού χάρτη εκτίμησης κινδύνου έναρξης δασικής πυρκαγιάς, το μοντέλο τυχαίων δέντρων επανεκτελέστηκε με τη χρήση του εργαλείου forest-based classification. Σε αυτή τη φάση χρησιμοποιήθηκε το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων χωρίς να γίνει διαχωρισμός σε σύνολα εκπαίδευσης και επαλήθευσης, προκειμένου να αξιοποιηθεί στο έπακρο η πληροφορία για την δημιουργία του τελικού προβλεπόμενου επιπέδου.

Χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι του μοντέλου που είχε προηγουμένως αξιολογηθεί ως το πλέον αποδοτικό, χωρίς ενδείξεις υπερπροσαρμογής (overfitting).

Ως είσοδος ορίστηκε το σύνολο των σημείων πυρκαγιών και των τυχαίων σημείων (θετικά και αρνητικά δείγματα), ενώ ως output επιλέχθηκε τύπος feature class, ώστε το εργαλείο να επιστρέφει προβλέψεις για τα ίδια τα σημεία εισόδου.

Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν μια στήλη στα σημεία με την πιθανότητα πρόβλεψης (prediction probability) και μια στήλη με τη δυαδική τιμή πρόβλεψης 0 για τα σημεία που ταξινομήθηκαν ως «χωρίς έναρξη» και 1 για τα σημεία που ταξινομήθηκαν με «πιθανή έναρξη πυρκαγιάς».

Οι προβλέψεις αυτές απεικονίστηκαν χωρικά παράγοντας ένα διανυσματικό επίπεδο πληροφορίας με την εκτιμώμενη επικινδυνότητα έναρξης και παρουσιάζεται σε διαδραστικό χάρτη web map στον ArcGIS Online.

3. Αποτελέσματα

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης και παρουσίασης των ενάρξεων των δασικών πυρκαγιών. Χωρίζονται ανάλογα με την περίοδο αλλά ουσιαστικά ο διαχωρισμός είναι ανάλογα με την πληροφορία των πινάκων των δασικών πυρκαγιών που καθόρισε και τη μεθοδολογία. Οπότε για το σύνολο της χρονικής περιόδου έγινε ανάλυση κυρίως χρονική αλλά και σε επίπεδο πολυγώνων.

Για την τελευταία 5ετία, την περίοδο 2020-2024, λόγω της ακριβής θέσεως με συντεταγμένες, ήταν δυνατός ο συσχετισμός με άλλες παράγοντες όπως εδαφικούς, ανθρωπογενείς, μετεωρολογικούς, όπως επίσης και η δημιουργία διαδραστικού πίνακα (dashboard) που συνδυάζει διαγράμματα και χάρτη για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το μοντέλο πρόβλεψης επικινδυνότητας έναρξης δασικής πυρκαγιάς.

3.1. Περίοδος 2000-2024

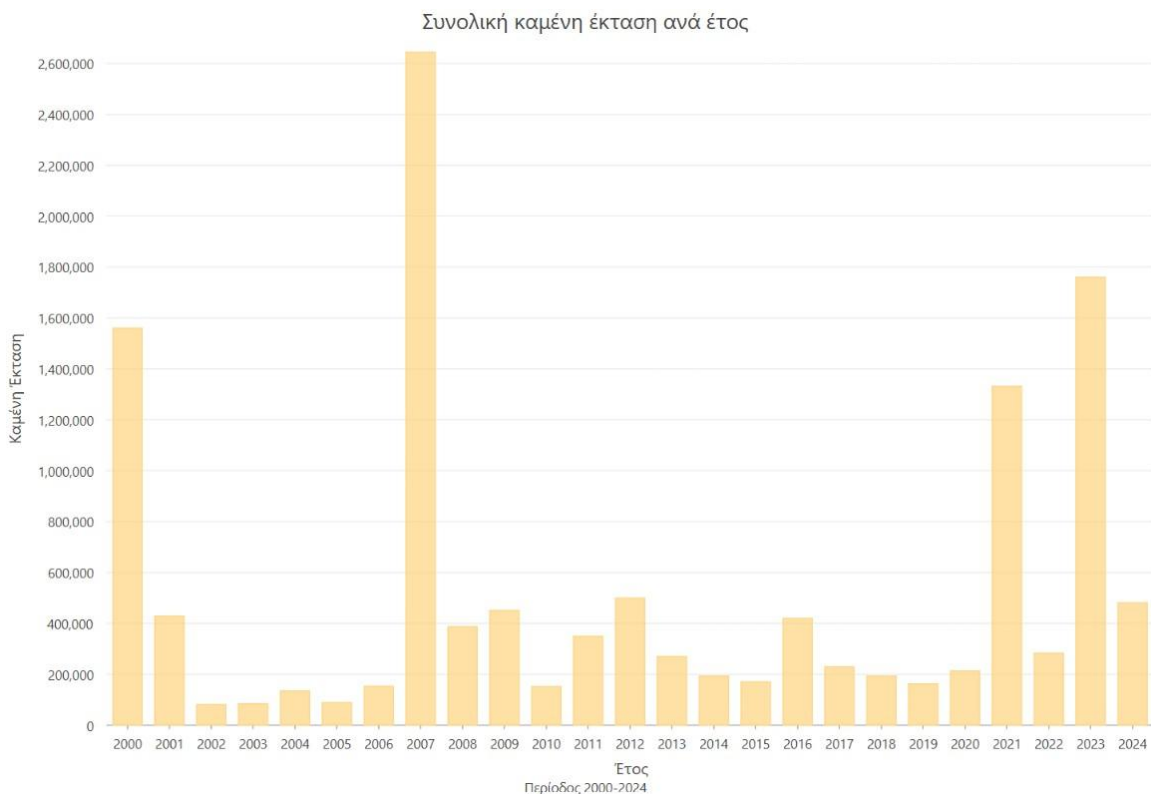
Για την χρονική διερεύνηση των ενάρξεων των δασικών πυρκαγιών χρησιμοποιήθηκε το σύνολο των δεδομένων της Π.Υ. που καλύπτει την χρονική περίοδο 2000-2024.

3.1.1. Αποτελέσματα χρονικής ανάλυση

Στο διάγραμμα φαίνεται το πλήθος ενάρξεων ανά έτος. Η μέγιστη τιμή είναι για το έτος 2001 με 15.303 ενάρξεις (+54% σε σχέση με τη μέση τιμή) ενώ η χαμηλότερη τιμή είναι το έτος 2014 με 6.828 ενάρξεις (-31% σε σχέση με τη μέση τιμή), λιγότερες δηλαδή από τις μισές αν συγκρίνουμε το έτος με τις περισσότερες και τις λιγότερες ενάρξεις. Με το σύνολο των ενάρξεων για όλα τα έτη να είναι 248.349.



Διάγραμμα 1 Πλήθος ενάρξεων ανά έτος για την συνολική περίοδο μελέτης 2000-2024.

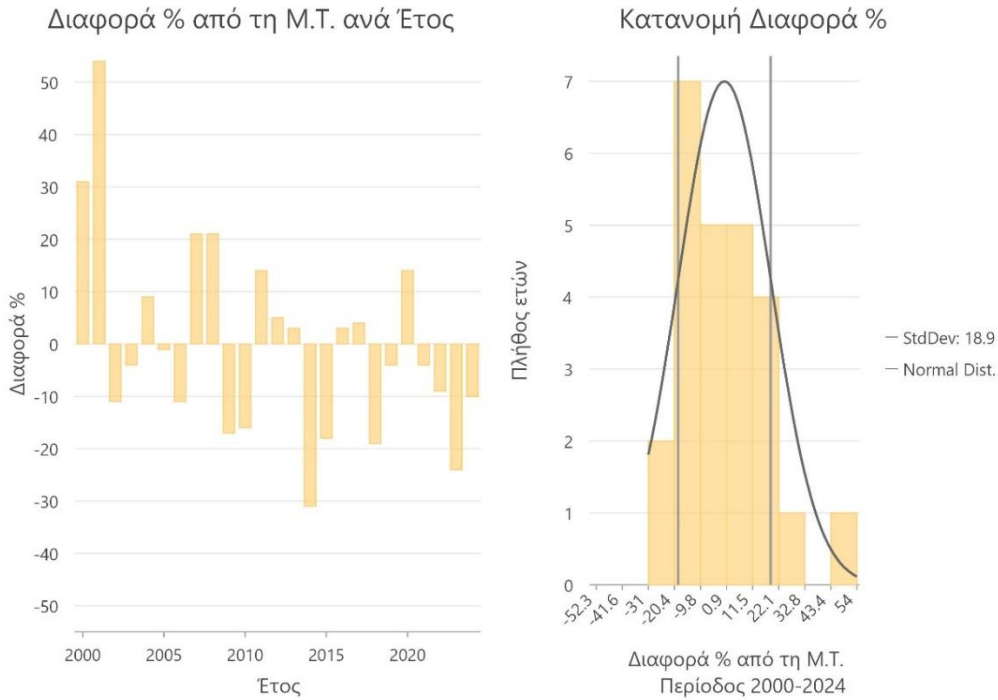


Διάγραμμα 2 Άθροισμα καμένων εκτάσεων (σπρέμματα) ανά έτος

Η ετήσια κατανομή της συνολικής καμένης έκτασης αναδεικνύει έντονες διακυμάνσεις μέσα στο χρονικό περιθώριο που εξετάζεται στη παρούσα μελέτη. Το 2007 καταγράφεται η μέγιστη τιμή της καμένης έκτασης, γεγονός που συνδέεται με τις εκτεταμένες καταστροφικές πυρκαγιές της Πελοποννήσου, οι οποίες είχαν σοβαρές περιβαλλοντικές, κοινωνικές αλλά και ανθρώπινες απώλειες. Ιδιαίτερα υψηλές τιμές παρατηρούνται επίσης το 2023, έτος κατά το οποίο εκδηλώθηκαν μεγάλης κλίμακας πυρκαγιές όπως η πυρκαγιά στην περιοχή του Έβρου. Τα έτη 2001 και 2021 επίσης παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένες εκτάσεις σε σχέση με το υπόλοιπο χρονικό φάσμα.

Αντίθετα άλλα έτη παρουσιάζουν σαφώς μικρότερη έκταση καμένων περιοχών, γεγονός που υποδεικνύει ότι η συνολική καμένη έκταση δεν κατανέμεται ομοιόμορφα στον χρόνο αλλά επηρεάζεται από ακραία επεισόδια μεγάλης έντασης.

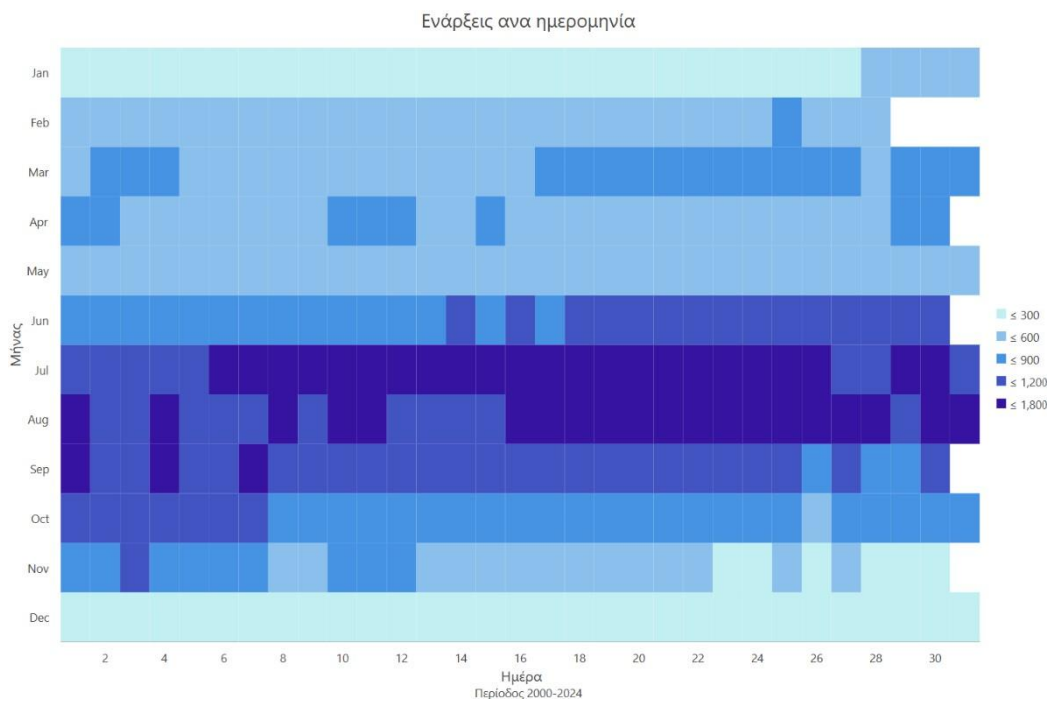
Η μέση τιμή είναι 9933.96 ενάρξεις ανά έτος και έτσι στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η διαφορά κάθε έτους από τη μέση τιμή. Από την κατανομή της ποσοστιαίας διαφοράς του πλήθους των συμβάντων ανά έτος, παρατηρούμε ότι τα περισσότερα έτη το εύρος των τιμών είναι από -20% έως +20% περίπου.



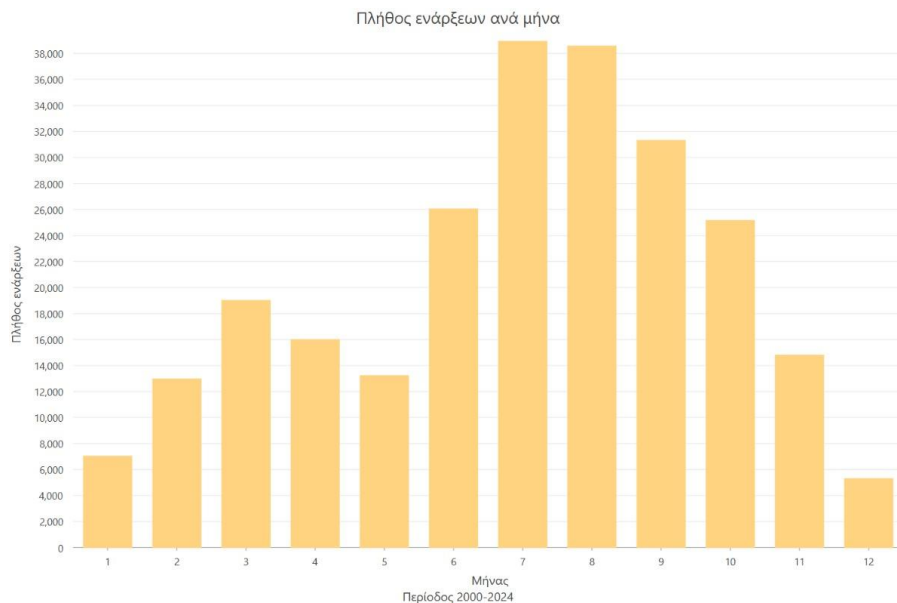
Διάγραμμα 3 Διαφορά % από τη Μ.Τ. ανά έτος

Στα επόμενα διαγράμματα μπορούμε να δούμε την περιοδικότητα των ενάρξεων, όπως ήταν αναμενόμενο τους χειμερινούς μήνες οι ενάρξεις είναι λιγότερες σε σχέση με τους θερινούς. Είναι ενδιαφέρον όμως να επισημανθεί ότι παρατηρείται αύξηση των συμβάντων μέσα Μαρτίου έως το τέλος του μήνα. Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι το πλήθος των ενάρξεων για την περίοδο μελέτης των 25 χρόνων τα συμβάντα είναι περισσότερα τον Σεπτέμβριο σε σχέση με τον Ιούνιο όπου είναι σχεδόν όσα και τον Οκτώβριο.

Ο μήνας με τα περισσότερα συμβάντα στο σύνολο της περιόδου μελέτης είναι ο Ιούλιος με 38.933 ενάρξεις και ακολουθεί ο Αύγουστος με 38.565 ενάρξεις. Ενώ ο μήνας με τις λιγότερες ενάρξεις είναι ο Δεκέμβριος με 5.306 ενάρξεις.

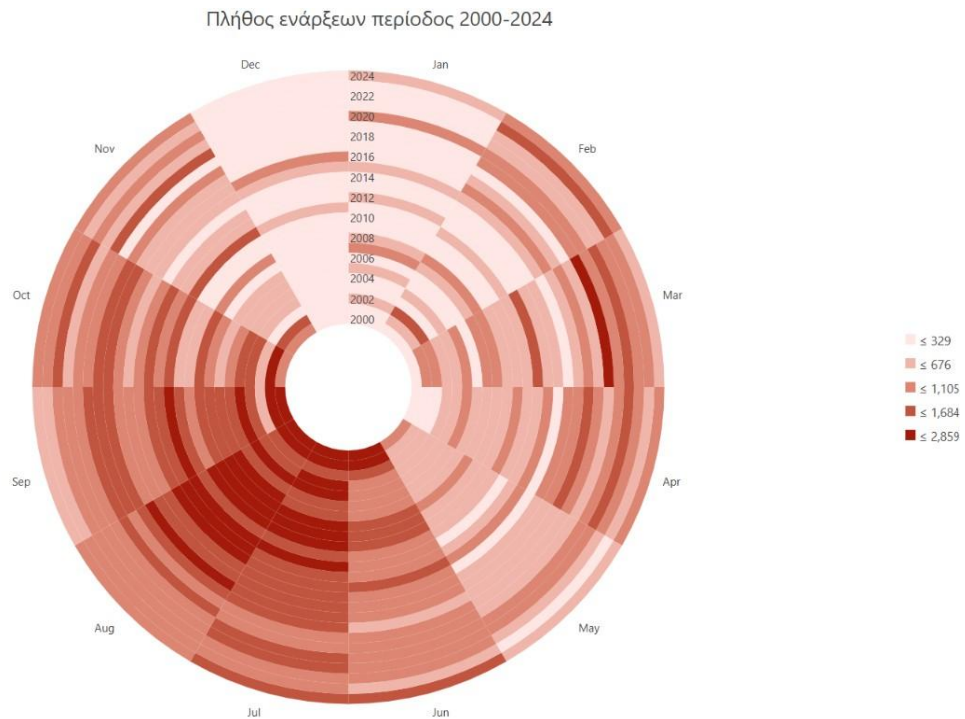


Διάγραμμα 4 Calendar heat πλήθους ενάρξεων ανά μέρα και μήνα για το σύνολο της περιόδου 2000-2024



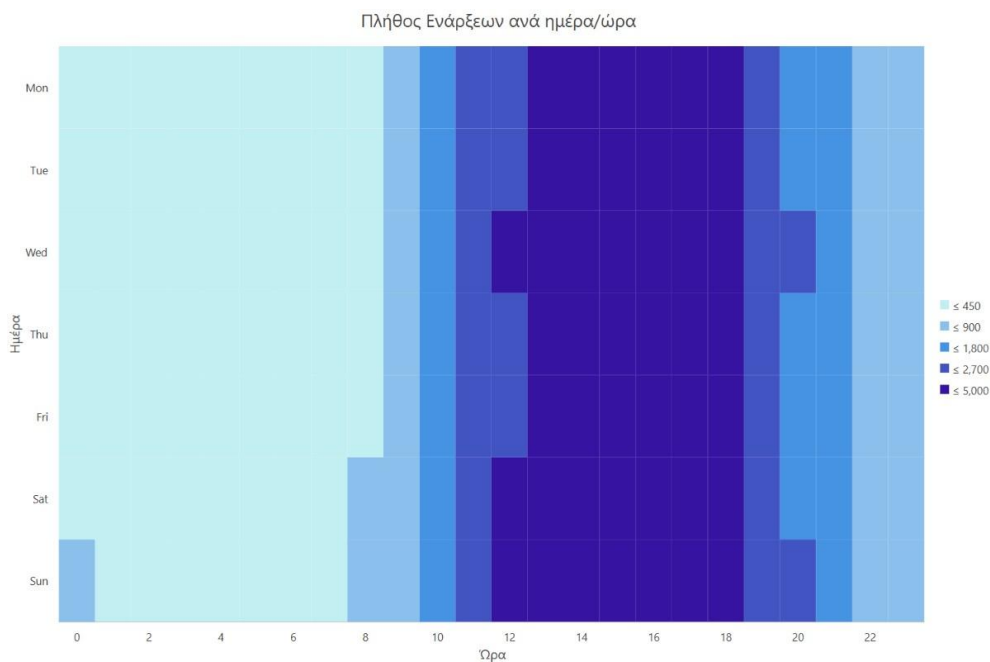
Διάγραμμα 5 Πλήθος ενάρξεων ανά μήνα

Στο διάγραμμα 4.5 φαίνεται για το σύνολο των δεδομένων το πλήθος των ενάρξεων ανά έτος και μήνα. Ο κάθε κύκλος αντιστοιχεί σε ένα έτος και το κάθε κομμάτι αντιστοιχεί στο μήνα του έτους. Σε αυτό το διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι πολλές ενάρξεις ειδικότερα τα πρώτα χρόνια μελέτης έως και το 2014 περίπου συγκεντρώνονται τους καλοκαιρινούς μήνες (Ιούλιο- Αύγουστο) ενώ άλλες χρονιές όπως το 2019 υπάρχουν πολλά συμβάντα το μήνα Μάρτιο.

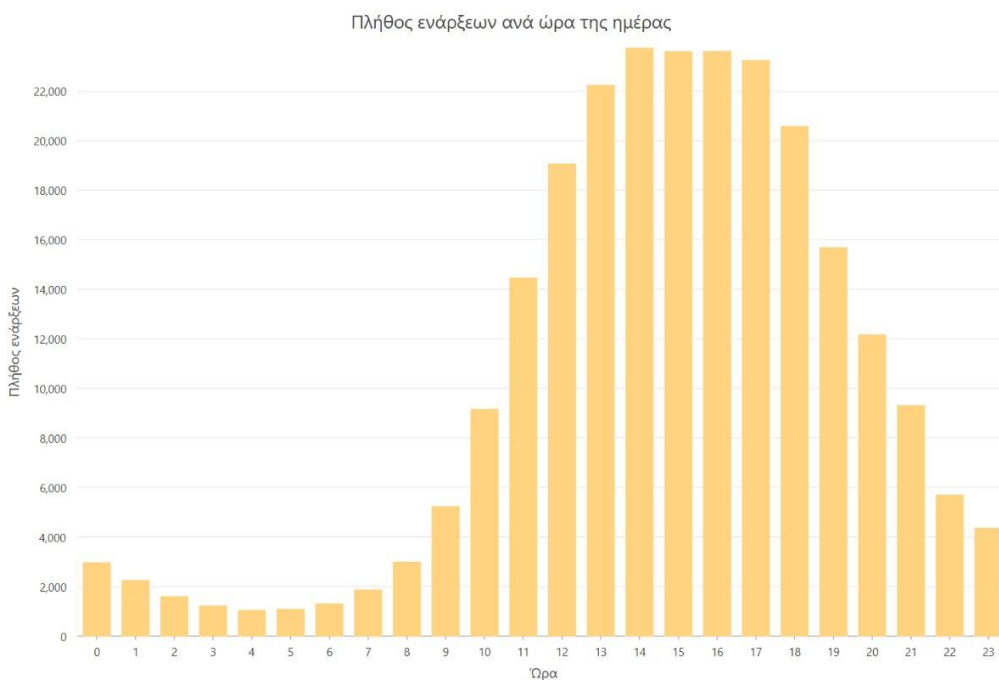


Διάγραμμα 6 Dataclock πλήθος ενάρξεων δασικών πυρκαγιών για το σύνολο των δεδομένων της περιόδου 2000-2024

Όσο αφορά το πλήθος των ενάρξεων σε σχέση με την μέρα και ώρα της εβδομάδας όπως φαίνεται στα διαγράμματα 4.6 και 4.7, όπως ήταν αναμενόμενο τα περισσότερα συμβάντα είναι κατά τη διάρκεια της ημέρας και κυρίως τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες μεταξύ 12.00 και 19.00 χωρίς να παρατηρείται κάποια διαφορά στην εποχικότητα. Η ίδια δηλαδή κατανομή εμφανίζεται τόσο για τους χειμερινούς όσο και για τους θερινούς μήνες σχετικά με την ώρα έναρξης των συμβάντων.



Διάγραμμα 7 Πλήθος ενάρξεων ανά ημέρα και ώρα της ημέρας. Περίοδος 2000-2024



Διάγραμμα 8 Πλήθος ενάρξεων ανά ώρα της ημέρας. Περίοδος 2000-2024

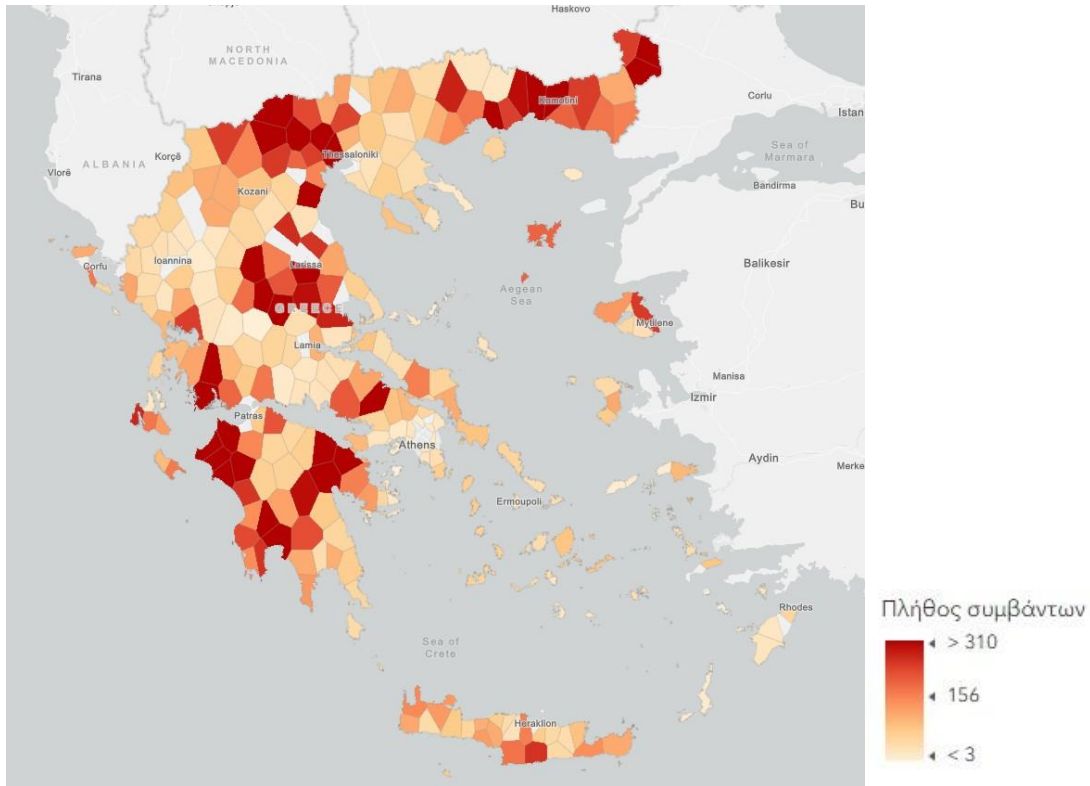
3.1.2. Πολύγωνα Υπηρεσιών

Για το σύνολο της χρονικής περιόδου 2000-2024 πραγματοποιήθηκε χωρική ομαδοποίηση των ενάρξεων δασικών πυρκαγιών με βάση τις διοικητικές υπηρεσίες, μέσω της δημιουργίας των πολυγώνων Thiessen. Για κάθε πολύγωνο υπολογίστηκαν το συνολικό πλήθος ενάρξεων που

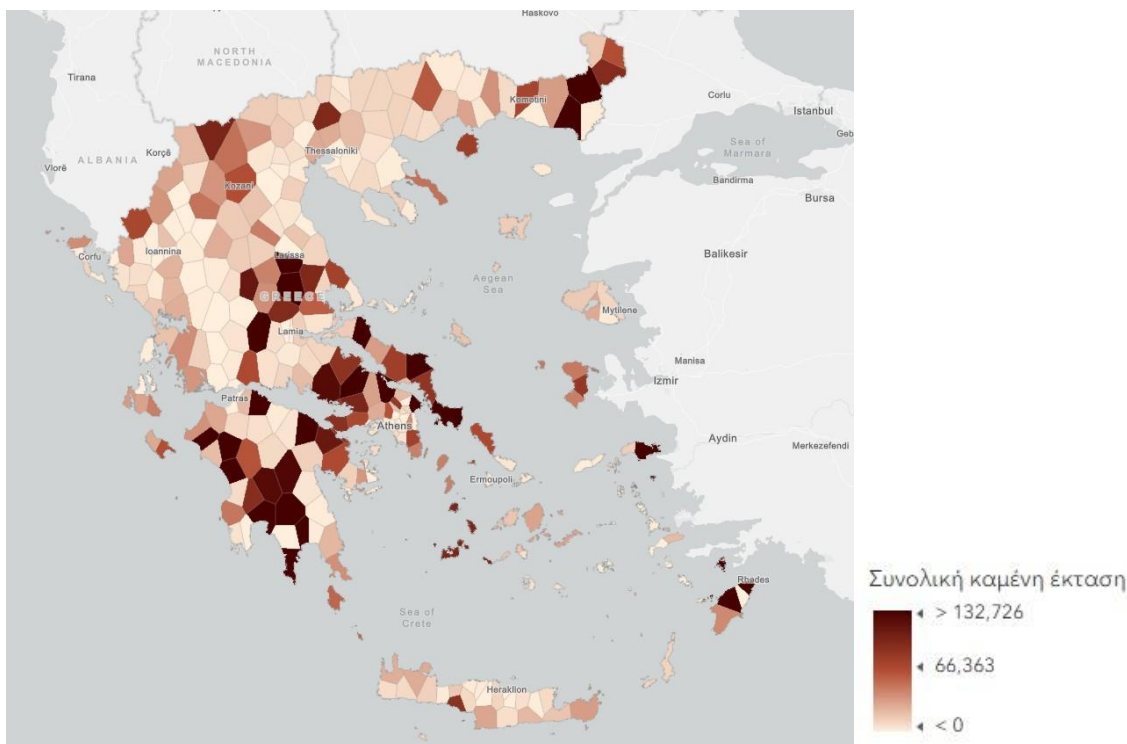
αντιστοιχούν στην εκάστοτε υπηρεσία και η συνολική καμένη έκταση, τα οποία στη συνέχεια αποτυπώθηκαν σε θεματικούς χάρτες.

Η σύγκριση των δυο αυτών μεταβλητών ανέδειξε ότι η χωρική κατανομή των ενάρξεων δεν ταυτίζεται απαραίτητα με τη χωρική κατανομή της καμένης έκτασης. Παρότι ορισμένες υπηρεσίες εμφανίζουν μεγάλο αριθμό συμβάντων, αυτό δε συνεπάγεται αντίστοιχα μεγάλες καμένες εκτάσεις. Αντίθετα, σε ορισμένες περιοχές παρατηρείται το φαινόμενο λίγες ενάρξεις να οδηγούν σε δυσανάλογα εκτεταμένες καμένες εκτάσεις.

Οι θεματικοί χάρτες που ακολουθούν, παρουσιάζουν τη χωρική κατανομή των δύο μεταβλητών και καταδεικνύουν τις διαφοροποιήσεις αυτές σε επίπεδο υπηρεσίας.



Χάρτης 3-1 Πλήθος ενάρξεων δασικών πυρκαγιών ανά υπηρεσία (2000-2024)



Χάρτης 3-2 Συνολική καμένη έκταση ανά υπηρεσία. (2000-2024)

3.1.3. Διαδραστικός χάρτης ανά Υπηρεσία

Για την πληρέστερη κατανόηση των χωρικών και χρονικών διαφοροποιήσεων στην εκδήλωση των δασικών πυρκαγιών, δημιουργήθηκε διαδραστικός χάρτης web map που απεικονίζει, για κάθε υπηρεσία, τα αποτελέσματα της ανάλυσης ανά τετραετία.

Για κάθε περίοδο τεσσάρων ετών υπολογίστηκαν και δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα ανά υπηρεσία για:

- το άθροισμα των ενάρξεων και
- τη συνολική καμένη έκταση
- την ποσοστιαία διαφορά από την μέση τιμή του πλήθους των ενάρξεων
- την ποσοστιαία διαφορά από τη μέση τιμή της καμένης έκτασης.

Ο χρήστης μπορεί να αλληλοεπιδρά με κάθε πολύγωνο υπηρεσίας και να προβάλει τα αντίστοιχα διαγράμματα.

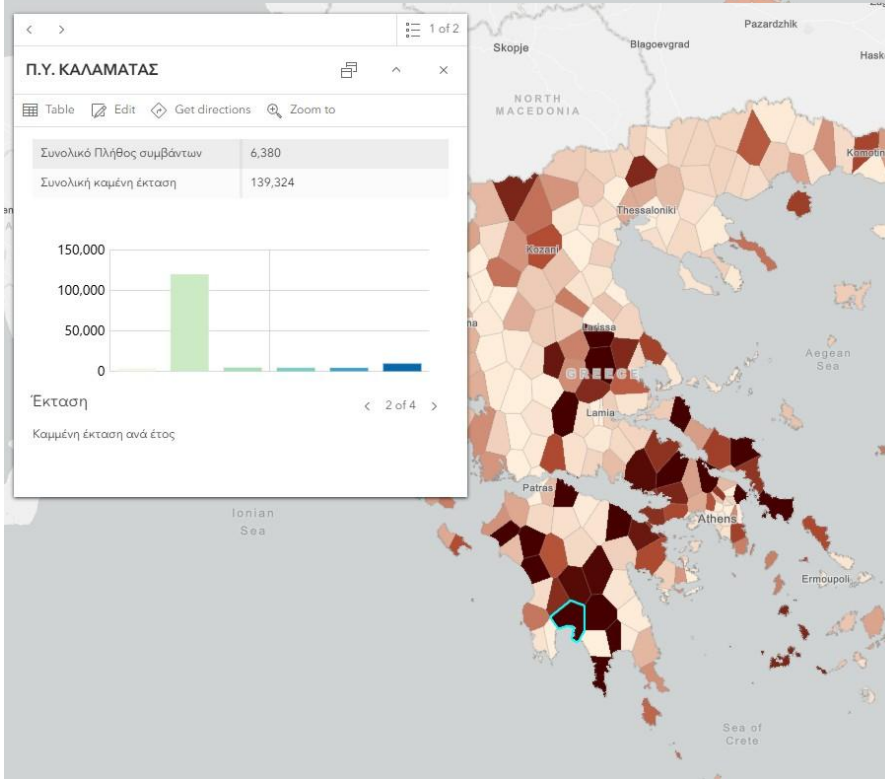
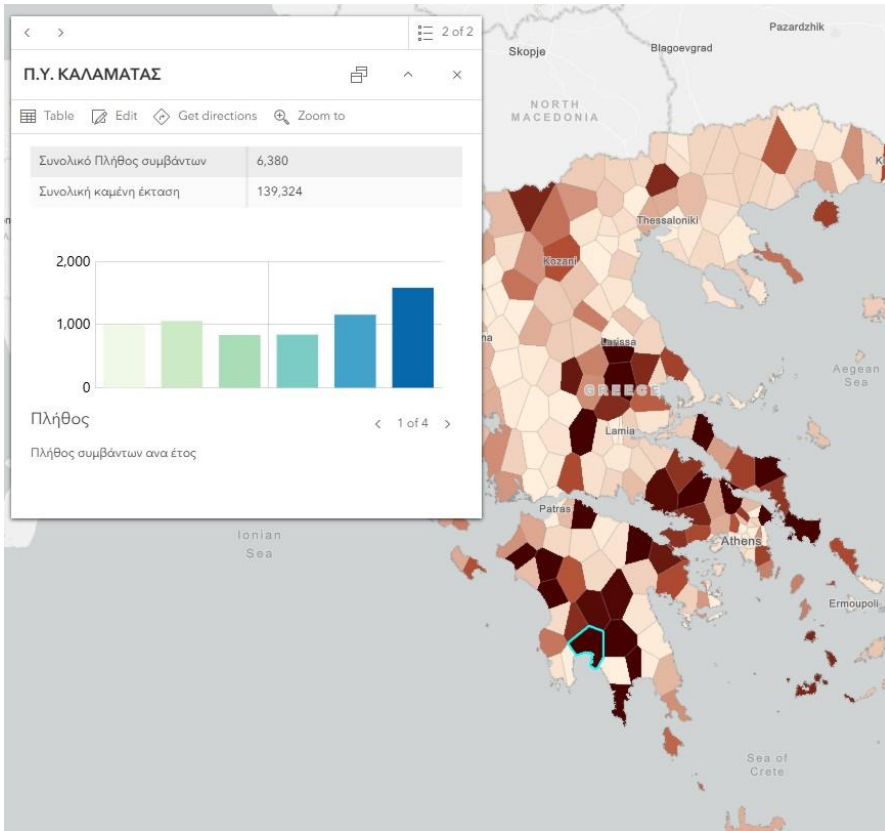
Η ανάλυση ανέδειξε σημαντικές διακυμάνσεις στη σχέση μεταξύ πλήθους ενάρξεων και καμένης έκτασης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Πυροσβεστική Υπηρεσία Καλαμάτας, όπου κατά τη δεύτερη τετραετία (2004-2007) καταγράφονται οι μεγαλύτερες καμένες εκτάσεις της περιόδου, χωρίς όμως το πλήθος ενάρξεων να εμφανίζει κάποια αντίστοιχη ακραία τιμή.

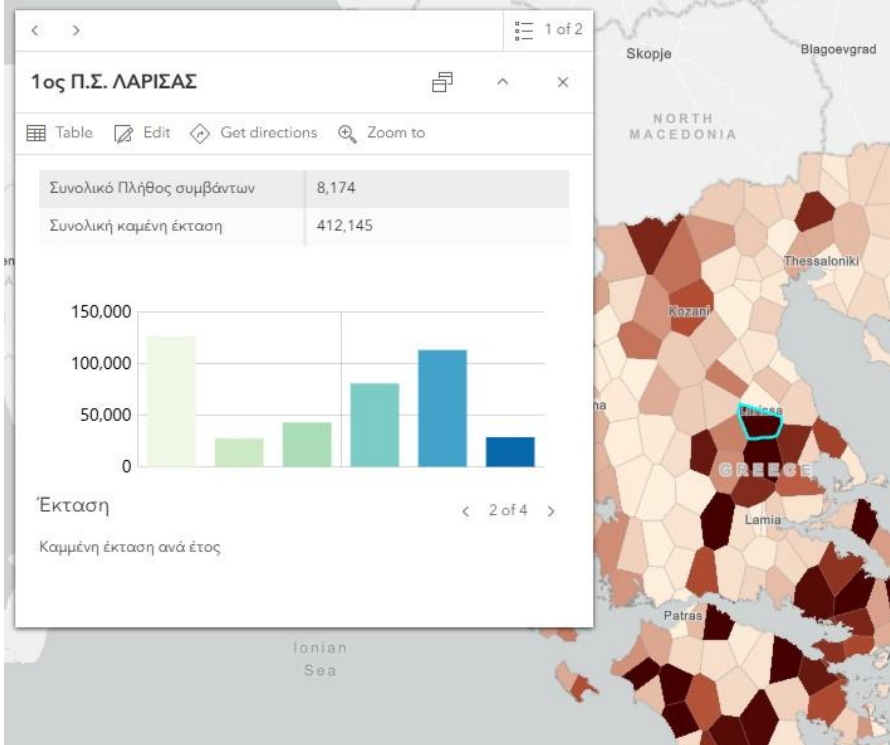
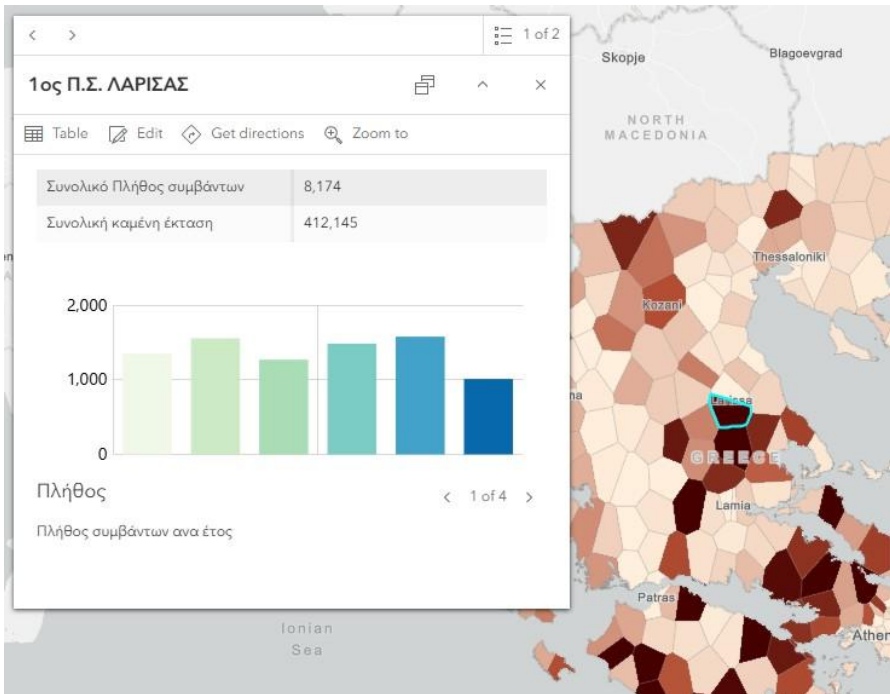
Αντίστοιχα στον 1^ο Πυροσβεστικό Σταθμό Λάρισας, το πλήθος των ενάρξεων παραμένει σχετικά σταθερό μεταξύ των τετραετιών. Παρόλα αυτά οι καμένες εκτάσεις παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις. Κατά την περίοδο 2000-2003 σημειώνονται οι υψηλότερες τιμές, την περίοδο

2008-2019 καταγράφεται συνεχής αύξηση, ενώ την τελευταία τετραετία 2021-2024 παρατηρείται μείωση της καμένης έκτασης παρά το γεγονός ότι ο αριθμός των ενάρξεων δεν διαφοροποιείται σημαντικά ανά τετραετία.

Αξίζει ακόμα να σημειωθεί ότι το σύνολο των ενάρξεων την Καλαμάτα για το σύνολο των ετών είναι 6.380 με καμένες εκτάσεις λίγο λιγότερο από 140.000 εκτάρια, ενώ αντίστοιχα στη Λάρισα με 8.174 ενάρξεις, οι καμένες εκτάσεις ξεπερνούν τις 400.000 εκτάρια. Τα παραδείγματα αυτά αναδεικνύουν ότι ο αριθμός των πυρκαγιών δεν αποτελεί ασφαλή δείκτη των τελικών επιπτώσεων, καθώς η καμένη έκταση επηρεάζεται από μια σειρά παραγόντων που δεν αποτυπώνονται μόνο από τη συχνότητα των συμβάντων.

Ο διαδραστικός χάρτης προσφέρει ένα ισχυρό εργαλείο διερεύνησης της χωρικής και χρονικής ετερογένειας των πυρκαγιών, επιτρέποντας πιο ολοκληρωμένη εποπτική αξιολόγηση των δεδομένων.





3.2. Περίοδος 2020-2024

3.2.1. Συσχέτιση δεδομένων με παραμέτρους

Για την πενταετία 2020-2024 πραγματοποιήθηκε χωρική και θεματική συσχέτιση των σημείων ενάρξεων των δασικών πυρκαγιών με σειρά παραμέτρων του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος, όπως το υψόμετρο, η κλίση του εδάφους, η χρήσεις γης, η πυκνότητα πληθυσμού, ο δείκτης κατακρήμνισης και η μέση ετήσια θερμοκρασία.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε μέσω των εργαλείων χωρικής εξαγωγής τιμών από raster σε περιβάλλον ArcGIS Pro, και τα αποτελέσματα απεικονίστηκαν με θεματικούς χάρτες και διαγράμματα κατανομής των τιμών για την πιθανή διερεύνηση πιθανών συσχετίσεων με τη χωρική κατανομή των πυρκαγιών

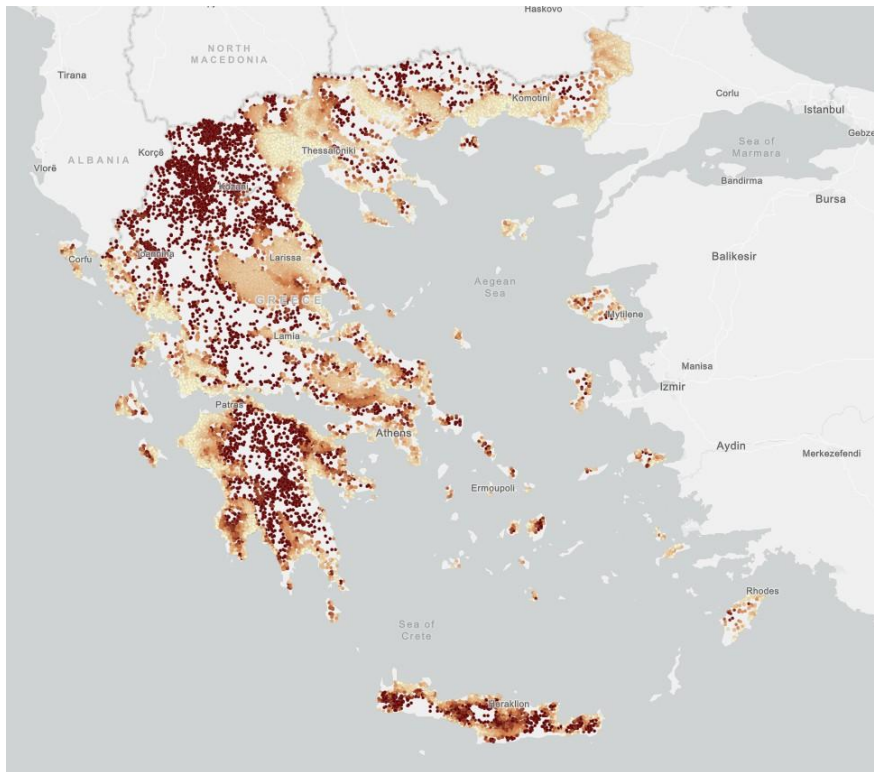
Συνολικά τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν γνωστές τάσεις της χωρικής κατανομής των πυρκαγιών στη χώρα. Η πλειονότητα των ενάρξεων παρατηρείται σε χαμηλά υψόμετρα και περιοχές με ήπιο κλίση εδάφους, γεγονός που συνδέεται πιθανώς με την ευκολότερη πρόσβαση και την ανθρώπινη δραστηριότητα.

Ως προς τις χρήσεις γης, οι περισσότερες ενάρξεις εντοπίζονται σε αγροτικές και ημιαστικές εκτάσεις, με μικρότερο μέρος να είναι σε δασικές εκτάσεις, αυτό ενισχύει ακόμα περισσότερο την επίδραση της ανθρώπινης παρουσίας και δραστηριότητας στην έναρξη δασικών πυρκαγιών. Αντίστοιχα παρατηρείται αυξημένη συχνότητα ενάρξεων σε περιοχές με χαμηλή πυκνότητα πληθυσμού, δηλαδή κοντά σε μικρούς οικισμούς.

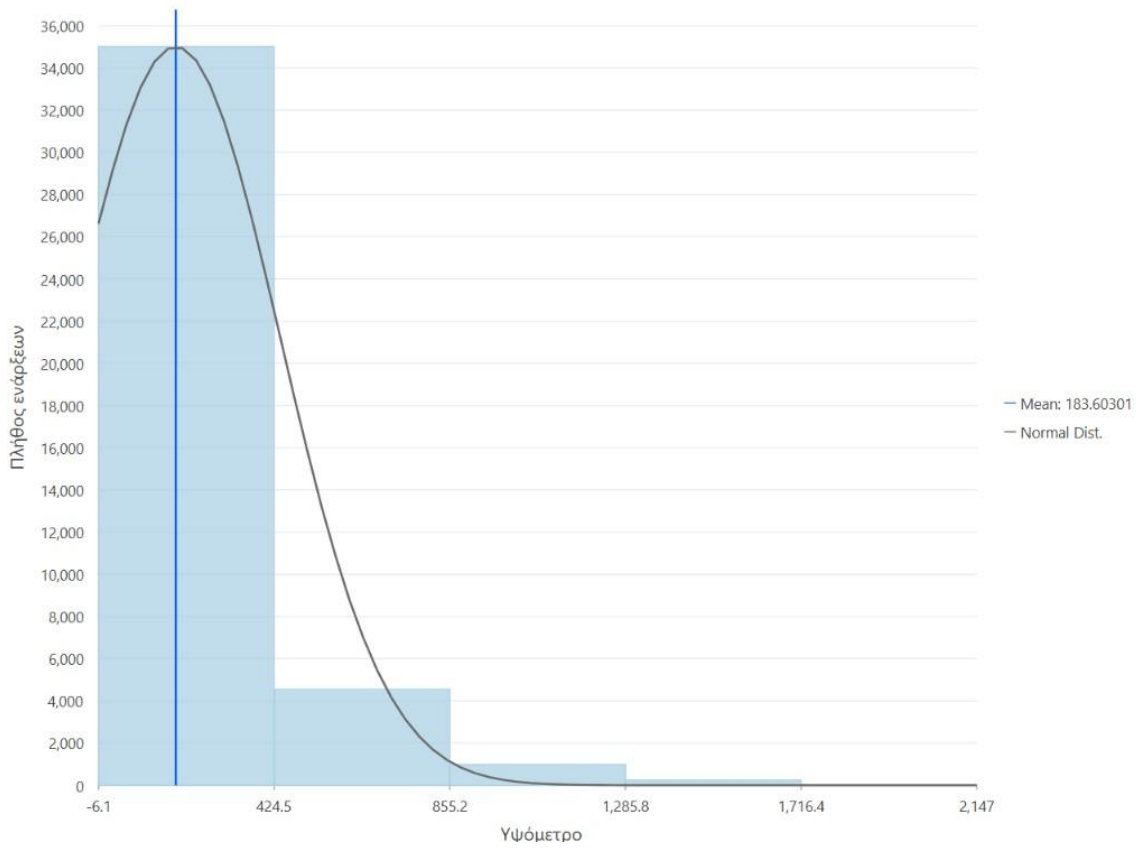
Όσο αφορά τους κλιματικούς δείκτες, οι ενάρξεις αντιστοιχούν σε περιοχές με μέση ετήσια θερμοκρασία μεταξύ 15 και 20° C και αρνητικές τιμές του δείκτη κατακρήμνισης που αντιστοιχεί σε περιοχές με μικρότερη υγρασία και περισσότερη ξηρασία.

Συνολικά, τα αποτελέσματα συνάδουν με την αναμενόμενη συμπεριφορά των πυρκαγιών στη Μεσογειακή ζώνη, όπου ο συνδυασμός ξηρασίας, υψηλών θερμοκρασιών και ανθρώπινης δραστηριότητας αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα έναρξης και εξάπλωσης των πυρκαγιών.

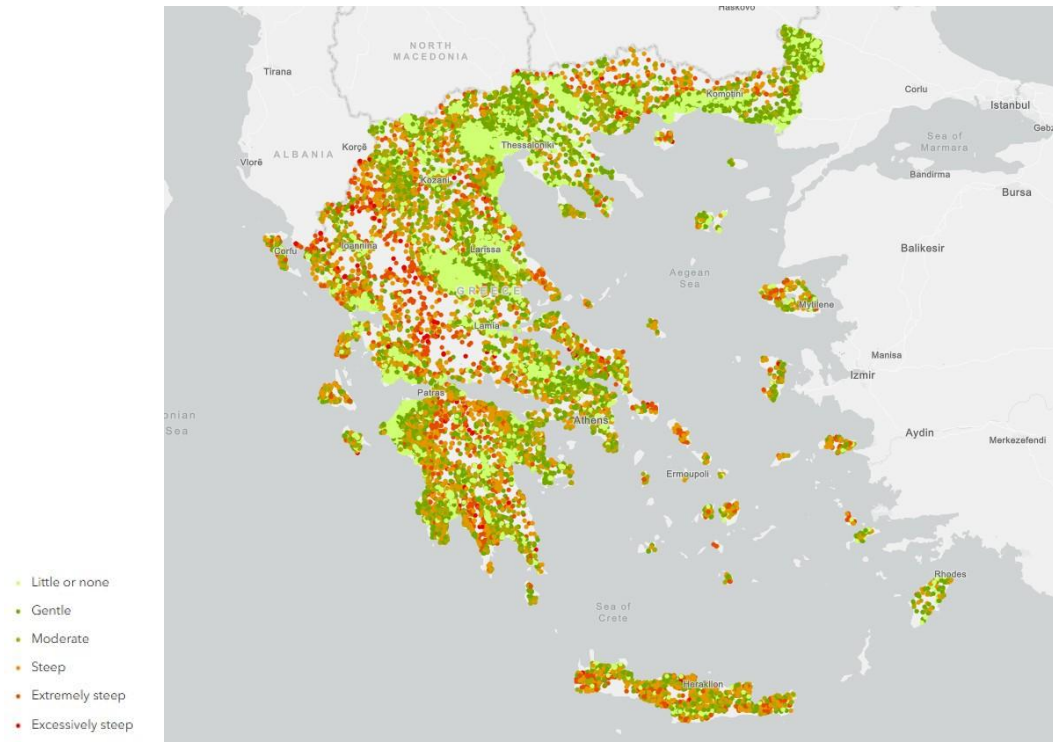
- *Υψόμετρο*



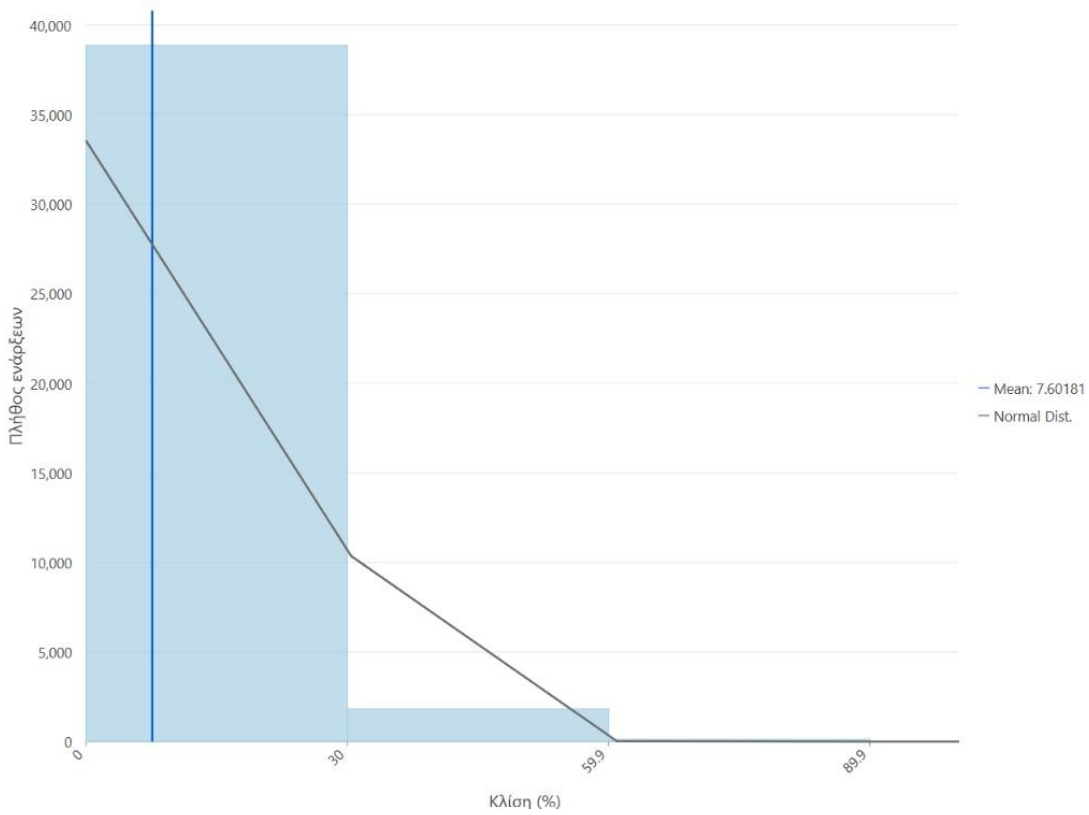
Κατανομή Υψόμετρο



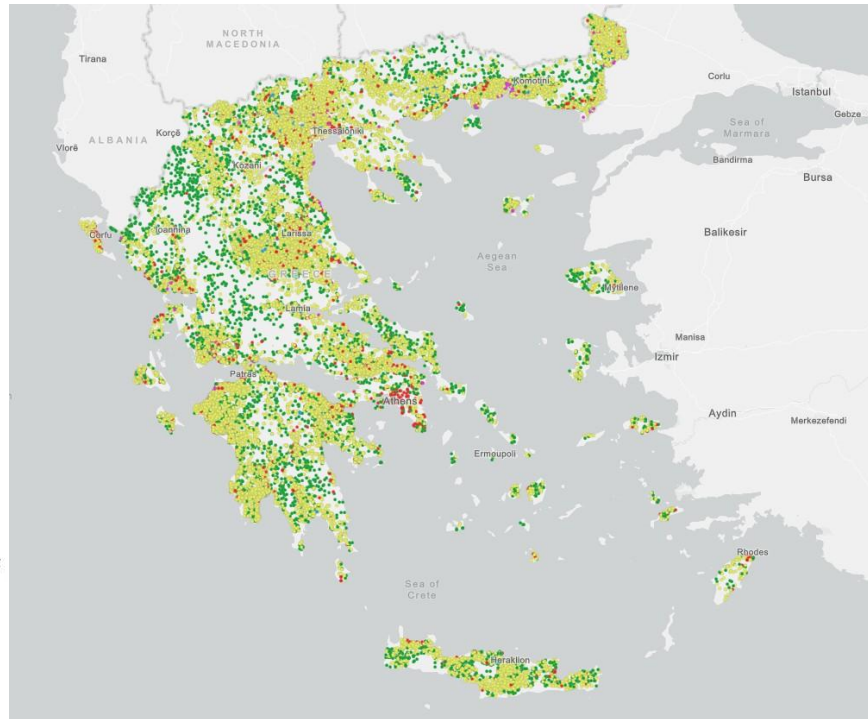
- *Κλίση εδάφους*



Κατανομή Κλίσης εδάφους

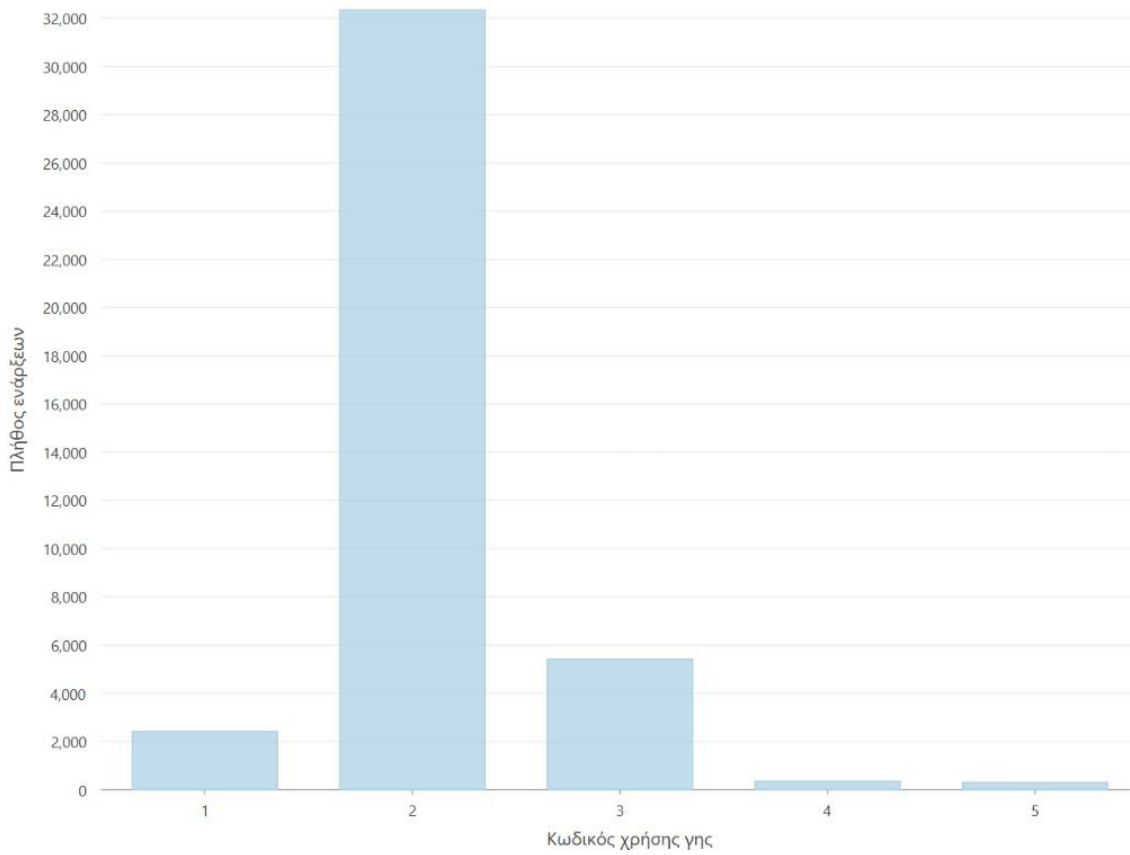


- Χρήσεις Γης

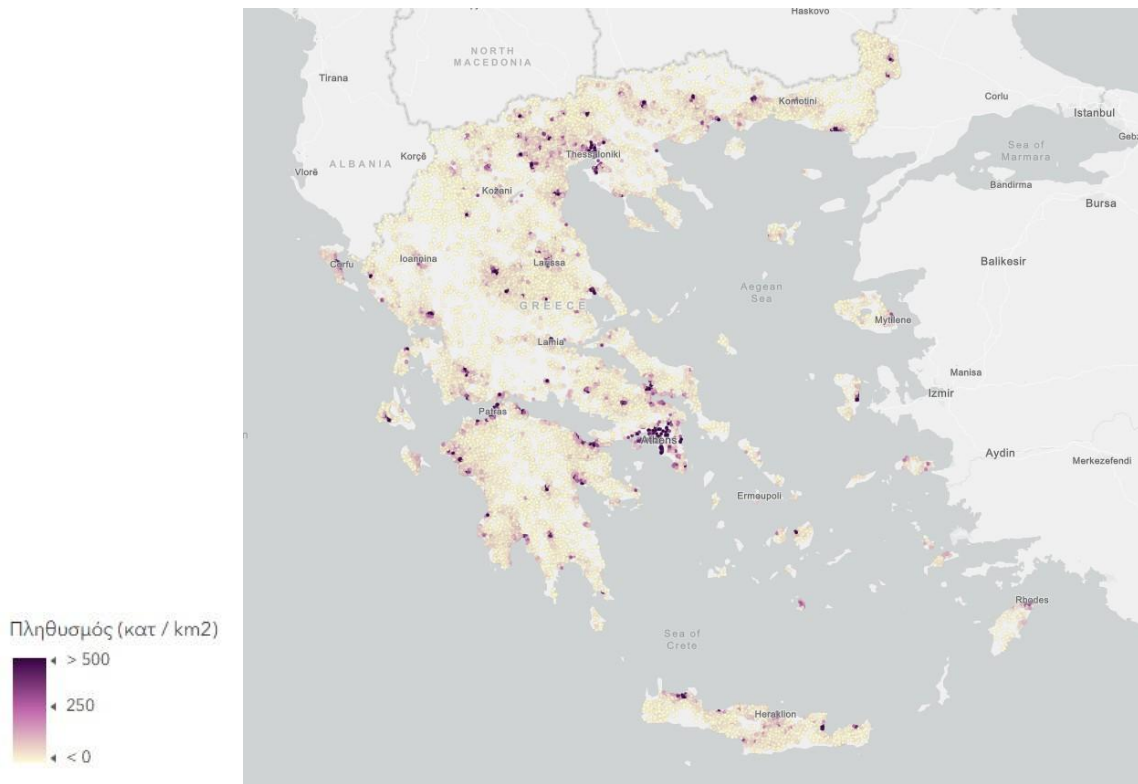


- Ενάρξεις σε σχέση με την κάλυψη γης
- Αστικές Περιοχές
 - Αγροτικές Εκτασεις
 - Δασικές Εκτασεις
 - Υγρότοποι
 - Υδατα

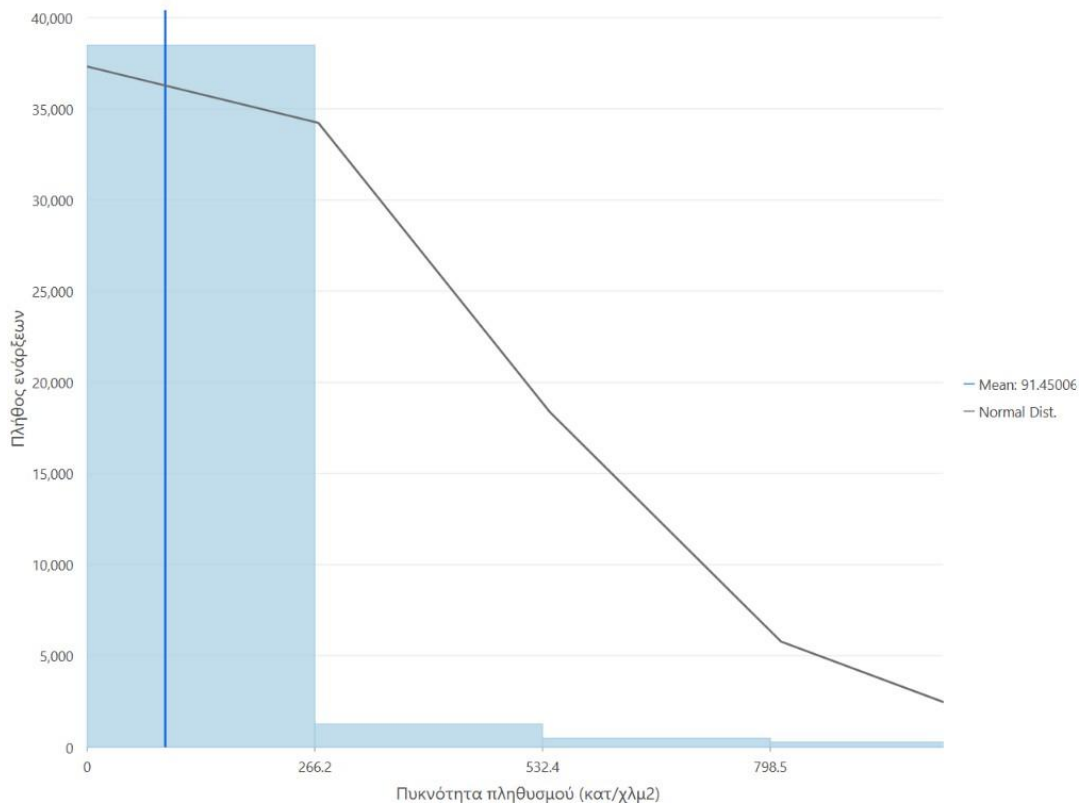
Πλήθος ενάρξεων ανά κατηγορία χρήσης γης



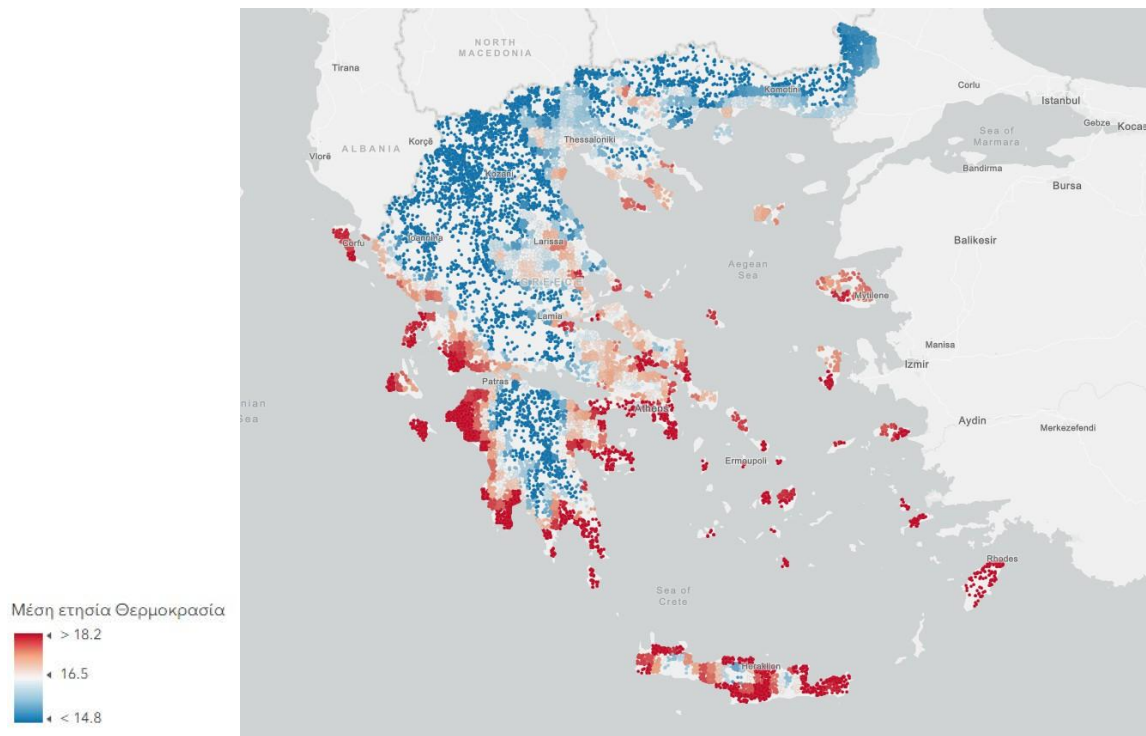
- Ποικνότητα πληθυσμού



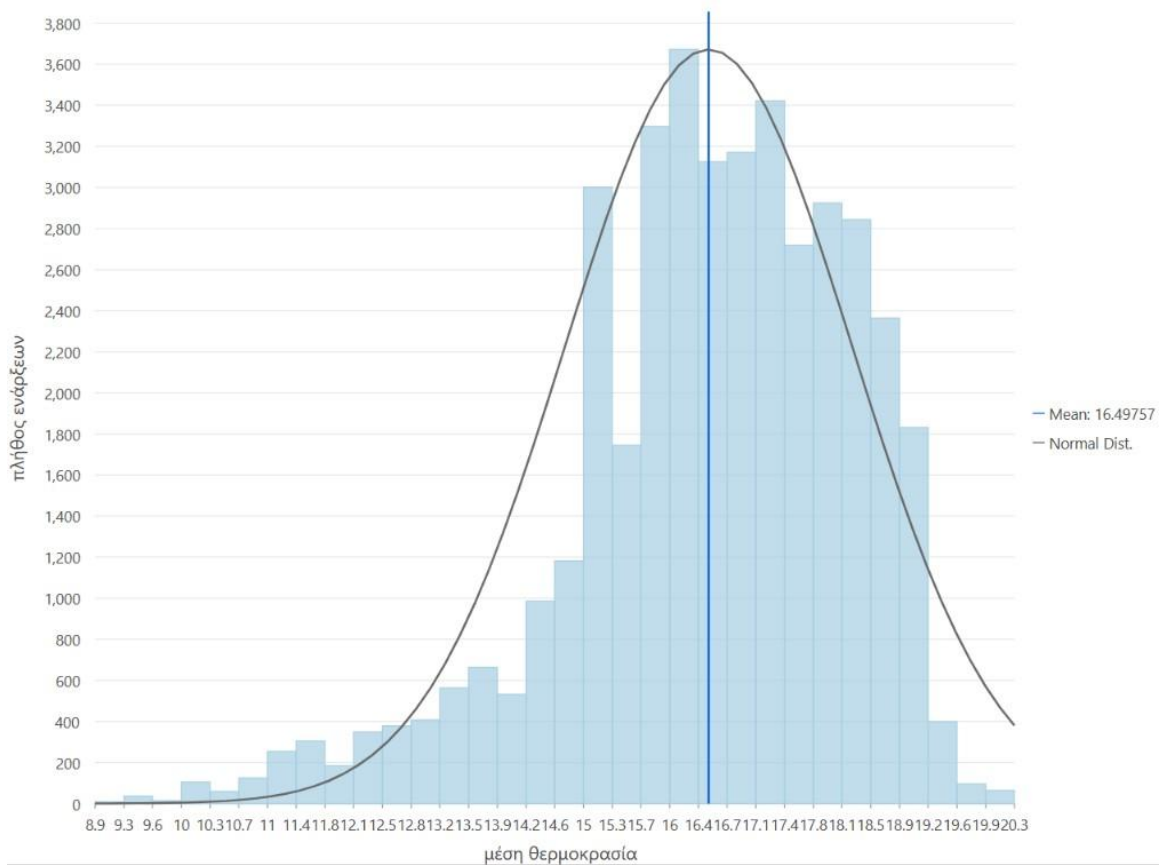
Κατανομή Πυκνότητας Πληθυσμού



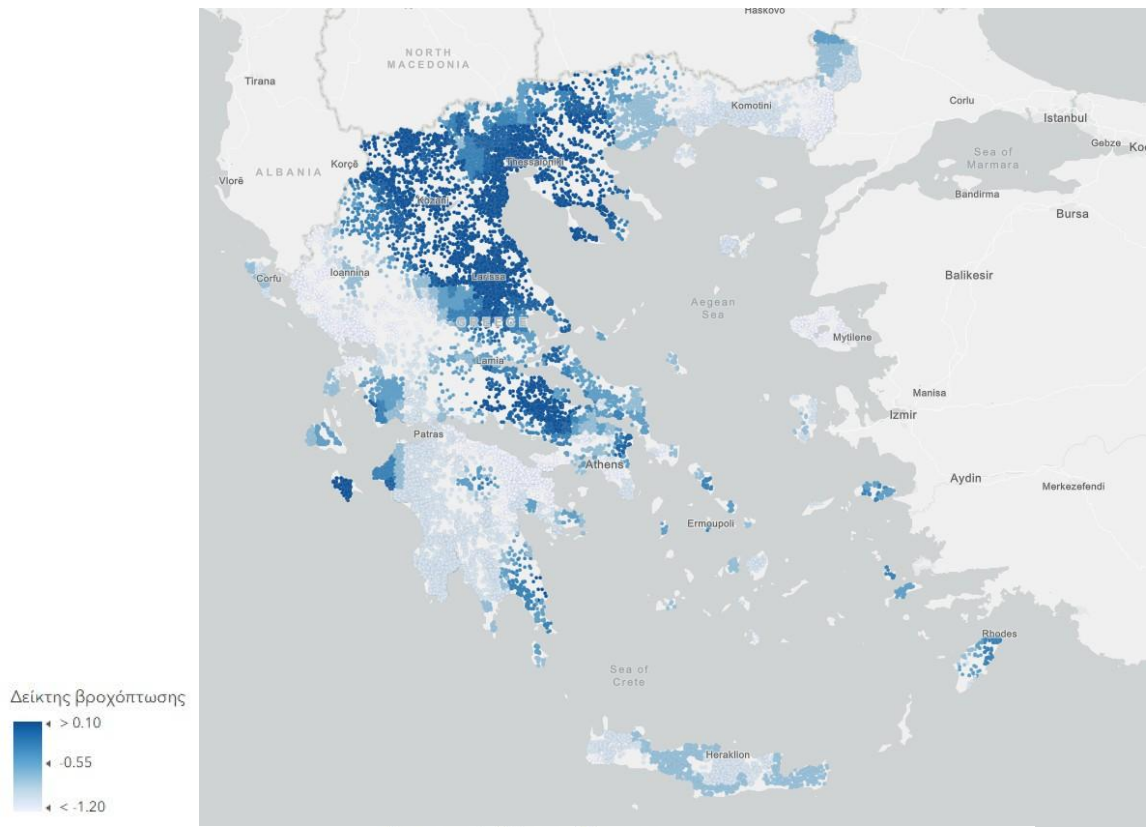
- *Μέση θερμοκρασία*



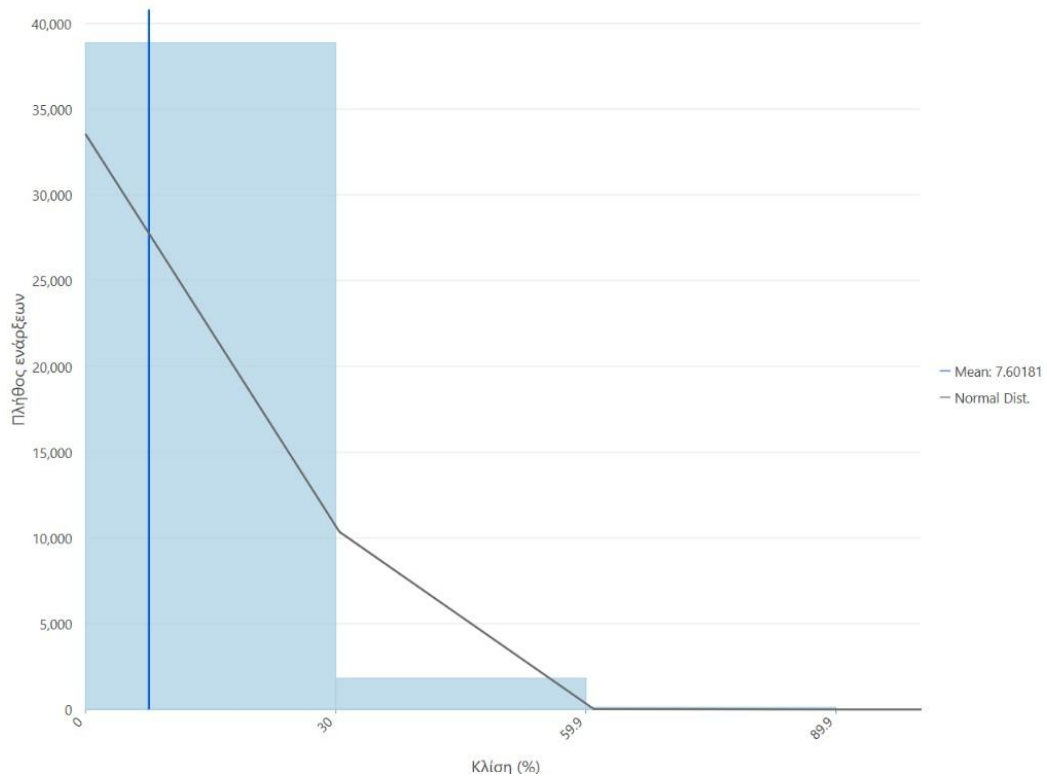
Κατανομή μέσης θερμοκρασίας



- Δείκτης κατακρήμνισης



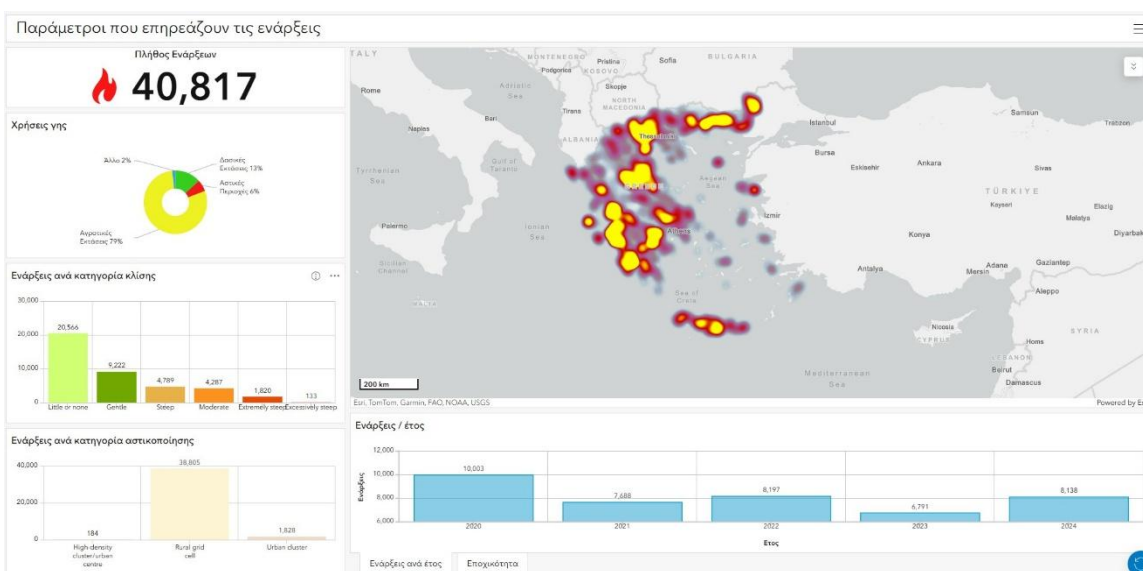
Κατανομή Κλίσης εδάφους



3.2.2. Διαδραστικός πίνακας dashboard

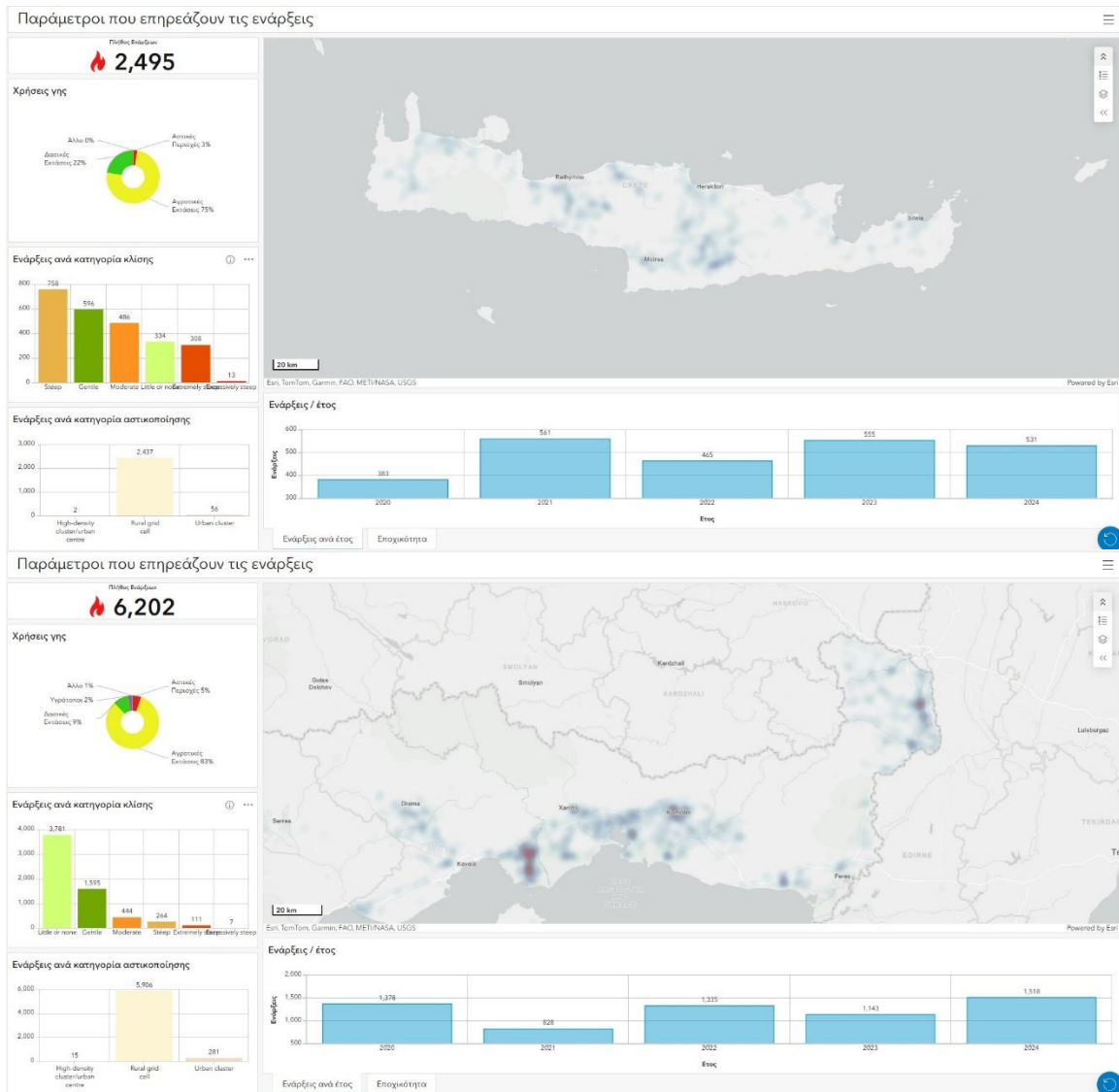
Για την παρουσίαση και τη διερεύνηση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκε μια διαδραστική διαδικτυακή εφαρμογή τύπου Dashboard μέσω της πλατφόρμας ArcGIS Online. Η εφαρμογή συγκεντρώνει και παρουσιάζει με ολοκληρωμένο τρόπο τα αποτελέσματα των αναλύσεων της περιόδου 2020-2024, επιτρέποντας τη δυναμική εξερεύνηση των δεδομένων και τη συσχέτιση των παραμέτρων που επηρεάζουν την εκδήλωση δασικών πυρκαγιών.

Το dashboard περιλαμβάνει το χάρτη με τα επίπεδα πληροφορίας και διαγράμματα σχετικά με την εποχικότητα, τη κλίση του εδάφους, την αστικοποίηση και τις χρήσεις γης, όπου ο χρήστης μπορεί να επιλέγει κατηγορία ή και χρονική περίοδο και αυτόματα να μεταβάλλονται ο χάρτης και τα διαγράμματα σύμφωνα με την επιλογή του,.



Εικόνα 4 Εφαρμογή τύπου dashboard για τη θέαση των δεδομένων της περιόδου 2020-2024.

Η εφαρμογή δίνει τη δυνατότητα ολιστικής προσέγγισης των δεδομένων, καθώς συνδυάζει χωρικές, χρονικές και θεματικές πληροφορίες σε ενιαίο περιβάλλον. Μέσω αυτής της διαδραστικής διερεύνησης καθίσταται ευκολότερη η κατανόηση των σχέσεων μεταξύ φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων και της χωρικής κατανομής των ενάρξεων πυρκαγιών.



Εικόνα 5 Στιγμιότυπο από τη σύγκριση περιοχών στην εφαρμογή dashboard

Στο παράδειγμα της εικόνας, γίνεται σύγκριση μεταξύ της Κρήτης και της περιοχής του Ανατολικής Μακεδονίας και φαίνεται πως αλλάζουν κάποιοι από τους δείκτες. Στην Κρήτη μεγαλύτερο ποσοστό ενάρξεων ξεκινάει από δασικές εκτάσεις και μεγαλύτερη κλίση εδάφους σε σχέση με την Αν. Μακεδονία που είναι λιγότερες συγκριτικά οι ενάρξεις στις δασικές εκτάσεις και σε μικρότερη κλίση εδάφους.

Το dashboard μπορεί να αξιοποιηθεί ως εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων, επιτρέποντας την ταχύτερη εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις συνθήκες εκδήλωσης πυρκαγιών, αλλά και την παρουσίαση των δεδομένων σε μη εξειδικευμένους χρήστες με τρόπο απλό και κατανοητό.

Η εφαρμογή είναι διαθέσιμη στο [σύνδεσμο](#).

3.3. Μοντέλο πρόβλεψης

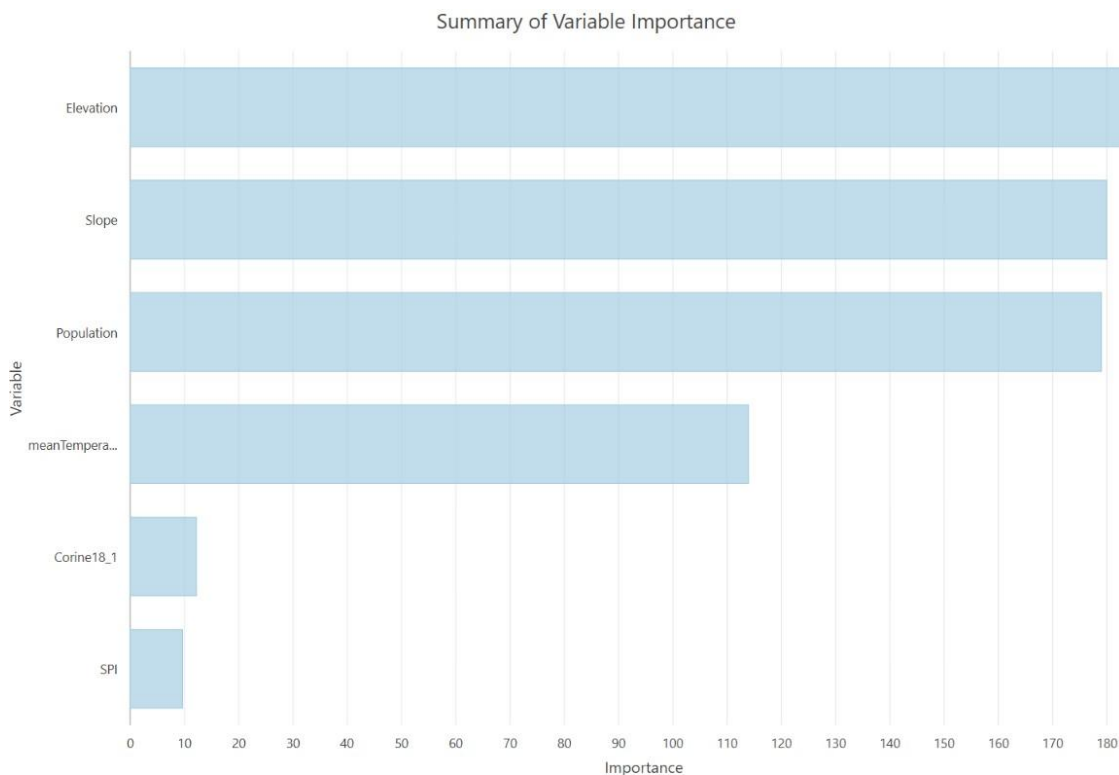
Η απόδοση του μοντέλου αξιολογήθηκε βάσει των αποτελεσμάτων του confusion matrix και του Prediction performance.

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την τελική παραγωγή του χάρτη επικινδυνότητας εκπαιδεύτηκε με 500 δέντρα, μέγιστο βάθος 50, και μέγεθος φύλλου 30, χρησιμοποιώντας το 75% των δεδομένων και κρατώντας το υπόλοιπο 25% για την επαλήθευση (validation). Η μέση τιμή βάθους δέντρου ήταν 50 ενώ το mean square error (MSE) σταθεροποιήθηκε στο 28,5 μετά τα πρώτα 250 δέντρα, δείχνοντας καλή σύγκλιση του μοντέλου.

3.3.1. Σημασία μεταβλητών

Η ανάλυση σημασίας μεταβλητών φαίνεται στον πίνακα και το διάγραμμα που ακολουθούν:

Μεταβλητή	Σημασία
Υψόμετρο	27 %
Πυκνότητα πληθυσμού	26 %
Κλίση εδάφους	26 %
Μέση θερμοκρασία	17 %
Χρήσεις γης	2 %
Δείκτης κατακρήμινσης	2 %

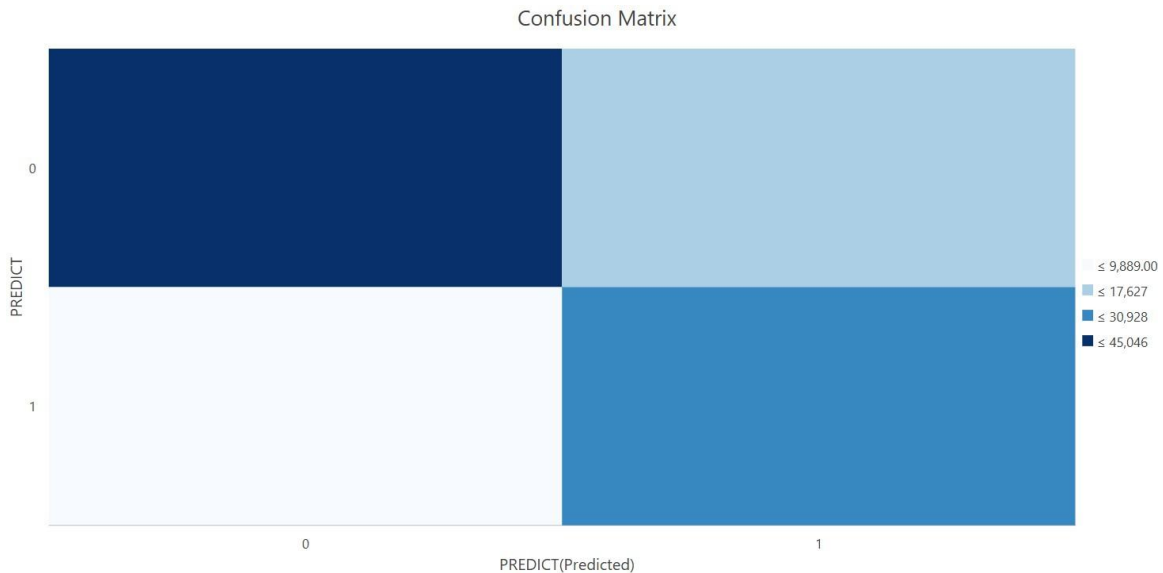


Οι πρώτες τρεις μεταβλητές (υψόμετρο, πληθυσμός, κλίση) συγκέντρωσαν πάνω από το 75% της συνολικής βαρύτητας, γεγονός που αποδεικνύει ότι οι γεωγραφικές συνθήκες και η ανθρώπινη δραστηριότητα αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες συσχέτισης με τις ενάρξεις πυρκαγιών.

3.3.2. Αποτελέσματα εκπαίδευσης και επαλήθευσης

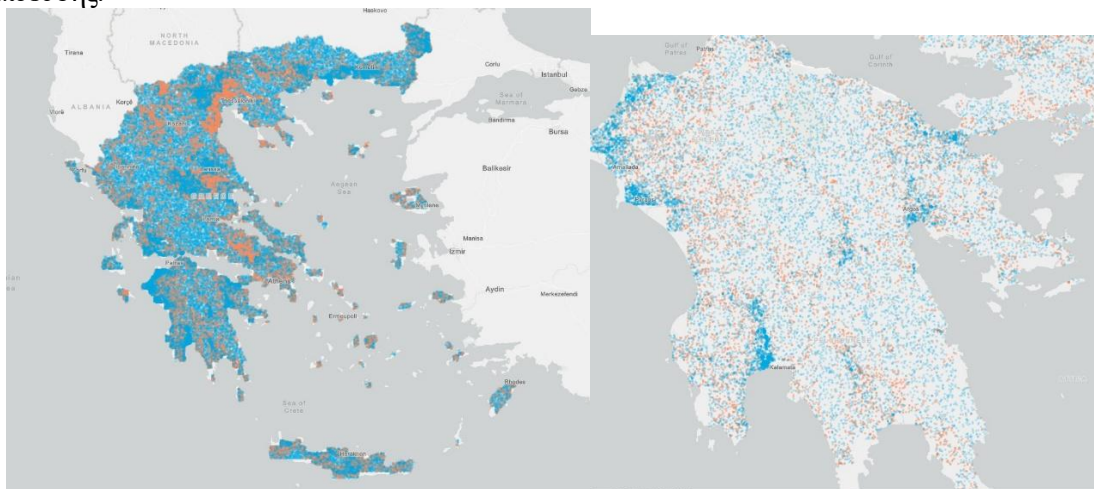
Τα αποτελέσματα του confusion matrix φαίνονται στον πίνακα και το διάγραμμα που ακολουθούν:

<i>Δεδομένα</i>	<i>Κατηγορία</i>	<i>F1-Score</i>	<i>Sensitivity</i>	<i>Accuracy</i>	<i>MCC</i>
<i>Εκπαίδευση</i>	0 (χωρίς έναρξη)	0.77	0.72	0.73	0.47
	1 (έναρξη)	0.69	0.76	0.73	0.47
<i>Σύνολο</i>	—	0.73	—	0.73	—
<i>Επαλήθευση</i>	0 (χωρίς έναρξη)	0.75	0.70	0.71	0.42
	1 (έναρξη)	0.67	0.74	0.71	0.42
<i>Σύνολο</i>	—	0.71	—	0.71	—



Η συνολική ακρίβεια του μοντέλου στην επαλήθευση ανήλθε σε 0.71, ενώ ο συντελεστής Matthews (MCC) έφτασε το 0.42, δείχνοντας ικανοποιητική ικανότητα διάκρισης μεταξύ των δύο κατηγοριών. Η επίδοση αυτή θεωρείται ικανοποιητική για προβλέψεις φαινομένων με υψηλό βαθμό τυχαιότητας και πολύ-παραγοντικό χαρακτήρα όπως οι δασικές πυρκαγιές.

Η διάμεση ακρίβεια (median accuracy) των επαναλήψεων του μοντέλου ήταν 0.712, επιβεβαιώνοντας τη σταθερότητα των αποτελεσμάτων ανεξάρτητα από τον τυχαίο σπόρο εκπαίδευσης.

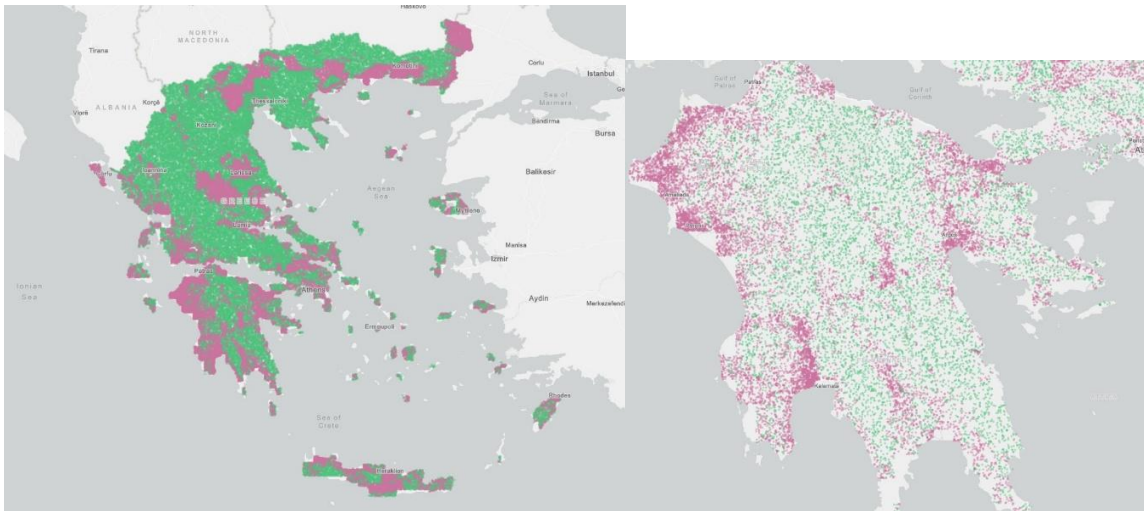


3.3.3. Χάρτης Εκτίμησης κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς

Το τελικό αποτέλεσμα από το μοντέλο πρόβλεψης είναι ο χάρτης εκτίμησης κινδύνου έναρξης δασικής πυρκαγιάς. Ο χάρτης αναδεικνύει χωρικές συγκεντρώσεις υψηλής πιθανότητας έναρξης πυρκαγιάς σε διάφορες περιοχές της χώρας.

Ζώνες αυξημένου κινδύνου εμφανίζονται στην Πελοπόννησο, στον Θεσσαλικό κάμπο, στον Έβρο, τμήματα της Αττικής, της Ευβοίας, της Ρόδου και της Κρήτης. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από συνδυασμό μορφολογικών, κλιματικών, και ανθρωπογενών παραγόντων, όπως χαμηλά έως μέτρια υψόμετρα, ήπιες κλίσεις, αγροτικές ή μεικτές χρήσεις γης, παρουσία πληθυσμού και θερμοκρασιακές συνθήκες που ευνοούν την ξηρότητα της καύσιμης ύλης.

Η χωρική συμφωνία των αποτελεσμάτων του μοντέλου με περιοχές όπου έχουν καταγραφεί σημαντικά συμβάντα πυρκαγιών τα τελευταία έτη υποδηλώνει ότι το μοντέλο αποτυπώνει ρεαλιστικά πρότυπα κινδύνου, ενισχύοντας τη χρησιμότητά του ως εργαλείο προληπτικού σχεδιασμού.



4. Συμπεράσματα

Η ανάλυση των δεδομένων έδειξε ότι οι ενάρξεις των δασικών πυρκαγιών εμφανίζουν έντονη χωρική και χρονική μεταβλητότητα, με λίγα έτη να συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ποσοστό της καμένης έκτασης. Η συσχέτιση των ενάρξεων με περιβαλλοντικούς και ανθρωπογενείς παράγοντες ανέδειξε τη σημασία του ανάγλυφου, των χρήσεων γης, της θερμοκρασίας και των συνθηκών ξηρασίας. Το μοντέλο Random Forest απέδειξε ικανοποιητική ικανότητα πρόβλεψης και παρείχε χωρική απεικόνιση της πιθανότητας κινδύνου έναρξης νέου συμβάντος, επιβεβαιώνοντας τη χρησιμότητα των μεθόδων μηχανικής μάθησης σε σύνθετα περιβαλλοντικά φαινόμενα.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων ανέδειξε ορισμένα σαφή πρότυπα ως προς την εκδήλωση συμβάντων δασικών πυρκαγιών. Συγκεκριμένα, προκύπτει ότι η πλειονότητα των ενάρξεων σχετίζεται με ανθρωπογενείς δραστηριότητες, γεγονός που επιβεβαιώνει τον καθοριστικό ρόλο του ανθρώπινου παράγοντα στην εκδήλωση του φαινομένου. Αυτό προκύπτει κυρίως από το γεγονός ότι οι περισσότερες ενάρξεις εντοπίζονται σε αγροτικές και μεικτές χρήσεις γης, όπου παρατηρείται έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα και εγγύτητα με τις δασικές εκτάσεις. Αυτό βέβαια δεν αναιρεί το γεγονός ότι οι δασικές πυρκαγιές είναι σύνθετα φαινόμενα και συντρέχουν περισσότεροι από ένας παράγοντες τόσο για την έναρξη ενός συμβάντος όσο και για την τυχόν εξέλιξη του.

Σε χρονικό επίπεδο, καταγράφεται επίσης σαφής εποχικότητα, με αυξημένη συχνότητα κατά τους θερινούς μήνες αλλά και σε περιόδους που σχετίζονται με αγροτικές εργασίες και αλλαγές καλλιεργειών, όπως τον Μάιο και τον Οκτώβριο. Επιπλέον, η κατανομή των ενάρξεων εντός της ημέρας παρουσιάζει συγκέντρωση κυρίως κατά τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες, όπου επηρεάζουν και οι μετεωρολογικές συνθήκες πιθανώς.

Επιπλέον, αξίζει να παρατηρήσουμε ότι οι μεγαλύτερες καμένες εκτάσεις συνδέονται με μεμονωμένα αλλά ιδιαίτερα έντονα συμβάντα, τα οποία εκδηλώνονται κυρίως κατά τη θερινή περίοδο, επιβεβαιώνοντας τον ρόλο των ακραίων φαινομένων στη διαμόρφωση των συνολικών επιπτώσεων.

Ωστόσο, η έρευνα επηρεάζεται από περιορισμούς κυρίως με την ακρίβεια των δεδομένων. Η έλλειψη ακριβούς χωρικής θέσης για την περίοδο 2000-2019 εισάγει αβεβαιότητα στη χωρική ανάλυση και επηρεάζει την απόδοση του μοντέλου πρόβλεψης. Η χρήση δεδομένων από μεγαλύτερο χρονικό εύρος θα μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα της ανάλυσης και να μειώσει το στατιστικό σφάλμα, οδηγώντας σε πιο αξιόπιστα προγνωστικά αποτελέσματα αλλά επίσης και στον εμπλουτισμό της έρευνας με επιπλέον μεθόδους σύγχρονης ανάλυσης.

Το μοντέλο Random Forest επέδειξε ικανοποιητική δυνατότητα πρόβλεψης και παρείχε χρήσιμη χωρική πληροφορία σχετικά με την πιθανότητα εκδήλωσης νέου συμβάντος δασικής πυρκαγιάς. Η αξιοποίηση μοντέλων μηχανικής μάθησης, σε συνδυασμό με τα γεωχωρικά δεδομένα, μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για την υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων και την πρόληψη στη διαχείριση κινδύνων γενικότερα και ειδικότερα στην διαχείριση των δασικών πυρκαγιών.

Τέλος, για μελλοντική έρευνα προτείνεται η αξιοποίηση των πιο πρόσφατων δεδομένων ενάρξεων πυρκαγιών, τα οποία πλέον συλλέγονται και είναι διαθέσιμα με μεγαλύτερη χρονική ακρίβεια ως προς τη γεωγραφική τους θέση, καθώς ανανεώνονται κάθε νέο έτος από την Πυροσβεστική Υπηρεσία. Η διαθεσιμότητα τέτοιων δεδομένων υψηλής χωρικής ανάλυσης δημιουργεί νέες δυνατότητες για την εφαρμογή πιο σύνθετων μεθόδων χωρικής και χωρο-χρονικής ανάλυσης. Ενδεικτικά, η χρήση εργαλείων όπως τα Space-time cubes μπορεί να συμβάλει στην ανίχνευση χωρο-χρονικών προτύπων και τάσεων σε μεγαλύτερος βάθος χρόνου. Ωστόσο, η αποτελεσματική εφαρμογή τέτοιων μεθόδων ανάλυσης προϋποθέτει επαρκές χρονικό εύρος δεδομένων, γεγονός που καθιστά την συστηματική και ακριβή καταγραφή των συμβάντων ιδιαίτερα σημαντική για την εξέλιξη της έρευνας σε αυτόν τον τομέα.

Στην παρούσα εργασία αναδεικνύεται η σημασία της συστηματικής αξιοποίησης εργαλείων γεωχωρικής ανάλυσης στην διαχείριση των δασικών πυρκαγιών. Η χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και μεθόδων ανάλυσης δεδομένων μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω τόσο στο στάδιο της πρόληψης, μέσω του εντοπισμού περιοχών αυξημένου κινδύνου, όσο και κατά τη διάρκεια εξέλιξης ενός συμβάντος, με την υποστήριξη της επιχειρησιακής λήψης αποφάσεων, αλλά και στο στάδιο της αποτίμησης των επιπτώσεων και της ανάκαμψης. Επιπλέον, η αξιοποίηση διαδραστικών εργαλείων παρουσίασης και διάχυσης της πληροφορίας μπορεί να συμβάλει στην βελτίωση της κατανόησης των δεδομένων και στη διευκόλυνση της επικοινωνίας μεταξύ επιστημονικών φορέων και αρμόδιων αρχών. Συνεπώς, η ενσωμάτωση τέτοιων εργαλείων σε ολοκληρωμένα πλαίσια διαχείρισης κινδύνου αποτελεί βασική κατεύθυνση για την αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση των δασικών πυρκαγιών.

Βιβλιογραφία

- Beyond, Αστεροσκοπείο Αθηνών. (χ.χ.). *Daily Fire Risk Map Prediction*. Ανάκτηση από Center of EO Research: <https://riskmap.beyond-eocenter.eu/>
- Chatzigeorgiadis, M., Doganis, A., & Maniatis, Y. (2022). Fire Risk Probability Mapping Using Machine Learning Tools and Multi-Criteria Decision Analysis in the GIS Environment: A Case Study in the National Park Forest Dadia-Lefkimi-Soufli, Greece. *Applied sciences*.
- European Commission. (2025). *Copernicus*. Ανάκτηση από Land Monitoring Service: <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover>
- European Environment Agency. (2016). *EEA geospatial data catalogue*. Ανάκτηση από <https://sdi.eea.europa.eu/catalogue/srv/api/records/3473589f-0854-4601-919e-2e7dd172ff50>
- FAO. (2024). *Integrated Fire Management Voluntary Guidelines - Principles and strategic actions*. Rome: Forestry Working Paper. Retrieved from <https://doi.org/10.4060/cd1090en>
- Goldammer, J. G. (2022). The role and history of fire in tropical landscapes.
- Goodchild, M. F. (2018). Reimagining the history of GIS.
- Migliorini, M., Komac, B., Schwarze, R., & Sigmund, Z. (2020). Evolving Risk of Wildfires in Europe - The changing nature of wildfire risk calls for a shift in policy focus from suppression to prevention.
- Staley, D. M., Kean, J. W., & Rengers, F. K. (2020). The recurrence interval of post-fire debris-flow generating rainfall in the. *Geomorphology*.
- United Nations. (n.d.). *United Nations Climate Change*. Retrieved from The Paris Agreement: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- WorldPop, Esri. (2023). *Living Atlas*. Ανάκτηση από <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=38b7672a1977426caa6cf4c62e37b777>
- Δεμίρογλου, Α. (2024). *Δασικές Πυρκαγιές στην Ελλάδα για την περίοδο 2000-2020 : Συσχέτιση του Καναδικού Δείκτη Κινδύνου Καιρού Πυρκαγιάς και των παρατηρημένων Καμένων Δασικών Εκτάσεων*. Χανιά.
- Καϊλίδης, & Καρανικόλα. (2004). Οι δασικές πυρκαγιές στην Ελλάδα τον προηγούμενο αιώνα (1900-2000). *1ου Περιβαλλοντικού Συνεδρίου, Ν. Ορεστιάδα - Ελλάδα, 07/05/2004-09/05/2004*.
- Πυροσβεστικό Σώμα Ελλάδος. (2025). *Πυροσβεστικό Σώμα Ελλάδος*. Ανάκτηση από Σύνολα Δεδομένων: https://www.fireservice.gr/el_GR/synola-dedomenon
- ΥΠΕΝ. (2017). *Υπουργείο Περιβάλλοντος και ενέργειας*. Ανάκτηση από <http://kdn.ypeka.gr/>
- Υφαντή, Δ. (2015). *Διεθνή και Ελληνικά Συστήματα Πρόληψης Δασικών Πυρκαγιών*. Θεσσαλονίκη.