

Interreg



Co-funded by
the European Union

IPA ADRION

RES2FIRE

Χαρτογράφηση της επικινδυνότητας και του κινδύνου δασικών πυρκαγιών σε τρέχουσες και μελλοντικές κλιματικές συνθήκες

Πακέτο Εργασίας 1

Τυποποίηση διαδικασιών και εναρμόνιση δεδομένων για τη χαρτογράφηση κινδύνου
δασικών πυρκαγιών

(Παραδοτέο 1.3.1)

Project full title:	Models and Tools for Enhancing the Resistance and the Resilience to Wildfire in Natural Protected Areas and Wildland-Urban Interfaces
Project acronym:	RES2FIRE
Program priority:	Supporting a greener and climate resilient Adriatic-Ionian region
Specific objective:	SO 2.1: Enhancing resilience to climate change, natural and man-made disasters in the Adriatic-Ionian region

Το παρόν έχει παραχθεί με τη χρηματοδοτική συνδρομή της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Το περιεχόμενο του εγγράφου αποτελεί αποκλειστική ευθύνη της AVMap GIS A.E. και σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι αντανακλά τις απόψεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης και/ή των αρχών του Προγράμματος IPA ADRION.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	3
2. Η κλιματική αλλαγή	5
2.1. Η κλιματική αλλαγή στο Δήμο Μαραθώνος	6
3. Επικινδυνότητα πυρκαγιάς σε μελλοντικά σενάρια κλιματικής αλλαγής	9
3.1. Μεταβλητές	9
3.2. Μοντέλο Ανάλυσης	9
3.3. Κύρια Ευρήματα για τις Μεταβλητές	9
3.4. Χάρτες επικινδυνότητας	9
3.4.1. Δήμος Μαραθώνος (Ελλάδα)	10
Κλιματικές Μεταβολές	10
Επικινδυνότητα Πυρκαγιάς	10
3.5. Συμπεράσματα	13
4. Ανάλυση Τάσεων Επικινδυνότητας Πυρκαγιάς	14
4.1. Ανάλυση για τον Δήμο Μαραθώνα	14
4.2. Συμπεράσματα για τον Μαραθώνα	15
5. Μεθοδολογία Εκτίμησης Κινδύνου Πυρκαγιάς	16
5.1. Μεθοδολογία Αξιολόγησης Τρωτότητας	17
5.1.1. Σύνολα Δεδομένων που Χρησιμοποιήθηκαν για την Ανάλυση	17
5.1.2. Αποτελέσματα αξιολόγησης τρωτότητας	18
5.2. Χαρτογράφηση Κινδύνου Πυρκαγιάς	20
6. Σύνοψη	24
7. Βιβλιογραφία	26

Συντομογραφίες

Συντομογραφία	Επεξήγηση
AIC	Akaike Information Criterion
AR6	Sixth Assessment Report
AUC	Area Under Curve
BIC	Bayesian Information Criterion or Schwarz Criterion
CLC	CORINE Land Cover
CORINE	Coordination of Information on the Environment
EEA	European Environment Agency
EV	Ecological Value
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ROC	Receiver Operating Characteristics
SSP	Shared Socioeconomic Pathways

1. Εισαγωγή

Ο σκοπός του παρόντος παραδοτέου είναι διπλός, καθώς εστιάζει αφενός στην ανάλυση της μελλοντικής επικινδυνότητας πυρκαγιάς και αφετέρου στην ανάπτυξη διαδικασίας για τη δημιουργία χαρτών κινδύνου πυρκαγιάς. Πρώτον, αναλύθηκε η επικινδυνότητα πυρκαγιάς σε μελλοντικές προβολές κλιματικής αλλαγής. Δεύτερον, εντοπίστηκε και εφαρμόστηκε μία διαδικασία για τη δημιουργία χαρτών κινδύνου πυρκαγιάς, βασισμένων στους ήδη υπάρχοντες χάρτες επικινδυνότητας.

Για την ανάλυση της μεταβολής της επικινδυνότητας πυρκαγιάς σε μελλοντικές κλιματικές συνθήκες, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα προβολών που παρέχει η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC). Η IPCC είναι διακυβερνητικός οργανισμός των Ηνωμένων Εθνών, με ρόλο να «παρέχει σε κυβερνήσεις όλων των επιπέδων επιστημονικές πληροφορίες που μπορούν να αξιοποιηθούν για την ανάπτυξη πολιτικών για το κλίμα».

Σύμφωνα με την Έκτη Έκθεση Αξιολόγησης της IPCC (AR6), υπάρχουν αρκετά Κοινωνικοοικονομικά Σενάρια (Shared Socioeconomic Pathways – SSPs). Αυτά τα σενάρια απεικονίζουν πιθανές μελλοντικές κοινωνικοοικονομικές εξελίξεις, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η πληθυσμιακή αύξηση, η οικονομική ανάπτυξη, η τεχνολογία και οι περιβαλλοντικές πολιτικές.

Τα σενάρια SSP χρησιμοποιούνται για τους εξής σκοπούς:

- α) αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας διαφορετικών πολιτικών μετριασμού και προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή,
- β) κατανόηση του πώς οι κοινωνικοοικονομικές επιλογές μπορούν να επηρεάσουν το μελλοντικό κλίμα,
- γ) περιγραφή του μελλοντικού πλαισίου του κλίματος σε σχέδια προσαρμογής και μετριασμού καθώς και σε τοπικές μελέτες επιπτώσεων.

Η παρούσα μελέτη αξιολόγησε τη μεταβολή της επικινδυνότητας πυρκαγιάς με βάση δύο σενάρια (SSP1-2.6 και SSP5-8.5) και δύο χρονικούς ορίζοντες (2060 και 2100). Ο στόχος ήταν να εκτιμηθεί η μεταβολή των κλιματικών μεταβλητών σε δύο ακραία σενάρια: το πρώτο (SSP1-2.6) με βιώσιμη ανάπτυξη (και πολιτικές μείωσης των εκπομπών CO₂) και το δεύτερο (SSP5-8.5) με έντονη, ανεξέλεγκτη ανάπτυξη και σημαντικές εκπομπές CO₂, που θα επηρέαζαν τις κλιματικές μεταβλητές.

Το δεύτερο μέρος του παραδοτέου επικεντρώνεται στην ανάπτυξη μιας διαδικασίας για τον προσδιορισμό του κινδύνου πυρκαγιάς στις περιοχές μελέτης, οι οποίες είναι αντιπροσωπευτικές για ολόκληρη την περιοχή του Προγράμματος IPA Adrion. Ξεκινώντας από τους χάρτες επικινδυνότητας που είχαν παραχθεί στο Παραδοτέο 1.2.1, εκτιμήθηκε η περιβαλλοντική τρωτότητα των περιοχών καθώς και η τρωτότητα των πληθυσμών που

εκτίθενται. Ο συνδυασμός αυτών των δύο μορφών τρωτότητας με τους χάρτες επικινδυνότητας οδήγησε στη διαμόρφωση χαρτών κινδύνου πυρκαγιάς, οι οποίοι αξιολογούν όχι μόνο την πιθανότητα μιας περιοχής να πληγεί από πυρκαγιά, αλλά και τις πιθανές περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις.

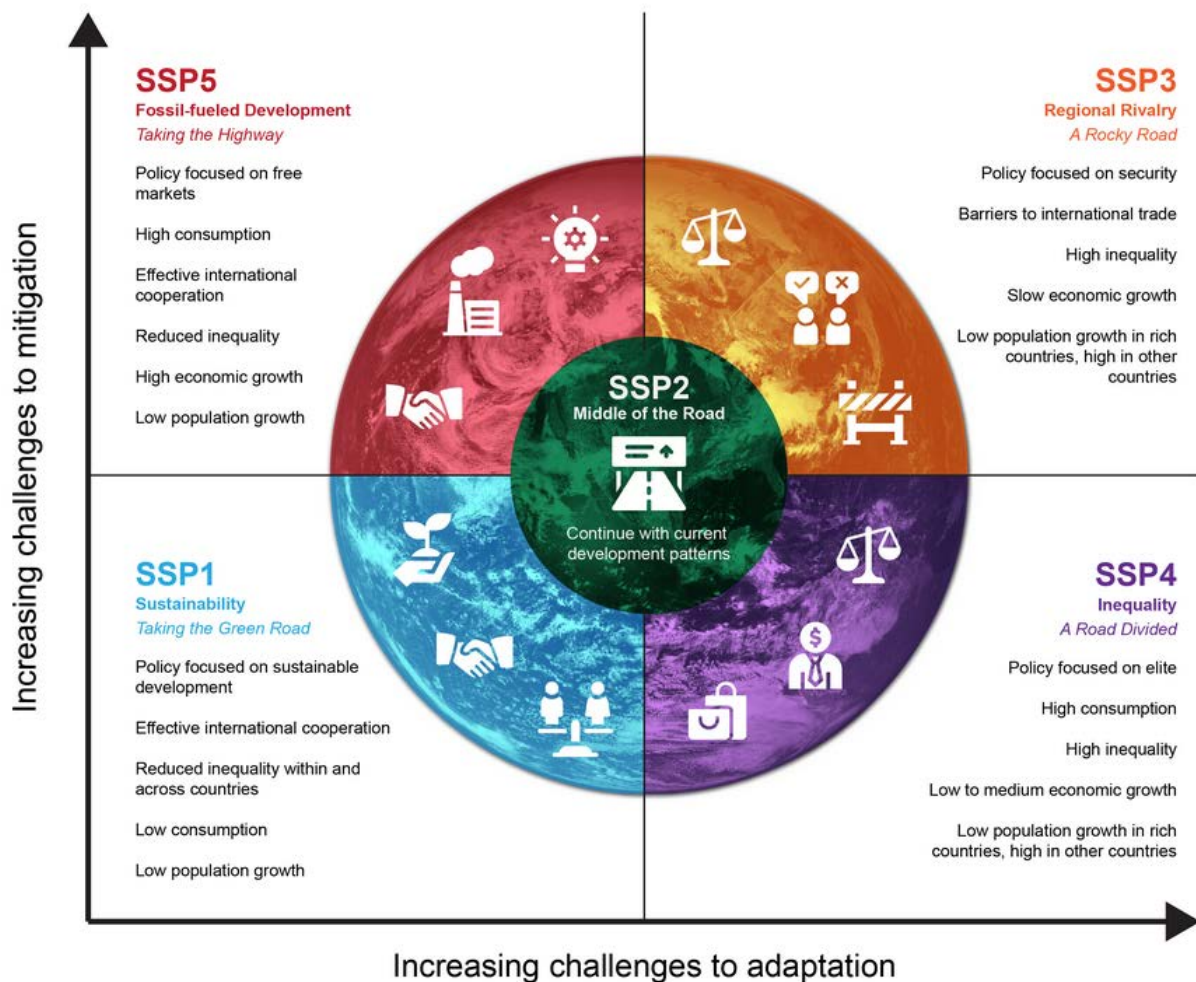
Στην παρούσα έκδοση του παραδοτέου γίνεται αναφορά μόνο στο Δήμο Μαραθώνος, στην Ανατολική Αττική στην Ελλάδα.

Για τις λοιπές περιοχές μελέτης που αναφέρονται κάτωθι, βλέπε το συνολικό παραδοτέο D1.3.1 του έργου: <https://res2fire.interreg-ipa-adrion.eu/library/the-use-of-ai-to-develop-forest-fire-risk-maps/>:

- Appennino Lucano Val d'Agri Lagonegrese National Park, Italy
- Sutjeska National Park, Bosnia and Herzegovina
- Shebenik Jabllanika National Park, Albania
- Velventos Forest, Greece
- Osogovo Mountains, North Macedonia
- Municipality of Potenza, Italy
- City of Kocani, North Macedonia
- Municipality of Loznica, Serbia
- Kozara National Park, Bosnia and Herzegovina

2. Η κλιματική αλλαγή

Ο πλανήτης βρίσκεται σε φάση εντεινόμενης κλιματικής αλλαγής, η οποία οφείλεται κυρίως στις αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Αυτό επηρεάζει τη γενικότερη υπερθέρμανση αλλά και τη μεταβολή όλων των κλιματικών παραμέτρων. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) είναι ο αρμόδιος οργανισμός του ΟΗΕ που μελετά τις κλιματικές μεταβολές και πραγματοποιεί προβολές για το μέλλον της κλιματικής αλλαγής. Οι προβολές αυτές αναλύονται σε διαφορετικά χρονικά βήματα και βασίζονται σε εναλλακτικά Κοινωνικοοικονομικά Σενάρια (SSPs), τα οποία συνδέονται με ποικίλες πολιτικές οικονομικής ανάπτυξης – από τα πιο βιώσιμα μέχρι και τα πιο ανεξέλεγκτα, όπου δεν λαμβάνονται μέτρα για τη μείωση των εκπομπών.



Εικόνα 1 - Τα Κοινά Κοινωνικοοικονομικά Σενάρια (SSPs) και οι σχετικές προκλήσεις για τον μετριασμό και την προσαρμογή (πηγή <https://climatedata.ca/resource/understanding-shared-socio-economic-pathways-ssps/>)

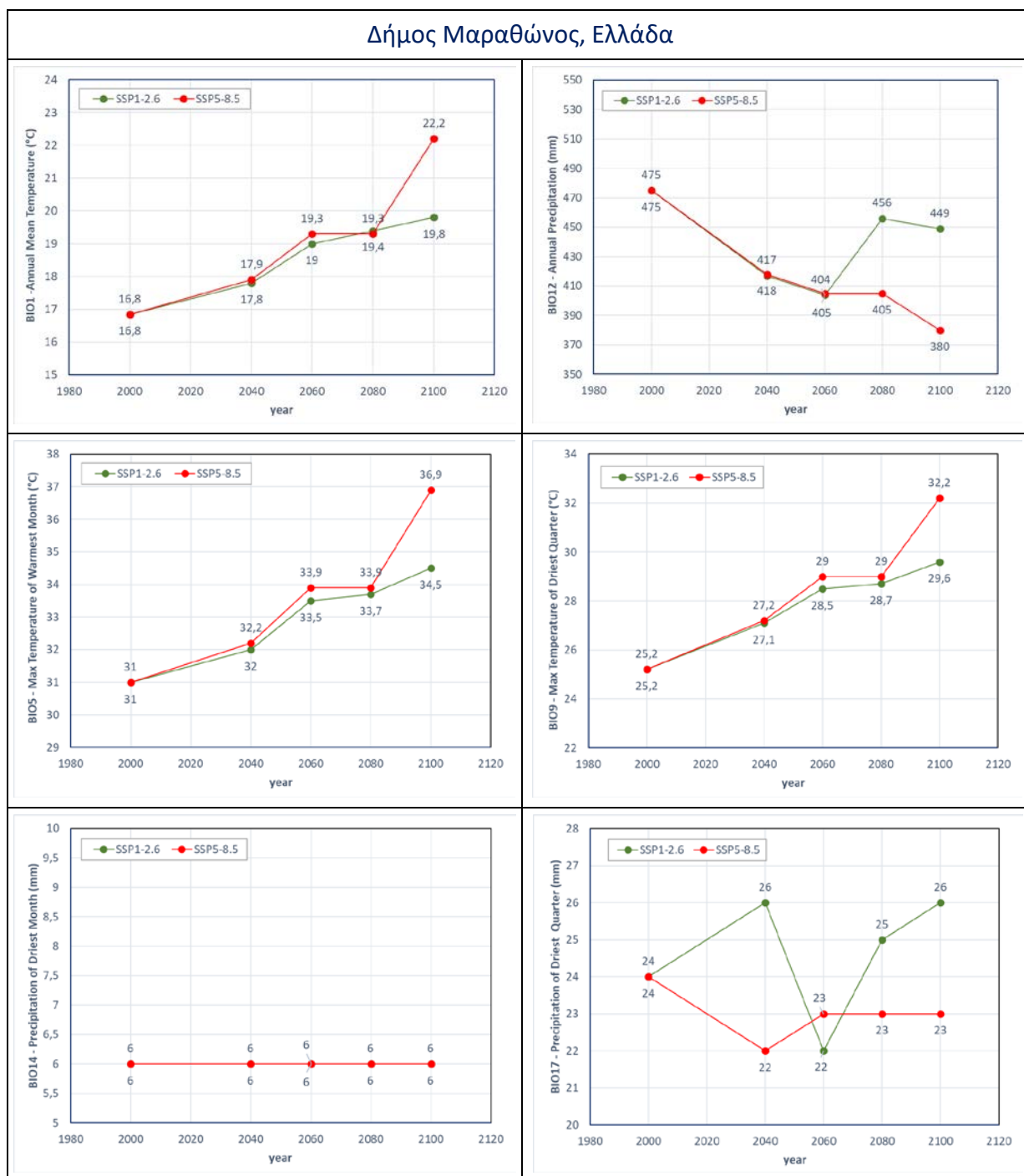
2.1. Η κλιματική αλλαγή στο Δήμο Μαραθώνος

Για τα κλιματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στις μελλοντικές προβολές και στα διάφορα σενάρια SSP αξιοποιήθηκε το σύνολο δεδομένων **WorldClim** (<https://worldclim.org/>). Το σύνολο αυτό παρέχει προβολές κλιματικών δεδομένων σε διαφορετικά χρονικά βήματα έως και το 2100. Για τα σενάρια SSP χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες κλιματικές μεταβλητές που είχαν χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία των υφιστάμενων χαρτών επικινδυνότητας (βλ. RES2FIRE Παραδοτέο 1.2.1). Το WorldClim βασίζεται σε προβολές της IPCC, επαναταξινομημένες σε ανάλυση 1 km, και χρησιμοποιείται ευρέως από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα.

Οι βιοκλιματικές μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για τις προβολές της κλιματικής αλλαγής παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Οι χρονικοί ορίζοντες των προβολών είναι το **2060** και το **2100**, για τα δύο σενάρια **SSP1-2.6** και **SSP5-8.5**. Με βάση αυτές τις μελλοντικές προβολές των βιοκλιματικών μεταβλητών πραγματοποιήθηκε μια προκαταρκτική ανάλυση των τάσεων του κλίματος στις δέκα περιοχές μελέτης. Η παρούσα έκδοση του παραδοτέου αφορά μόνο στο Δήμο Μαραθώνος.

Πίνακας 1 – Βιοκλιματικές μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για τον κλιματικό χαρακτηρισμό των περιοχών μελέτης για τα έτη 2000, 2040, 2060, 2080 και 2100 (Πηγή: WorldClim)

Layer	Resolution	Description
CC_ssp126_{year}_bio1	approx. 1 km	{year} BIO1 Projection for SSPs 1-2.6 Annual Mean Temperature
CC_ssp126_{year}_bio5	approx. 1 km	{year} BIO5 Projection for SSPs 1-2.6 Max Temperature of Warmest Month
CC_ssp126_{year}_bio9	approx. 1 km	{year} BIO9 Projection for SSPs 1-2.6 Mean Temperature of Driest Quarter
CC_ssp126_{year}_bio12	approx. 1 km	{year} BIO12 Projection for SSPs 1-2.6 – Annual Precipitation
CC_ssp126_{year}_bio14	approx. 1 km	{year} BIO14 Projection for SSPs 1-2.6 Precipitation of Driest Month
CC_ssp126_{year}_bio17	approx. 1 km	{year} BIO17 Projection for SSPs 1-2.6 Precipitation of Driest Quarter



Εικόνα 2 – Προβολές κλιματικής αλλαγής των βιοκλιματικών μεταβλητών για το Δήμο Μαραθώνος, Ελλάδα (από επάνω αριστερά προς τα κάτω δεξιά: Μέση Ετήσια Θερμοκρασία · Ετήσια Βροχόπτωση · Θερμοκρασία Θερμότερου Μήνα · Θερμοκρασία Ξηρότερου Τριμήνου · Βροχόπτωση Ξηρότερου Μήνα · Βροχόπτωση Ξηρότερου Τριμήνου)

Όπως φαίνεται, οι μεταβλητές που σχετίζονται με τη θερμοκρασία (Μέση Ετήσια Θερμοκρασία, Θερμοκρασία Θερμότερου Μήνα και Θερμοκρασία Ξηρότερου Τριμήνου) παρουσιάζουν αυξητική τάση σε όλες τις περιοχές μελέτης, με μεγαλύτερες αυξήσεις στο σενάριο SSP5-8.5 σε σύγκριση με το SSP1-2.6. Σε σχέση με το έτος 2000, η μέση ετήσια θερμοκρασία αναμένεται να αυξηθεί μέχρι το 2100 κατά περίπου 5–6 °C στο SSP5-8.5 και κατά 2–3 °C στο SSP1-2.6, με τάση σταθεροποίησης από το 2060 και μετά. Οι υπόλοιπες θερμοκρασιακές μεταβλητές ακολουθούν παρόμοια πορεία.

Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι λιγότερο έντονη σε περιοχές με καθαρά μεσογειακό κλίμα (π.χ. Δήμος Μαραθώνα) σε σχέση με περιοχές πιο ηπειρωτικές, σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη (π.χ. Εθνικά Πάρκα Shebenik–Jablanica και Kozara). Αυτό πιθανόν οφείλεται στο ότι σε περιοχές όπου η μέση θερμοκρασία είναι ήδη πολύ υψηλή (π.χ. ~17 °C στον Μαραθώνα), η επιπλέον αύξηση δεν είναι τόσο έντονη. Αντίθετα, σε ηπειρωτικές περιοχές με πολύ χαμηλότερη μέση θερμοκρασία (π.χ. 5,1 °C στο Shebenik-Jablanica, 8,3 °C στο Kozara, 7,2 °C στα Όρη Osogono και 6,9 °C στο Sutjeska), η αύξηση μέχρι το 2100 είναι πολύ μεγαλύτερη, ειδικά στο σενάριο SSP5-8.5.

Οι μεταβλητές που σχετίζονται με τις βροχοπτώσεις (Ετήσια Βροχόπτωση, Βροχόπτωση Ξηρότερου Μήνα και Βροχόπτωση Ξηρότερου Τριμήνου) παρουσιάζουν λιγότερο σταθερές τάσεις στα διάφορα χρονικά βήματα και στα δύο σενάρια (SSP1-2.6 και SSP5-8.5).

- Στο SSP1-2.6, οι τιμές βροχόπτωσης τείνουν να μειωθούν έως το 2060, αλλά μετά αυξάνονται ξανά, φτάνοντας ή και ξεπερνώντας τα σημερινά επίπεδα σε ορισμένες περιοχές (π.χ. Appennino Lucano, Δήμος Potenza, Sutjeska, Shebenik-Jablanica). Στον Μαραθώνα, η ετήσια βροχόπτωση μειώνεται έντονα έως το 2060 και στη συνέχεια αυξάνεται, αλλά χωρίς να φτάσει τα σημερινά επίπεδα.
- Στο SSP5-8.5, όλες οι μεταβλητές βροχόπτωσης παρουσιάζουν συνεχή μείωση με την πάροδο του χρόνου, με σημαντικές διαφορές μεταξύ περιοχών. Οι μειώσεις είναι πολύ μικρότερες σε ηπειρωτικές περιοχές (π.χ. Όρη Osogono, Δάσος Βελβεντού, Shebenik-Jablanica) και σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη (π.χ. Kozara), ενώ είναι πολύ πιο έντονες σε μεσογειακές περιοχές (π.χ. Δήμος Μαραθώνα) ή σε μεσογειακές ορεινές περιοχές (π.χ. Appennino Lucano, Potenza).

Οι τάσεις στη Βροχόπτωση Ξηρότερου Μήνα (BIO14) και Ξηρότερου Τριμήνου (BIO17) είναι ακόμη πιο διαφοροποιημένες ανάμεσα στις περιοχές και τα δύο σενάρια. Όπως αναμένεται, η μείωση αυτών των μεταβλητών είναι πιο ήπια στο σενάριο SSP1-2.6 σε σχέση με το SSP5-8.5. Μάλιστα, στο SSP1-2.6 παρατηρείται αύξηση των βροχοπτώσεων μετά το 2060 σε όλες σχεδόν τις περιοχές, που σε κάποιες περιπτώσεις ξεπερνά τα σημερινά επίπεδα, ιδίως σε πιο ηπειρωτικά κλίματα (π.χ. Shebenik-Jablanica, Kozara, Sutjeska).

Αντίθετα, σε περιοχές καθαρά μεσογειακές όπως ο Δήμος Μαραθώνα, η βροχόπτωση στον ξηρότερο μήνα και στο ξηρότερο τρίμηνο παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη στα χρόνια που εξετάζονται, και στα δύο σενάρια, πιθανόν επειδή ξεκινά ήδη από εξαιρετικά χαμηλές τιμές. Στις μεσογειακές ορεινές περιοχές (π.χ. Potenza, Appennino Lucano) οι μεταβλητές βροχόπτωσης τείνουν να παραμένουν σταθερές ή να παρουσιάζουν μικρές μειώσεις.

3. Επικινδυνότητα πυρκαγιάς σε μελλοντικά σενάρια κλιματικής αλλαγής

Αφού καθορίστηκαν τα επίπεδα των κλιματικών μεταβλητών που προβλέπουν μελλοντικές συνθήκες κλιματικής αλλαγής, πραγματοποιήθηκε ανάλυση της επικινδυνότητας πυρκαγιάς για τις δέκα περιοχές μελέτης. Η ανάλυση κάλυψε δύο χρονικούς ορίζοντες (**2060** και **2100**) και δύο Κοινά Κοινωνικοοικονομικά Σενάρια (**SSP1-2.6** βιώσιμη ανάπτυξη, μείωση εκπομπών CO₂ και **SSP5-8.5** - έντονη οικονομική ανάπτυξη, υψηλές εκπομπές CO₂)).

3.1. Μεταβλητές

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν είναι ίδιες με εκείνες που καθόρισαν την επικινδυνότητα στην τρέχουσα κατάσταση (βλ. RES2FIRE [Παραδοτέο 1.2.1](#)):

- Θερμοκρασιακές (BIO1, BIO5, BIO9)
- Βροχοπτώσεων (BIO12, BIO14, BIO17)
- Τοπογραφικές (υψόμετρο, κλίση, προσανατολισμός)
- Δασική κάλυψη, βιομάζα, τύποι καυσίμων και χρήσεις γης (CLC 2018).

3.2. Μοντέλο Ανάλυσης

Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης (Logistic Regression / Maximum Entropy), το οποίο υπολογίζει την πιθανότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς βάσει της στατιστικής σχέσης μεταξύ των καταγεγραμμένων πυρκαγιών και των περιβαλλοντικών παραμέτρων.

Η αξιολόγηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δεικτών ROC, AUC, AIC και BIC, οι οποίοι κατέδειξαν υψηλή ακρίβεια (AUC $\approx$ 0.84–0.85) τόσο για τις τρέχουσες όσο και για τις μελλοντικές προβολές.

3.3. Κύρια Ευρήματα για τις Μεταβλητές

Σήμερα, η επικινδυνότητα εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία. Στο μέλλον, καθοριστικός παράγοντας είναι η βροχόπτωση, ειδικά στο ξηρότερο τρίμηνο (BIO17). Όσο μειώνονται οι βροχοπτώσεις, αυξάνεται η πιθανότητα πυρκαγιάς.

3.4. Χάρτες επικινδυνότητας

Δημιουργήθηκαν χάρτες επικινδυνότητας για κάθε περιοχή και για τα τέσσερα σενάρια:

- SSP1-2.6 (2060)
- SSP1-2.6 (2100)
- SSP5-8.5 (2060)
- SSP5-8.5 (2100)

3.4.1. Δήμος Μαραθώνος (Ελλάδα)

Ο Δήμος Μαραθώνα αποτελεί μία από τις δέκα περιοχές μελέτης και χαρακτηρίζεται από καθαρά μεσογειακό κλίμα, με ήδη υψηλό δείκτη επικινδυνότητας πυρκαγιάς.

Κλιματικές Μεταβολές

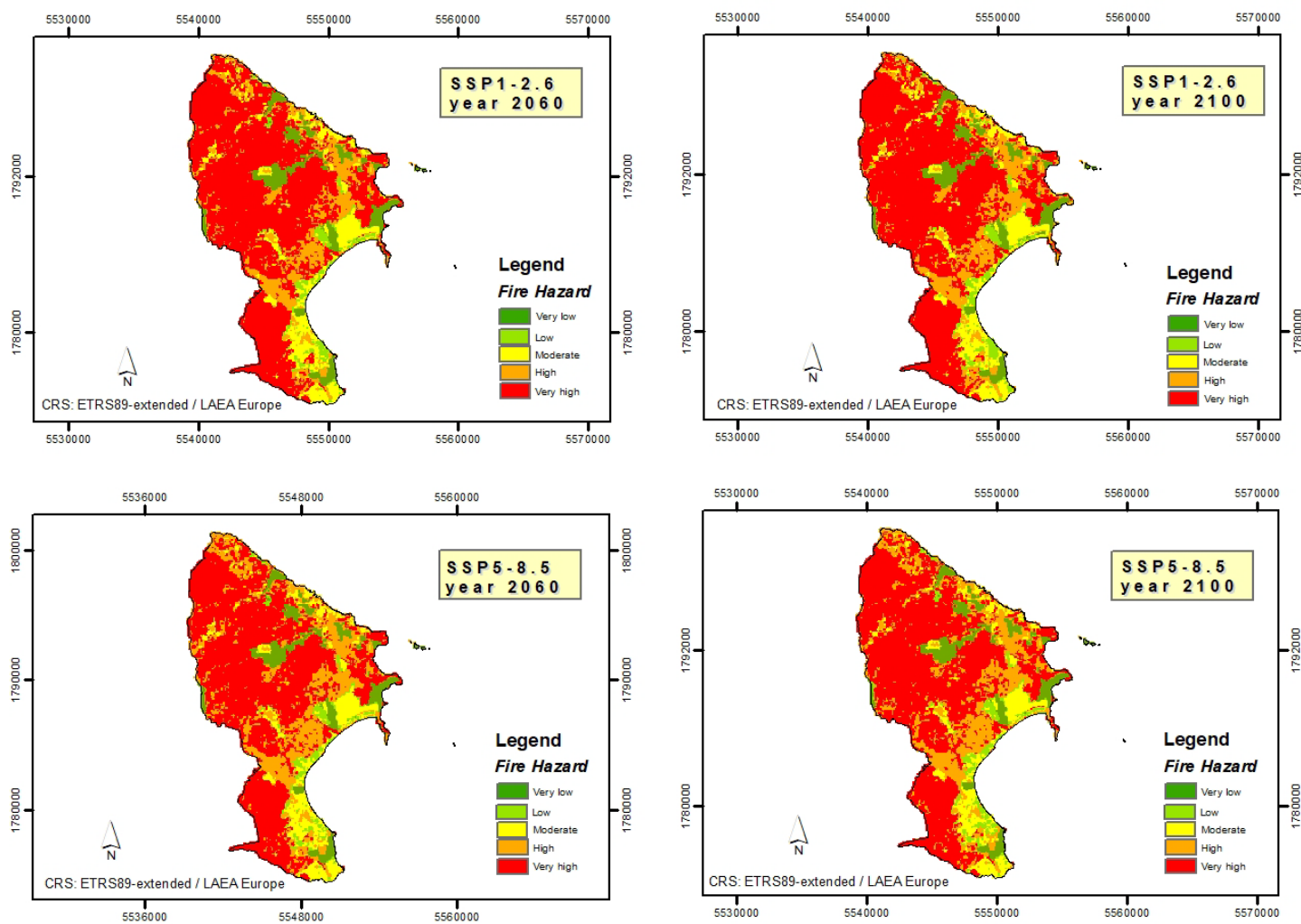
Σύμφωνα με τα μελλοντικά σενάρια: Η μέση ετήσια θερμοκρασία αυξάνεται έως και κατά 5–6 °C στο σενάριο SSP5-8.5 έως το 2100. Η βροχόπτωση μειώνεται αισθητά έως το 2060 και αυξάνεται ελαφρά μετά, χωρίς να φτάνει στα σημερινά επίπεδα. Αυτό σημαίνει μεγαλύτερες ξηρές περιόδους και υψηλότερες θερμοκρασίες που ενισχύουν την πιθανότητα πυρκαγιάς.

Επικινδυνότητα Πυρκαγιάς

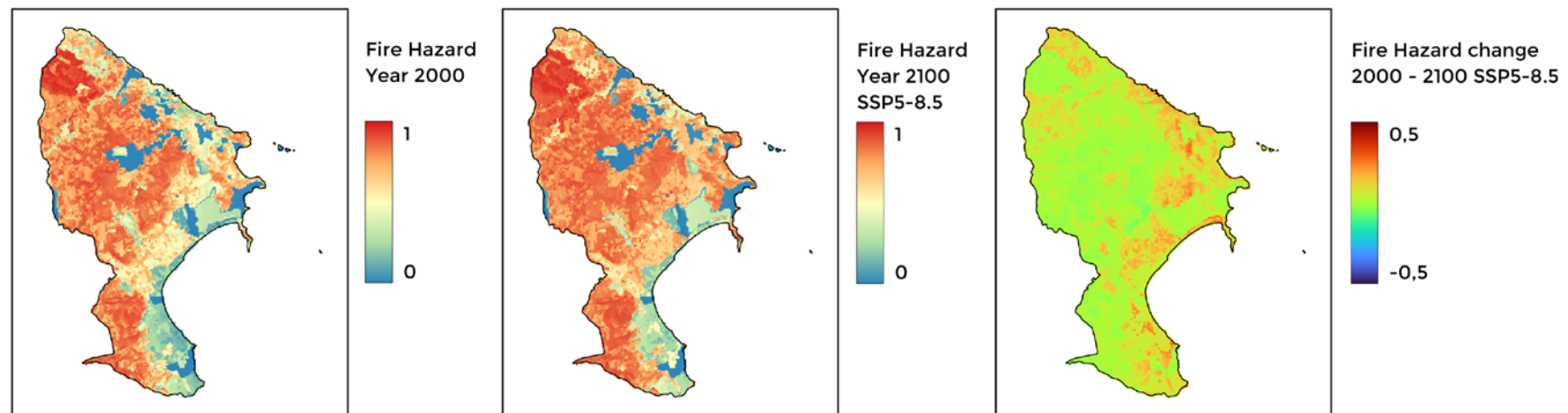
Ο Μαραθώνας εμφανίζει ήδη υψηλές τιμές επικινδυνότητας, οι οποίες αυξάνονται σταθερά στο σενάριο SSP5-8.5. Οι περιοχές υψηλής και πολύ υψηλής επικινδυνότητας επεκτείνονται, ενώ οι μέσες κατηγορίες παραμένουν σταθερές. Στο SSP1-2.6 η αύξηση είναι ηπιότερη αλλά υφίσταται.

Η μείωση της βροχόπτωσης στους ξηρούς μήνες (BIO14) και στο ξηρότερο τρίμηνο (BIO17), σε συνδυασμό με την αύξηση θερμοκρασίας, καθιστά τον Μαραθώνα ιδιαίτερα ευάλωτο. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από χαμηλό υψόμετρο, περιορισμένες βροχοπτώσεις, υψηλές θερμοκρασίες και βλάστηση τυπικά μεσογειακού τύπου (μακί και χαμηλοί θάμνοι).

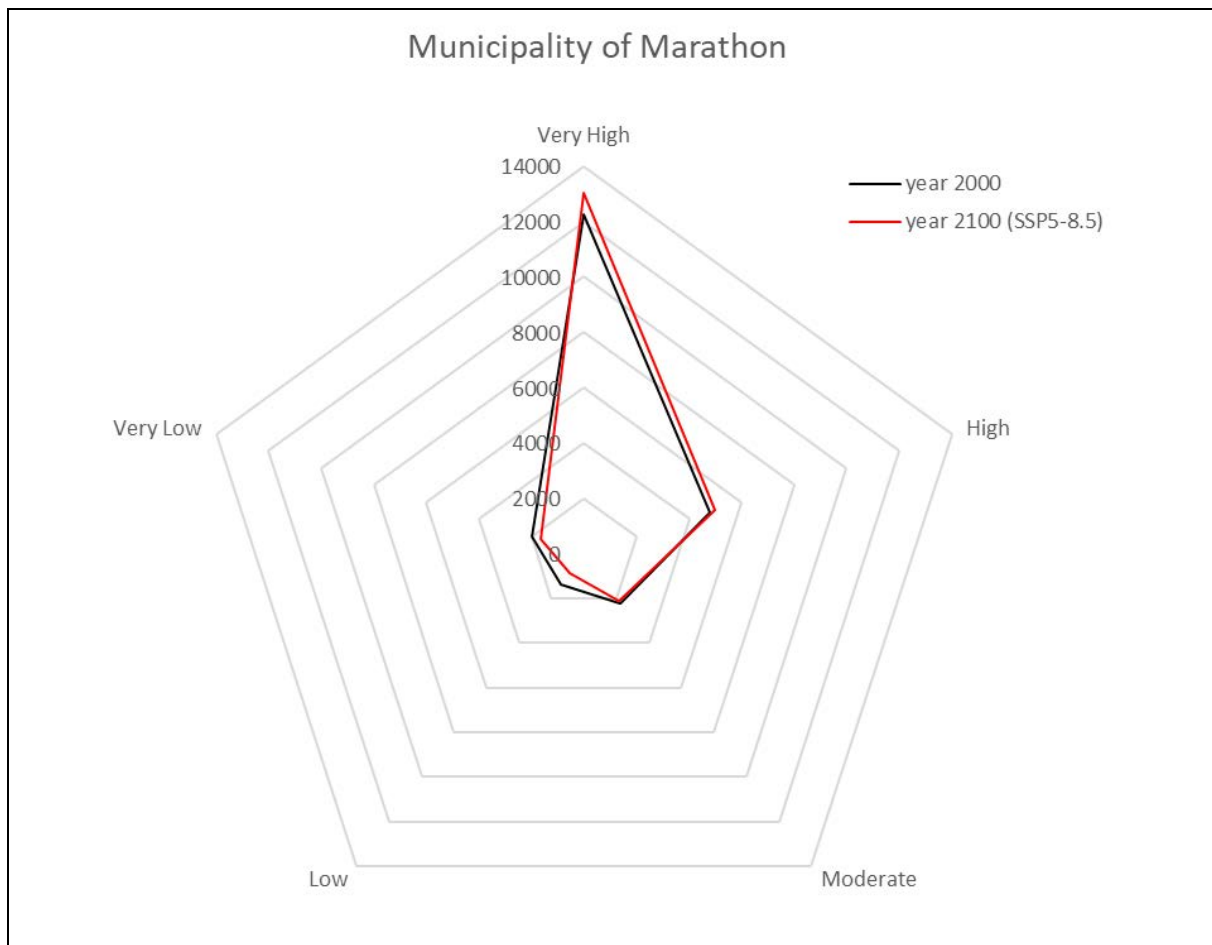
Οι περιοχές πολύ υψηλής επικινδυνότητας αυξάνονται έως το 2100. Η μεταβολή αφορά κυρίως τις παράκτιες και χαμηλότερες ζώνες του Δήμου. Ο Μαραθώνας είναι η μόνη περιοχή με σταθερά ανοδική τάση σε όλα τα σενάρια.



Εικόνα 3 – Επικινδυνότητα πυρκαγιάς για τα διάφορα σενάρια του IPCC στο Δ. Μαραθώνος, Ελλάδα



Εικόνα 4 - Μεταβολή της Επικινδυνότητας Πυρκαγιάς στον Δήμο Μαραθώνα μεταξύ του 2000 και της μελλοντικής προβολής SSP5-8.5 για το 2100



Εικόνα 5 - Διάγραμμα τύπου ραντάρ που απεικονίζει τις μεταβολές στις κατηγορίες επικινδυνότητας μεταξύ 2000 και 2100, στο σενάριο SSP5-8.5, για την περιοχή μελέτης του Δήμου Μαραθώνα

3.5. Συμπεράσματα

Η μελέτη δείχνει ότι, στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής, ο Δήμος Μαραθώνα θα αντιμετωπίσει:

- Αύξηση θερμοκρασίας έως 5–6 °C,
- Μείωση βροχοπτώσεων, ιδιαίτερα στους ξηρούς μήνες,
- Ενίσχυση της επικινδυνότητας πυρκαγιάς, ειδικά στο σενάριο SSP5-8.5,
- Περιορισμένες δυνατότητες φυσικής ανάκαμψης του οικοσυστήματος λόγω παρατεταμένων θερμών και ξηρών περιόδων.

4. Ανάλυση Τάσεων Επικινδυνότητας Πυρκαγιάς

Το Κεφάλαιο 4 του Παραδοτέου D1.3.1 εξετάζει τις μεταβολές της επικινδυνότητας πυρκαγιάς υπό διαφορετικά σενάρια κλιματικής αλλαγής (SSP1-2.6 και SSP5-8.5) και σε δύο χρονικούς ορίζοντες (2060 και 2100). Στόχος είναι να εντοπιστούν οι τάσεις, δηλαδή εάν η επικινδυνότητα αυξάνεται, μειώνεται ή παραμένει σταθερή στις δέκα περιοχές μελέτης του έργου RES2FIRE.

Οι αναλύσεις έδειξαν ότι:

- Στο σενάριο SSP1-2.6, σε πολλές ηπειρωτικές περιοχές παρατηρείται σταδιακή μείωση των υψηλών κατηγοριών επικινδυνότητας.
- Στο σενάριο SSP5-8.5, οι μεσογειακές περιοχές παρουσιάζουν αύξηση στις κατηγορίες «υψηλή» και «πολύ υψηλή» επικινδυνότητα.
- Οι μεταβολές είναι εντονότερες στις περιοχές χαμηλού υψομέτρου και με χαμηλότερες τιμές βροχόπτωσης.

Η στατιστική σύγκριση των χαρτών επικινδυνότητας μεταξύ 2000, 2060 και 2100 δείχνει ότι οι περισσότερες ηπειρωτικές και ορεινές περιοχές (όπως Kozara, Loznica, Velventos) παρουσιάζουν σταθεροποίηση ή μικρή μείωση της επικινδυνότητας, ενώ οι μεσογειακές, όπως ο Δήμος Μαραθώνα, εμφανίζουν σταθερή αύξηση.

4.1. Ανάλυση για τον Δήμο Μαραθώνα

Ο Δήμος Μαραθώνα αποτελεί χαρακτηριστική μεσογειακή περιοχή χαμηλού υψομέτρου, με ήδη υψηλές τιμές επικινδυνότητας πυρκαγιάς. Η ανάλυση των προβολών για το 2060 και το 2100 δείχνει σταθερή αύξηση των πιο επικίνδυνων κατηγοριών, ανεξαρτήτως σεναρίου, με εντονότερη τάση στο SSP5-8.5.

- Στο σενάριο SSP1-2.6, η επικινδυνότητα αυξάνεται ελαφρώς έως το 2060, αλλά σταθεροποιείται έως το 2100. Οι κατηγορίες «υψηλή» και «πολύ υψηλή» επεκτείνονται οριακά.
- Στο σενάριο SSP5-8.5, η επικινδυνότητα αυξάνεται σημαντικά τόσο το 2060 όσο και το 2100, με τις ζώνες «πολύ υψηλής επικινδυνότητας» να καλύπτουν μεγαλύτερο ποσοστό του Δήμου.

Η αύξηση εντοπίζεται κυρίως στις παράκτιες και πεδινές ζώνες του Δήμου, όπου η βλάστηση είναι περισσότερο εύφλεκτη και οι θερμοκρασίες υψηλότερες. Τα ενδοχώρια και ελαφρώς πιο ορεινά τμήματα παραμένουν σχετικά σταθερά.

Σε σύγκριση με τις υπόλοιπες περιοχές του έργου, ο Μαραθώνας είναι η μοναδική περιοχή που εμφανίζει συνεχή αύξηση της επικινδυνότητας σε όλα τα χρονικά βήματα και στα δύο σενάρια. Αντίθετα, περιοχές όπως το Δάσος Βελβεντού, τα Όρη Osogono και το Εθνικό Πάρκο

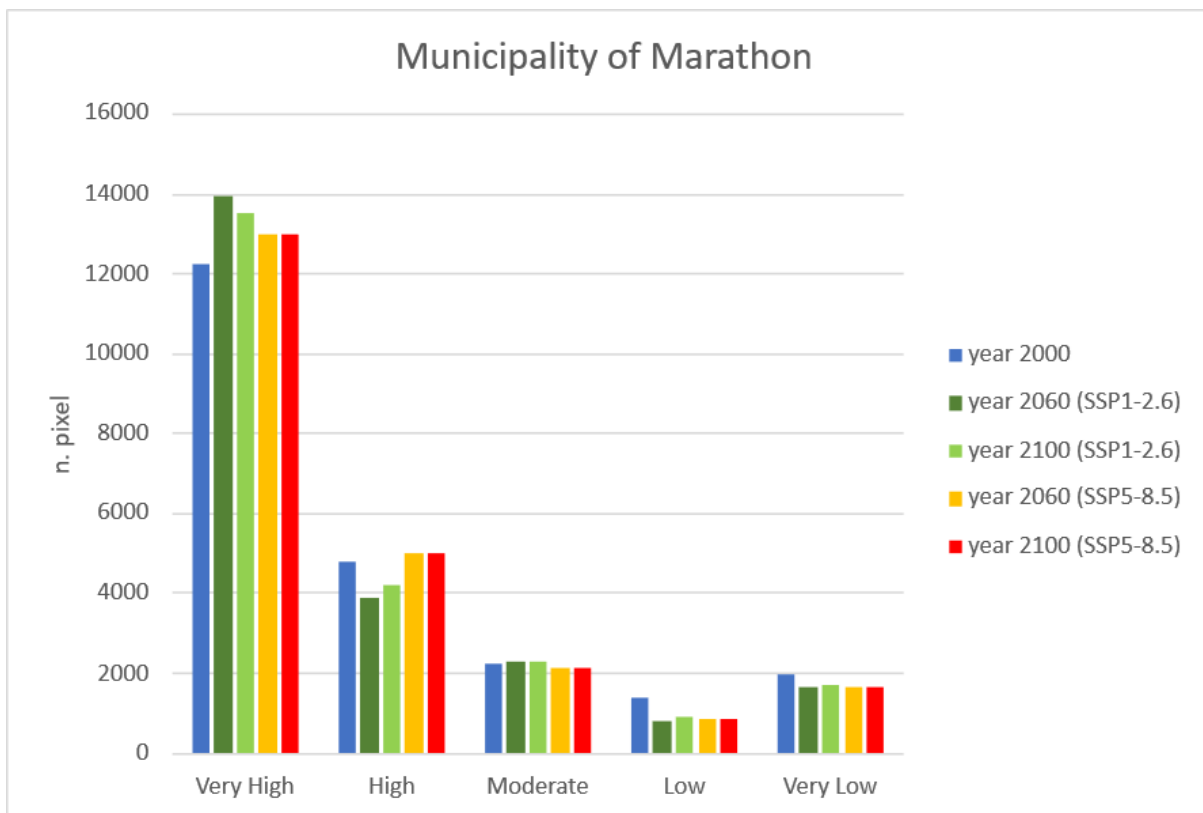
Kozara παρουσιάζουν σταθεροποίηση ή και μείωση των υψηλών κατηγοριών επικινδυνότητας.

Η αυξητική τάση στον Μαραθώνα συνδέεται άμεσα με:

- Την προϋπάρχουσα ξηρότητα του τοπικού μικροκλίματος.
- Τη μείωση των βροχοπτώσεων κατά τους ξηρούς μήνες.
- Την αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη θερινή περίοδο.
- Την ύπαρξη συνεχών καύσιμων υλών σε χαμηλή βλάστηση.

4.2. Συμπεράσματα για τον Μαραθώνα

Ο Δήμος Μαραθώνα παρουσιάζει την πιο σταθερή και καθαρά αυξητική τάση επικινδυνότητας πυρκαγιάς στις περιοχές που μελετήθηκαν στην Αδριατική στα πλαίσια του έργου. Από το 2000 έως το 2100, οι δείκτες επικινδυνότητας μετατοπίζονται προς τις υψηλότερες κατηγορίες, ανεξάρτητα από το σενάριο SSP που εφαρμόζεται. Η περιοχή αποτελεί επομένως χαρακτηριστικό παράδειγμα μεσογειακού περιβάλλοντος που επηρεάζεται ισχυρά από τη μείωση βροχόπτωσης και την αύξηση θερμοκρασίας.



Εικόνα 6 Μεταβολές στις κατηγορίες επικινδυνότητας πυρκαγιάς υπό τα διάφορα σενάρια του IPCC στον Δήμο Μαραθώνα (Ελλάδα)

5. Μεθοδολογία Εκτίμησης Κινδύνου Πυρκαγιάς

Οι χάρτες κινδύνου πυρκαγιάς μπορούν να παραχθούν συνδυάζοντας τους χάρτες επικινδυνότητας πυρκαγιάς (Fire Hazard Maps) με την τρωτότητα (Vulnerability) και την έκθεση στον κίνδυνο πυρκαγιάς (Exposure to Wildfire Risk).

Πιο συγκεκριμένα, η τρωτότητα σε δασικές πυρκαγιές ορίζεται ως η πιθανότητα εμφάνισης αρνητικών επιπτώσεων ή ζημιών σε ανθρώπινα συστήματα (όπως πληθυσμούς, κοινότητες και υποδομές) και φυσικά συστήματα (όπως οικοσυστήματα, βιοποικιλότητα και φυσικούς πόρους), όταν εκτεθούν σε πυρκαγιά.

Η τρωτότητα είναι γενικά συνάρτηση της έκθεσης, δηλαδή της παρουσίας ανθρώπων, περιουσιακών στοιχείων, οικονομικών δραστηριοτήτων ή περιβαλλοντικών πόρων σε περιοχές όπου είναι πιθανή η εκδήλωση πυρκαγιάς. Ουσιαστικά, η εκτίμηση της τρωτότητας σε δασικές πυρκαγιές συνεπάγεται την κατανόηση:

- ποιοι ή τι βρίσκεται σε κίνδυνο,
- πόσο ευάλωτοι είναι στις επιπτώσεις,
- και ποια είναι η ικανότητά τους να ανταποκριθούν και να ανακάμψουν μετά από μια πυρκαγιά.

Η τρωτότητα είναι πολυπαραγοντική και παρουσιάζει χωρική μεταβλητότητα, εξαρτώμενη από ένα σύνολο παραμέτρων — πολλές από τις οποίες είναι δύσκολο να εκτιμηθούν ή να ποσοτικοποιηθούν (Nunes et al., 2023).

Σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια, οι δύο σημαντικότεροι παράγοντες για την εκτίμηση της τρωτότητας στις δασικές πυρκαγιές είναι:

1. Η πληθυσμιακή πυκνότητα, και
2. Η οικολογική αξία των οικοσυστημάτων.

Για παράδειγμα:

- Μια υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο αριθμό πυρκαγιών ανθρωπογενούς προέλευσης, σε μεγαλύτερες ανάγκες για καταστολή, σε κατακερματισμό του τοπίου και σε μείωση των διαθέσιμων καυσίμων.
- Αντίθετα, πολύ χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα μπορεί επίσης να αυξήσει τη συχνότητα των πυρκαγιών λόγω εγκατάλειψης της γης και μειωμένης διαχείρισης της βλάστησης.

Οι περιοχές υψηλής οικολογικής αξίας είναι ιδιαιτέρως ευάλωτες σε πυρκαγιές όταν δεν είναι καλά προσαρμοσμένες στη φωτιά ή όταν το πυρικό καθεστώς τους έχει αλλοιωθεί. Τέτοιες περιοχές μπορεί να υποστούν:

- σημαντικές απώλειες βιοποικιλότητας,
- διατάραξη κρίσιμων οικολογικών διεργασιών,
- και καταστροφή ενδιαιτημάτων ειδών που ήδη βρίσκονται σε κίνδυνο.

Ακόμη και οικοσυστήματα που είναι προσαρμοσμένα στη φωτιά μπορούν να υπερβούν τα όρια ανθεκτικότητάς τους εάν οι πυρκαγιές γίνονται συχνότερες ή πιο έντονες, οδηγώντας σε σοβαρές οικολογικές βλάβες.

5.1. Μεθοδολογία Αξιολόγησης Τρωτότητας

Η μεθοδολογική προσέγγιση που εφαρμόστηκε για την εκτίμηση της τρωτότητας έναντι των δασικών πυρκαγιών είναι σαφής, επαναλήψιμη και εύκολα εφαρμόσιμη σε διαφορετικές περιοχές. Βασίζεται στη κανονικοποίηση (normalisation) των επιλεγμένων μεταβλητών που εμπλέκονται στη διαδικασία — δηλαδή της πληθυσμιακής πυκνότητας και της οικολογικής αξίας των δασικών σχηματισμών — και στη μεταξύ τους σύγκριση. Κατά τη διαδικασία, γίνεται συντηρητική υπόθεση, όπου λαμβάνεται ως αντιπροσωπευτική της τρωτότητας η μέγιστη τιμή μεταξύ των δύο δεικτών (πληθυσμιακής και οικολογικής αξίας), ώστε να μην υποτιμηθεί ο συνολικός κίνδυνος πυρκαγιάς.

5.1.1. Σύνολα Δεδομένων που Χρησιμοποιήθηκαν για την Ανάλυση

Για την εκτίμηση της τρωτότητας σε δασικές πυρκαγιές χρησιμοποιήθηκαν δύο κύριες ομάδες δεδομένων, οι οποίες σχετίζονται με:

1. την πληθυσμιακή πυκνότητα, και
2. την οικολογική αξία των δασικών οικοσυστημάτων.

Πληθυσμιακή Πυκνότητα

Τα δεδομένα πληθυσμιακής πυκνότητας προήλθαν από την παγκόσμια βάση δεδομένων WorldPop (<https://www.worldpop.org/>), η οποία παρέχει χωρικές προβολές πληθυσμού σε ανάλυση 1 km. Η συγκεκριμένη πηγή χρησιμοποιεί στατιστικές εθνικών απογραφών, συνδυασμένες με δορυφορικά δεδομένα χρήσεων γης και υποδομών, ώστε να αποδίδει ρεαλιστικούς χάρτες κατανομής πληθυσμού.

Η μεταβλητή αυτή θεωρείται καθοριστικής σημασίας για την τρωτότητα, καθώς η ανθρώπινη παρουσία αυξάνει την πιθανότητα εκδήλωσης και εξάπλωσης πυρκαγιών, επηρεάζει την πρόσβαση των υπηρεσιών καταστολής και προσδιορίζει τον δυνητικό αριθμό ατόμων και περιουσιακών στοιχείων που μπορεί να πληγούν.

Οικολογική Αξία

Η εκτίμηση της οικολογικής αξίας πραγματοποιήθηκε μέσω ανάλυσης δεδομένων που αφορούν τις δασικές και φυσικές εκτάσεις, τα είδη βλάστησης και την περιβαλλοντική προστασία.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν:

- οι χάρτες **CORINE Land Cover 2018 (CLC 2018)**,
- και δεδομένα από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (EEA) και το **Natura 2000 network**, όπου ήταν διαθέσιμα.

Οι περιοχές που χαρακτηρίζονται από υψηλή περιβαλλοντική αξία (π.χ. προστατευόμενες περιοχές, ζώνες υψηλής βιοποικιλότητας, οικοσυστήματα σπάνιας βλάστησης) θεωρήθηκαν περισσότερο ευάλωτες σε περιβαλλοντικές απώλειες σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Κανονικοποίηση και Ενσωμάτωση Δεδομένων

Κάθε σύνολο δεδομένων κανονικοποιήθηκε σε κοινή κλίμακα 0–1, ώστε να είναι δυνατή η συγκριτική ανάλυση. Η διαδικασία περιελάμβανε:

- αναγωγή των τιμών κάθε μεταβλητής στην ίδια χωρική ανάλυση (1 km²),
- επαναδειγματοληψία (resampling) όπου απαιτούνταν,
- και στατιστική τυποποίηση ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική επίδραση εξαιρετικών τιμών (outliers).

Μετά την κανονικοποίηση, οι δύο δείκτες (πληθυσμιακή πυκνότητα και οικολογική αξία) συνδυάστηκαν με λογική «maximum operator» — δηλαδή για κάθε κελί του πλέγματος, η μεγαλύτερη τιμή θεωρήθηκε ως η αντιπροσωπευτική τρωτότητα της συγκεκριμένης θέσης. Αυτό εξασφαλίζει ότι σε περιοχές όπου είτε η ανθρώπινη παρουσία είτε η οικολογική αξία είναι υψηλή, η συνολική τρωτότητα δεν θα υποεκτιμηθεί.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας κανονικοποίησης και συνδυασμού των δεικτών πληθυσμιακής πυκνότητας και οικολογικής αξίας οδήγησε στη δημιουργία **χαρτών τρωτότητας (Vulnerability Maps)** για όλες τις περιοχές μελέτης του έργου. Οι χάρτες αυτοί απεικονίζουν τη χωρική κατανομή της ευαλωτότητας των φυσικών και ανθρωπογενών συστημάτων απέναντι σε δασικές πυρκαγιές.

5.1.2. Αποτελέσματα αξιολόγησης τρωτότητας

Η ανάλυση κατέδειξε ότι η τρωτότητα παρουσιάζει έντονη χωρική διαφοροποίηση μεταξύ των περιοχών της Αδριατικής–Ιονίου (ADRION).

- Σε ορισμένες περιοχές η υψηλή πληθυσμιακή συγκέντρωση αποτελεί τον κύριο παράγοντα τρωτότητας, ενώ

- σε άλλες, η παρουσία ευαίσθητων οικοσυστημάτων υψηλής οικολογικής αξίας είναι ο καθοριστικός παράγοντας.

Συνολικά, οι περιοχές με πυκνή ανθρώπινη παρουσία και έντονη οικιστική ή τουριστική δραστηριότητα εμφανίζουν υψηλές τιμές τρωτότητας, εξαιτίας της αυξημένης πιθανότητας εκδήλωσης πυρκαγιών, των κινδύνων για ανθρώπινες απώλειες και της πίεσης στα συστήματα καταστολής.

Αντίθετα, σε περιοχές με χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα αλλά υψηλή οικολογική αξία (π.χ. προστατευόμενες περιοχές ή πυκνά δάση), η τρωτότητα προκύπτει κυρίως από τον κίνδυνο οικολογικών απωλειών και απώλειας βιοποικιλότητας.

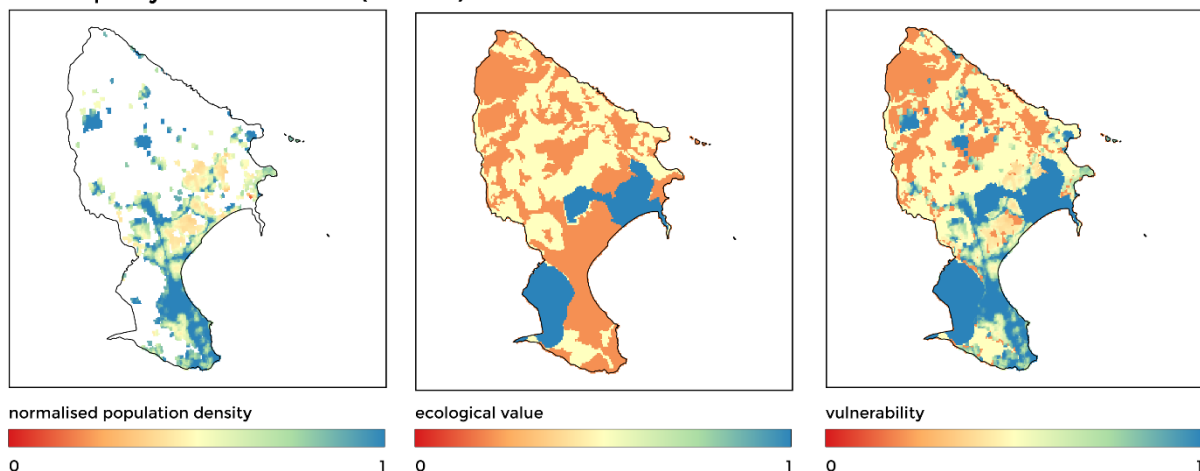
Ο Δήμος Μαραθώνα εμφανίζει υψηλή τρωτότητα, καθώς συνδυάζει έντονη οικιστική και τουριστική δραστηριότητα με φυσικά οικοσυστήματα ευαίσθητα στη φωτιά.

Η τρωτότητα, όπως χαρτογραφήθηκε, δεν ταυτίζεται με την επικινδυνότητα (hazard), αλλά συμπληρώνει την κατανόηση του συνολικού κινδύνου (risk). Για παράδειγμα:

- Μια περιοχή μπορεί να έχει υψηλή επικινδυνότητα (λόγω ξηρού κλίματος και καυσίμων), αλλά χαμηλή τρωτότητα (λόγω χαμηλού πληθυσμού ή περιορισμένων οικολογικών αξιών).
- Αντίθετα, μια περιοχή μέσης επικινδυνότητας αλλά υψηλής οικολογικής ή κοινωνικής αξίας μπορεί να παρουσιάζει υψηλό συνολικό κίνδυνο.

Η ενσωμάτωση των δύο αυτών συνιστωσών (hazard και vulnerability) είναι κρίσιμη για την εκτίμηση της ανθεκτικότητας (resilience) και τον σχεδιασμό πολιτικών πρόληψης και προσαρμογής.

Municipality of Marathonas (Greece)



Εικόνα 7 – Κανονικοποιημένη πυκνότητα πληθυσμού, οικολογική αξία και τρωτότητα στο Δήμο Μαραθώνος

5.2. Χαρτογράφηση Κινδύνου Πυρκαγιάς

Η διαδικασία δημιουργίας των χαρτών κινδύνου πυρκαγιάς (Fire Risk Maps) στηρίχθηκε στον συνδυασμό των χαρτών επικινδυνότητας (Fire Hazard) με τους χάρτες τρωτότητας (Vulnerability) που αναπτύχθηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Ο στόχος ήταν να δημιουργηθεί μια ολοκληρωμένη χωρική απεικόνιση του συνολικού κινδύνου πυρκαγιάς, η οποία λαμβάνει υπόψη τόσο τη φυσική πιθανότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς όσο και τις δυνητικές επιπτώσεις της σε ανθρώπινα και οικολογικά συστήματα.

Η έννοια του κινδύνου βασίζεται στον συνδυασμό τριών παραγόντων:

1. Επικινδυνότητα (Hazard) — δηλαδή η πιθανότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς υπό συγκεκριμένες περιβαλλοντικές και κλιματικές συνθήκες.
2. Έκθεση (Exposure) — η παρουσία στοιχείων (ανθρώπων, υποδομών, περιβαλλοντικών αξιών) στις περιοχές που ενδέχεται να πληγούν.
3. Τρωτότητα (Vulnerability) — ο βαθμός ευαισθησίας ή ανθεκτικότητας των στοιχείων αυτών απέναντι στις πυρκαγιές.

Η μεθοδολογία που υιοθετήθηκε από το έργο RES2FIRE εστιάζει στον συνδυασμό των δύο πρώτων συνιστωσών — επικινδυνότητα και τρωτότητα — καθώς τα δεδομένα έκθεσης περιλαμβάνονται έμμεσα μέσω της πληθυσμιακής πυκνότητας και της οικολογικής αξίας.

Ο Δείκτης Κινδύνου Πυρκαγιάς (Fire Risk Index) υπολογίστηκε ως σταθμισμένος συνδυασμός των χαρτών επικινδυνότητας (Fire Hazard) και τρωτότητας (Vulnerability), σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Chuvieco et al. (2023).

Συγκεκριμένα, αποδόθηκε βαρύτητα 0,6 στον χάρτη επικινδυνότητας και βαρύτητα 0,4 στον χάρτη τρωτότητας, ώστε να αποτυπώνεται η υψηλότερη σχετική σημασία της επικινδυνότητας ως συνιστώσας του κινδύνου, δεδομένου ότι αυτή συνδέεται άμεσα με την πιθανότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς, ενώ η τρωτότητα εκφράζει κυρίως τις δυνητικές επιπτώσεις σε ανθρώπινα και οικολογικά συστήματα.

Η σχέση μεταξύ των δύο παραμέτρων δίνεται από τον τύπο:

$$\text{Fire Risk Index} = (0.6 \times \text{Fire Hazard}) + (0.4 \times \text{Vulnerability})$$

Η συγκεκριμένη στάθμιση ακολουθεί τη διεθνώς αποδεκτή προσέγγιση για την εκτίμηση κινδύνου πυρκαγιάς, όπως έχει τεκμηριωθεί στη βιβλιογραφία (Chuvieco et al., 2023· Nunes et al., 2023· Modica et al., 2021· Bajocco et al., 2017), και επιτρέπει την εξισορρόπηση μεταξύ της πιθανότητας εκδήλωσης πυρκαγιάς και των επιπτώσεων της στα ευάλωτα οικοσυστήματα και τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Και οι δύο μεταβλητές είχαν προηγουμένως κανονικοποιηθεί σε κοινή κλίμακα (0–1).

Ο τελικός δείκτης κινδύνου κατηγοριοποιήθηκε σε πέντε επίπεδα:

- Πολύ χαμηλός κίνδυνος (0.00–0.20)
- Χαμηλός (0.21–0.40)
- Μέτριος (0.41–0.60)
- Υψηλός (0.61–0.80)
- Πολύ υψηλός (0.81–1.00)

Οι κατηγορίες αυτές επιλέχθηκαν ώστε να διευκολύνουν την ερμηνεία και τη συγκρισιμότητα μεταξύ περιοχών, αλλά και να υποστηρίξουν τη λήψη αποφάσεων για πρόληψη και σχεδιασμό διαχείρισης κινδύνου.

Για κάθε μία από τις δέκα περιοχές μελέτης δημιουργήθηκαν χάρτες κινδύνου πυρκαγιάς (Fire Risk Maps). Αυτοί οι χάρτες ενσωματώνουν τη χωρική πληροφορία της επικινδυνότητας και της τρωτότητας, παρουσιάζοντας με σαφή τρόπο τις ζώνες όπου ο συνολικός κίνδυνος είναι υψηλότερος.

Στις περισσότερες περιοχές παρατηρείται ότι οι ζώνες υψηλού κινδύνου συμπίπτουν με:

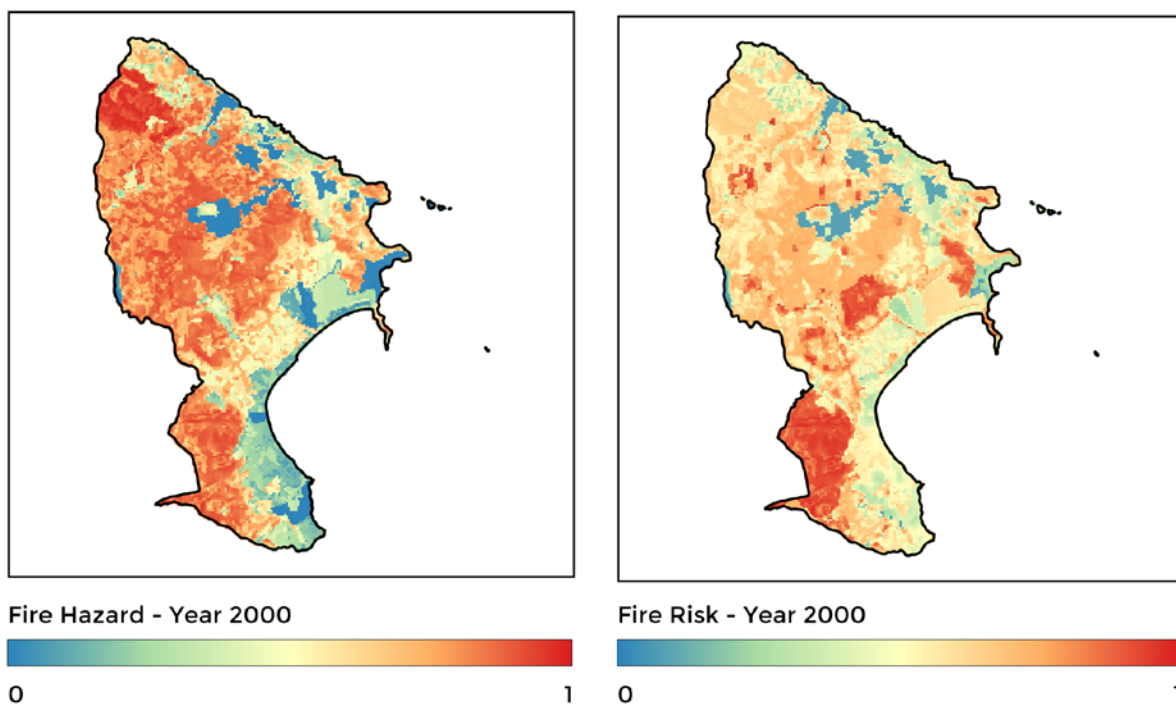
- περιοχές πυκνής βλάστησης,
- χαμηλού υψομέτρου,
- και υψηλής πληθυσμιακής συγκέντρωσης.

Αντίθετα, οι ορεινές και λιγότερο κατοικημένες περιοχές παρουσιάζουν χαμηλότερο συνολικό κίνδυνο.

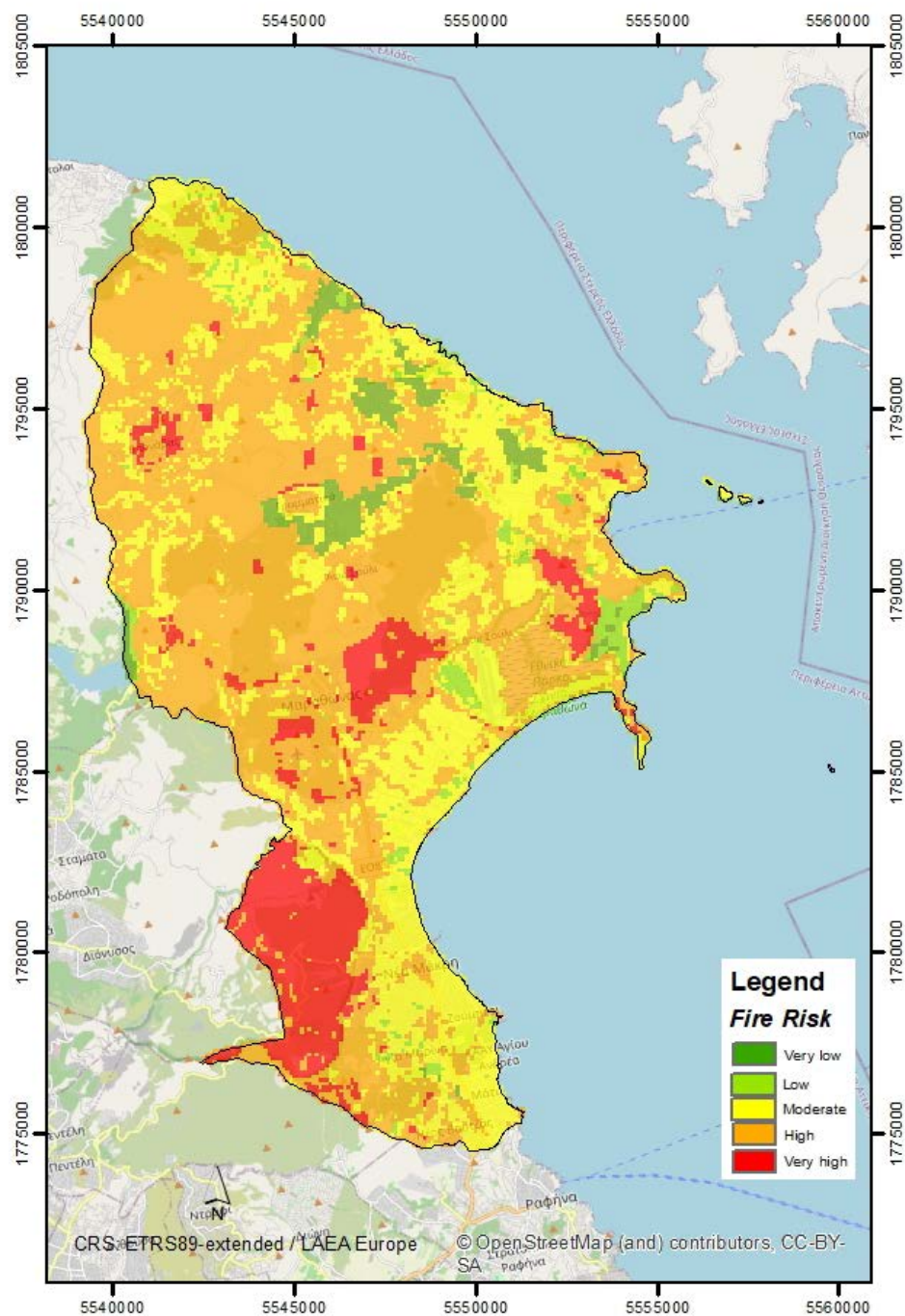
- **Δήμος Μαραθώνα:** Παρουσιάζει **υψηλό συνολικό κίνδυνο**, καθώς οι υψηλές τιμές επικινδυνότητας (λόγω ξηρού μεσογειακού κλίματος) συνδυάζονται με μεγάλη πληθυσμιακή πυκνότητα και έντονη τουριστική δραστηριότητα.

Η χωρική ανάλυση δείχνει ότι οι πιο ευάλωτες ζώνες στον Μαραθώνα είναι οι παράκτιες και οι πεδινές περιοχές, ενώ στα πιο ορεινά τμήματα ο κίνδυνος είναι μέτριος.

Municipality of Marathonas (Greece)



Εικόνα 8 – Επικινδυνότητα και Κίνδυνος Δασικών Πυρκαγιών το Έτος 2000 – Δήμος Μαραθώνα (Ελλάδα)



Εικόνα 9 - Χάρτης Εκτίμησης Κινδύνου Δασικών Πυρκαγιών – Δήμος Μαραθώνα (Ελλάδα)

6. Σύνοψη

Αφού αξιολογήθηκε η βέλτιστη μεθοδολογία για τον προσδιορισμό της επικινδυνότητας πυρκαγιάς στην υφιστάμενη κατάσταση (βλ. RES2FIRE Παραδοτέο 1.2.1), το παρόν παραδοτέο ανέλυσε το πώς η επικινδυνότητα αυτή μεταβάλλεται υπό τις συνθήκες της κλιματικής αλλαγής.

Ειδικότερα, εφαρμόστηκαν δύο σενάρια του IPCC για χρονικούς ορίζοντες έως το 2060 και το 2100, τα οποία αντιπροσωπεύουν τα δύο άκρα των πολιτικών οικονομικής ανάπτυξης και, κατ' επέκταση, των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου:

- από τη βιώσιμη και περιβαλλοντικά συνειδητή ανάπτυξη (SSP1-2.6),
- έως την ανεξέλεγκτη ανάπτυξη χωρίς περιβαλλοντικούς περιορισμούς (SSP5-8.5).

Η εφαρμογή των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (Machine Learning) έδειξε, μέσω στατιστικής ανάλυσης, ότι ο επιλεγμένος αλγόριθμος (λογιστική παλινδρόμηση ή μέγιστη εντροπία) αποδίδει με ακρίβεια τη μεταβολή της επικινδυνότητας πυρκαγιάς διαχρονικά.

Αξιοσημείωτο είναι ότι οι δέκα περιοχές μελέτης της Αδριατικής παρουσιάζουν διαφορετικές τάσεις ως προς την εξέλιξη της επικινδυνότητας:

- Στις περιοχές με πιο ηπειρωτικό κλίμα, σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη και σε υψηλότερα υψόμετρα, δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή της επικινδυνότητας πυρκαγιάς. Αυτό οφείλεται στο ότι οι κλιματικές μεταβλητές που σχετίζονται με τη βροχόπτωση στις περιοχές αυτές δεν παρουσιάζουν σημαντική μείωση ούτε στη μέση ετήσια βροχόπτωση ούτε στις τιμές των θερμότερων περιόδων του έτους.
- Αντίθετα, σε περιοχές με εντονότερο μεσογειακό κλίμα, όπου οι τιμές επικινδυνότητας είναι ήδη υψηλές, η μείωση των βροχοπτώσεων έχει ακόμη ισχυρότερη επίδραση στην αύξηση της επικινδυνότητας πυρκαγιάς, ιδίως μακροπρόθεσμα και στο πιο ακραίο σενάριο (SSP5-8.5).

Επιπλέον, η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι οι κλιματικές μεταβλητές — και κυρίως εκείνες που σχετίζονται με τη βροχόπτωση — ασκούν τη μεγαλύτερη επιρροή στον καθορισμό των μεταβολών της επικινδυνότητας πυρκαγιάς σε ηπειρωτικό κλίμακα.

Ένα από τα κύρια αποτελέσματα της μελέτης είναι η ανάπτυξη μιας εναρμονισμένης και μεταφέρσιμης διαδικασίας για την αποτύπωση της επικινδυνότητας πυρκαγιάς, τόσο στην τρέχουσα κατάσταση όσο και σε προβολές υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής.

Ο καθορισμός του καταλληλότερου αλγορίθμου, των επιλεγμένων μεταβλητών και της σχετικής τους βαρύτητας, καθώς και των συντελεστών της συνάρτησης, καθιστά δυνατή την εύκολη και συνεπή εκτίμηση της επικινδυνότητας πυρκαγιάς για ολόκληρη την περιοχή IPA ADRION, τόσο στο παρόν όσο και σε μελλοντικά σενάρια.

Η εργασία ολοκληρώθηκε με τη διαμόρφωση μιας ενοποιημένης μεθοδολογίας για την εκτίμηση του συνολικού κινδύνου πυρκαγιάς (Fire Risk) για τις περιοχές μελέτης, διαδικασία η οποία είναι εφαρμόσιμη και στο σύνολο της περιοχής του Προγράμματος.

Για τον προσδιορισμό του κινδύνου, αξιολογήθηκε η τρωτότητα λαμβάνοντας υπόψη:

- αφενός την οικολογική αξία (Ecological Value, EV), και
- αφετέρου την ευαλωτότητα του ανθρώπινου πληθυσμού που εκτίθεται σε πιθανή πυρκαγιά.

Ο συνδυασμός των δεδομένων αυτών με τα αποτελέσματα της επικινδυνότητας επέτρεψε τον υπολογισμό του συνολικού κινδύνου πυρκαγιάς, ο οποίος αποτυπώνει όχι μόνο την πιθανότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς, αλλά και το δυνητικό περιβαλλοντικό και κοινωνικό κόστος που θα μπορούσε να προκύψει.

7. Βιβλιογραφία

Bajocco, S. et al. (2017). Mapping Fire Risk in Mediterranean Landscapes through the Integration of Environmental and Anthropogenic Factors. *Ecological Indicators*, 73, 220–230

Chuvieco, E.; Yebra, M.; Martino, S.; Thonicke, K.; Gómez-Giménez, M.; San-Miguel, J.; Oom, D.; Velea, R.; Mouillot, F.; Molina, J.R.; et al. Towards an Integrated Approach to Wildfire Risk Assessment: When, Where, What and How May the Landscapes Burn. *Fire* 2023, 6, 215. <https://doi.org/10.3390/fire6050215>.

Nieves, J.J.; Sorichetta, A.; Linard, C.; Bondarenko, M.; Steele, J.E.; Stevens, F.R.; Gaughan, A.E.; Carioli, A.; Clarke, D.J.; Esch, T.; et al. Annually Modelling Built-Settlements between Remotely-Sensed Observations Using Relative Changes in Subnational Populations and Lights at Night. *Computers, Environment and Urban Systems* 2020, 80, 101444, doi:10.1016/j.compenvurbsys.2019.101444.

Nunes, A.N.; Figueiredo, A.; Pinto, C.D.; Lourenço, L. An Evaluation of Wildfire Vulnerability in the Wildland–Urban Interfaces of Central Portugal Using the Analytic Network Process. *Fire* 2023, 6, 194, doi:10.3390/fire6050194.

Modica, G. et al. (2021). A Multi-Criteria Spatial Approach for Assessing Fire Risk in Wildland–Urban Interface Areas. *Environmental Modelling & Software*, 142, 105084.