

Interreg



Co-funded by
the European Union

IPA ADRION

RES2FIRE

Έκθεση για το Μοντέλο Προσομοίωσης της Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς (Παράρτημα για το Δ. Μαραθώνος)

Πακέτο Εργασίας 2

Πιλοτικές δράσεις για την αξιολόγηση των παρεμβάσεων διαχείρισης καύσιμης ύλης με τη
χρήση μοντέλου προσομοίωσης συμπεριφοράς πυρκαγιάς

(Παραδοτέο 2.1.1)

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. Μεθοδολογία	6
3. Συνολική Εικόνα Αποτελεσμάτων	8
4. Περιοχή Μελέτης: Δήμος Μαραθώνα, Ελλάδα	10
4.1. Γενικά χαρακτηριστικά της Περιοχής	10
4.2. Ιστορικό και πρόσφατα συμβάντα πυρκαγιών	10
4.3. Το πρόγραμμα “antiNERO” και η εφαρμογή του στον Μαραθώνα	11
4.3.1. Δομημένη Προσέγγιση Ζωνών Πυροπροστασίας σε Περιοχές Διεπαφής Δάσους–Οικισμού (WUI)	12
4.3.2. Τεχνικές Προδιαγραφές και Θεσμικό Πλαίσιο	13
4.3.3. Επιχειρησιακές Παράμετροι	14
4.4. Ζωνική Προσέγγιση πυροπροστασίας	15
4.5. Παραδείγματα εφαρμογής και παρατηρήσεις	16
4.6. Οικονομικά δεδομένα και τοπικές δράσεις	16
4.7. Συμπεράσματα για την περιοχή του Μαραθώνα	17
4.8. Συμπεράσματα για το Μοντέλο Προσομοίωσης	17
5. Συνολική Αξιολόγηση και Συστάσεις Πολιτικής	19
6. Βιβλιογραφία	21

1. Εισαγωγή

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν μια ολοένα αυξανόμενη παγκόσμια απειλή για τα οικοσυστήματα, τις ανθρώπινες υποδομές και την ποιότητα του αέρα. Η κλιματική αλλαγή συμβάλλει στην αύξηση της συχνότητας και της σφοδρότητας των πυρκαγιών, ενώ οι δημογραφικές μεταβολές σε περιοχές υψηλού κινδύνου εντείνουν τις πιθανές επιπτώσεις τους. Το παραδοτέο D2.1.1 του έργου RES2FIRE έχει ως κύριο αντικείμενο την ανάπτυξη και προσαρμογή ενός μοντέλου προσομοίωσης της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών (Fire Behavior Simulation Model). Σκοπός του είναι να συμβάλει στην κατανόηση των μηχανισμών εξάπλωσης της φωτιάς και να επιτρέψει την αξιολόγηση διαφορετικών πρακτικών πρόληψης και διαχείρισης της καύσιμης ύλης σε περιοχές υψηλού κινδύνου.

Το λεγόμενο «τρίγωνο της συμπεριφοράς της φωτιάς» (Fire Behaviour Triangle) αποτυπώνει τις βασικές μεταβλητές που επηρεάζουν τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς:

- Η καύσιμη ύλη, κυρίως η ζωντανή και νεκρή βλάστηση, αποτελεί το πρωτεύον καύσιμο υλικό.
- Οι καιρικές συνθήκες, όπως ο άνεμος, η θερμοκρασία του αέρα, οι κατακρημνίσεις και η υγρασία, καθορίζουν την ένταση και την κατεύθυνση της φωτιάς.
- Η τοπογραφία επηρεάζει άμεσα την ταχύτητα εξάπλωσης και το είδος της καύσιμης ύλης που καίγεται.

Η αλληλεπίδραση αυτών των παραγόντων διαμορφώνει τη συμπεριφορά και την ένταση μιας πυρκαγιάς.

Ο όρος «συμπεριφορά πυρκαγιάς» (fire behaviour) χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα γενικά χαρακτηριστικά μιας φωτιάς, όπως:

- ο ρυθμός της εξάπλωσής της προς την κατεύθυνση του ανέμου,
- η ένταση της γραμμής φωτιάς,
- η γεωμετρία της φλόγας,
- και ο ρυθμός αύξησης της περιμέτρου του μετώπου (Sullivan, 2010).

Η πολύπλοκη και δυναμική φύση της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών, η οποία καθορίζεται από την αλληλεπίδραση μετεωρολογικών προτύπων, χαρακτηριστικών της βλάστησης και μορφολογικών γνωρισμάτων του εδάφους, καθιστά αναγκαία τη χρήση προηγμένων εργαλείων για την αποτελεσματική πρόληψη, αντιμετώπιση και διαχείρισή τους.

Σε αυτό το πλαίσιο, τα μοντέλα προσομοίωσης της συμπεριφοράς της φωτιάς (fire behaviour models) αποτελούν απαραίτητα εργαλεία για τη διαχείριση δασών και την πρόληψη πυρκαγιών, καθώς παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να εξαπλωθεί μια πυρκαγιά υπό διαφορετικές συνθήκες και για το πώς διάφορες παρεμβάσεις

μπορούν να συμβάλουν στη μείωση του κινδύνου. Τα μοντέλα αυτά διαφέρουν ως προς τη μεθοδολογία, τις δυνατότητες και τις εφαρμογές τους, καλύπτοντας διαφορετικές ανάγκες διαχείρισης. Επιτρέπουν στους φορείς δασοπροστασίας και στους διαχειριστές γης να αναπτύσσουν προληπτικές στρατηγικές, να βελτιστοποιούν τη διάθεση των πόρων κατά τη διάρκεια πυρκαγιών και να αξιολογούν την αποτελεσματικότητα των μέτρων διαχείρισης της καύσιμης ύλης.

Η Δραστηριότητα 2.1 του έργου RES2FIRE, με τίτλο «Προσαρμογή μοντέλου προσομοίωσης συμπεριφοράς πυρκαγιάς και ανάπτυξη προηγμένων τεχνικών οπτικοποίησης της εξάπλωσης», στοχεύει στην επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου προσομοίωσης, ικανού να αποδώσει με ακρίβεια τα κύρια χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς, όπως:

- τον ρυθμό εξάπλωσης (Rate of Spread – ROS),
- την εκπεμπόμενη ενέργεια,
- και το ύψος της φλόγας.

Η ανάπτυξη του μοντέλου στηρίζεται στη διαπίστωση ότι οι δασικές πυρκαγιές δεν αποτελούν ένα μεμονωμένο φυσικό φαινόμενο, αλλά το αποτέλεσμα ενός πολύπλοκου συνδυασμού κλιματικών, γεωμορφολογικών και ανθρωπογενών παραγόντων, οι οποίοι επηρεάζουν τη συχνότητα, την ένταση και την ταχύτητα εξάπλωσης των πυρκαγιών. Μέσα από τη συνεργασία των εταίρων του έργου, το RES2FIRE επιδιώκει να δημιουργήσει ένα ομογενοποιημένο πλαίσιο προσομοίωσης, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικά περιβάλλοντα της περιοχής ADRIION, από τα μεσογειακά παράκτια οικοσυστήματα έως τα πιο ηπειρωτικά δάση της Βαλκανικής ενδοχώρας. Το μοντέλο προσαρμόζεται (customized) ώστε να ανταποκρίνεται στα χαρακτηριστικά των περιοχών μελέτης και να είναι συμβατό με το εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων webGIS του έργου, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από φορείς τοπικής αυτοδιοίκησης, δασικές υπηρεσίες και κέντρα πολιτικής προστασίας ως ένα εργαλείο λήψης αποφάσεων (Decision Support Tool).

Το παραδοτέο, επομένως, συνιστά ένα σημαντικό βήμα προς την κατεύθυνση της επιστημονικά τεκμηριωμένης πρόληψης των δασικών πυρκαγιών. Μέσα από την προτυποποίηση των δεδομένων, την κοινή μεθοδολογική προσέγγιση και την εφαρμογή του μοντέλου σε επιλεγμένες πιλοτικές περιοχές, επιδιώκεται η δημιουργία ενός ενιαίου πλαισίου αξιολόγησης της συμπεριφοράς της φωτιάς, το οποίο θα μπορεί να προσαρμόζεται στις ιδιαιτερότητες κάθε περιοχής και να αξιοποιείται για την εκπαίδευση, τον σχεδιασμό και την πρόληψη.

Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται συνοπτικά η μεθοδολογία που ανέπτυξε η κοινοπραξία του RES2FIRE υπό τον συντονισμό του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, ενώ αναλυτικά παρουσιάζεται η ελληνική περιοχή μελέτης στην Ανατολική Αττική, ο Δήμος Μαραθώνα.

Για τις λοιπές περιοχές μελέτης που αναφέρονται κάτωθι, βλέπε το συνολικό παραδοτέο D2.1.1 του έργου: <https://res2fire.interreg-ipa-adrion.eu/library/>.

- 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. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στο πλαίσιο του παραδοτέου D2.1.1 βασίζεται στην προσαρμογή και εφαρμογή ενός **ανοικτού μοντέλου προσομοίωσης της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών** σε διαφορετικά οικολογικά και μορφολογικά περιβάλλοντα της περιοχής ADRIION. Το μοντέλο χρησιμοποιείται ως εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για την πρόληψη, τη διαχείριση και τον σχεδιασμό μέτρων πυροπροστασίας, παρέχοντας ποσοτικά αποτελέσματα που περιγράφουν τον τρόπο εξάπλωσης της φωτιάς υπό διαφορετικά σενάρια.

Η μεθοδολογική διαδικασία ξεκινά με τη συλλογή, ανάλυση και ενοποίηση γεωχωρικών δεδομένων από τις επτά πιλοτικές περιοχές του έργου (Ιταλία, Ελλάδα, Αλβανία, Σερβία, Βόρεια Μακεδονία, Σλοβενία και Βοσνία-Ερζεγοβίνη). Για κάθε περιοχή καθορίστηκε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα δασικού ή μικτού οικοσυστήματος που χαρακτηρίζεται από αυξημένη επικινδυνότητα πυρκαγιάς. Οι εταίροι του έργου συνέλεξαν δεδομένα σχετικά με τη χρήση γης, τη βλάστηση, την τοπογραφία, καθώς και μετεωρολογικά δεδομένα που επηρεάζουν την εξάπλωση της φωτιάς, όπως θερμοκρασία, υγρασία, διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου.

Για την εξασφάλιση συγκρισιμότητας μεταξύ των χωρών, εφαρμόστηκε διαδικασία ομογενοποίησης και τυποποίησης των εισροών (inputs) του μοντέλου, σύμφωνα με τα διεθνώς αναγνωρισμένα πρότυπα που χρησιμοποιούνται σε προγράμματα προσομοίωσης, όπως το BehavePlus και το FARSITE. Έτσι, κάθε περιοχή μοντελοποιήθηκε με βάση ένα κοινό σύνολο παραμέτρων που αντιπροσωπεύουν τους τοπικούς τύπους καυσίμου, την κλίση και τον προσανατολισμό του εδάφους, καθώς και τις επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες.

Η βασική αρχή που διέπει το μοντέλο είναι η εξίσωση του Rothermel (1972), η οποία περιγράφει τη σχέση μεταξύ του ρυθμού εξάπλωσης μιας φωτιάς και των φυσικών χαρακτηριστικών της βλάστησης και του εδάφους. Στο πλαίσιο του RES2FIRE, η εξίσωση αυτή προσαρμόστηκε στις ιδιαιτερότητες των μεσογειακών οικοσυστημάτων, όπου η παρουσία εύφλεκτης θαμνώδους βλάστησης και η μεγάλη εποχική ξηρασία αποτελούν κρίσιμους παράγοντες που ενισχύουν την ένταση και ταχύτητα των πυρκαγιών.

Αφού δημιουργήθηκαν τα χωρικά επίπεδα (layers) των δεδομένων, το μοντέλο χρησιμοποίησε αλγορίθμους διάδοσης φωτιάς για την προσομοίωση σεναρίων καύσης, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικούς τύπους διαχείρισης της βλάστησης. Για κάθε σενάριο, υπολογίστηκαν κρίσιμες μεταβλητές, όπως:

- ο ρυθμός εξάπλωσης της πυρκαγιάς (Rate of Spread),
- το ύψος και η ένταση της φλόγας,
- η εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας (Fireline Intensity),
- και η καμένη έκταση μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Η μεθοδολογία περιλάμβανε επίσης τη σύγκριση “προληπτικών” και “ανενεργών” σεναρίων. Στα πρώτα εξετάστηκε η εφαρμογή συγκεκριμένων σιλβικοτεχνικών παρεμβάσεων – όπως αραιώσεις, απομάκρυνση καύσιμης ύλης, ελεγχόμενη βόσκηση ή δημιουργία και συντήρηση αντιπυρικών λωρίδων» – και αξιολογήθηκε η αποτελεσματικότητά τους στην επιβράδυνση της φωτιάς. Στα δεύτερα, το μοντέλο προσομοίωσε τη φυσική εξέλιξη της πυρκαγιάς χωρίς καμία προληπτική διαχείριση, ώστε να γίνει συγκριτική αξιολόγηση των μέτρων.

Επιπλέον, για να καταστεί δυνατή η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων από τις τοπικές αρχές και τους υπεύθυνους διαχείρισης, το σύνολο της διαδικασίας εντάχθηκε στο ψηφιακό περιβάλλον του RES2FIRE WebGIS. Έτσι, κάθε πιλοτική περιοχή μπορεί να απεικονίζεται δυναμικά πάνω σε χαρτογραφικό υπόβαθρο, επιτρέποντας την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων (π.χ. κατεύθυνση φωτιάς, χρόνος εξάπλωσης, επικίνδυνες ζώνες), γεγονός που καθιστά το εργαλείο χρήσιμο τόσο για την πρόληψη όσο και για την εκπαίδευση και τον επιχειρησιακό σχεδιασμό.

Συνολικά, η μεθοδολογική προσέγγιση του RES2FIRE συνδυάζει επιστημονική ακρίβεια, διαλειτουργικότητα δεδομένων και πρακτική εφαρμοσιμότητα, ώστε να παρέχει ένα κοινό, τεκμηριωμένο και επαναχρησιμοποιήσιμο πλαίσιο για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών στην περιοχή της Αδριατικής και του Ιονίου.

3. Συνολική Εικόνα Αποτελεσμάτων

Η εφαρμογή του μοντέλου προσομοίωσης συμπεριφοράς πυρκαγιάς στις επτά πιλοτικές περιοχές του έργου RES2FIRE παρείχε μια ολοκληρωμένη εικόνα για το πώς διαφορετικοί περιβαλλοντικοί, μορφολογικοί και διαχειριστικοί παράγοντες επηρεάζουν τη δυναμική των δασικών πυρκαγιών στον χώρο της Αδριατικής και του Ιονίου. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι, παρά τις τοπικές διαφοροποιήσεις, υπάρχουν κοινές τάσεις που μπορούν να αξιοποιηθούν για την ανάπτυξη ενιαίων προτύπων πρόληψης και σχεδιασμού.

Κατ' αρχάς, η ανάλυση των προσομοιώσεων επιβεβαίωσε ότι οι παρεμβάσεις μείωσης της καύσιμης ύλης έχουν καθοριστικό ρόλο στη μείωση της έντασης και της ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Οι περιοχές όπου εφαρμόστηκαν μέτρα όπως αραιώσεις, καθαρισμοί υπορόφου ή δημιουργία ελεγχόμενων λωρίδων πυρασφάλειας παρουσίασαν σημαντικά μικρότερη ένταση φλόγας και χαμηλότερες θερμικές εκπομπές, με αποτέλεσμα να περιορίζεται δραστικά η πιθανότητα μετάδοσης της φωτιάς σε οικιστικές περιοχές ή σε ευαίσθητα οικοσυστήματα.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η διαπίστωση ότι τα μικτά δάση και οι ετερογενείς φυτοκοινωνίες, όπου συνυπάρχουν φυλλοβόλα και αειθαλή είδη, παρουσιάζουν αυξημένη ανθεκτικότητα στη φωτιά σε σχέση με τις μονοκαλλιέργειες ή τις καθαρά κωνοφόρες συστάδες. Οι περιοχές που κυριαρχούνται από *Pinus halepensis* ή άλλες πευκοειδείς φυτεύσεις χαρακτηρίζονται από υψηλή περιεκτικότητα σε ρητίνες και λεπτομερή υποόροφο, γεγονός που καθιστά τη φωτιά ταχύτατα ανεξέλεγκτη. Αντιθέτως, η παρουσία πλατύφυλλων ειδών, όπως η κουμαριά, ο σχίνος και η χαρουπιά, συντελεί στη μείωση της έντασης της πυρκαγιάς και στην καθυστέρηση της διάδοσής της.

Εξίσου σημαντικά είναι τα ευρήματα σχετικά με τον χρόνο και τη συχνότητα των παρεμβάσεων. Η προσομοίωση έδειξε ότι τα μέτρα πρόληψης, εάν δεν συντηρούνται περιοδικά, χάνουν σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητά τους. Οι λωρίδες πυρασφάλειας, για παράδειγμα, σε περιοχές με υψηλή αναγέννηση βλάστησης, απαιτούν συντήρηση κάθε δύο έως τρία έτη· διαφορετικά, η πυκνή νέα βλάστηση μπορεί να λειτουργήσει ως δίαυλος για τη διάδοση της φωτιάς. Συνεπώς, η μακροχρόνια βιωσιμότητα των μέτρων εξαρτάται όχι μόνο από τον αρχικό σχεδιασμό, αλλά και από την ύπαρξη συνεχούς προγράμματος συντήρησης και επαναξιολόγησης.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπογραμμίζουν επίσης τη σημασία των τοπογραφικών παραμέτρων. Οι πυρκαγιές σε περιοχές με μεγάλη κλίση ή έντονο ανάγλυφο εμφανίζουν σημαντικά υψηλότερη ταχύτητα εξάπλωσης, καθώς η φωτιά κινείται ανοδικά με τη βοήθεια της συναγωγής. Επιπλέον, ο προσανατολισμός των επικλινών εκτάσεων επηρεάζει τη θερμοκρασία και την ξηρότητα των καυσίμων, καθιστώντας τις νότιες και δυτικές εκθέσεις πιο ευάλωτες.

Από επιχειρησιακή σκοπιά, το μοντέλο απέδειξε τη χρησιμότητά του ως εργαλείο υποστήριξης λήψης αποφάσεων. Μέσω της οπτικοποίησης των σεναρίων σε ψηφιακό

περιβάλλον WebGIS, οι αρμόδιες αρχές μπορούν να εντοπίζουν περιοχές υψηλού κινδύνου, να υπολογίζουν την πιθανή κατεύθυνση και ταχύτητα εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς, και να σχεδιάζουν εγκαίρως μέτρα προστασίας ή εκκένωσης. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα πολύτιμη για τις ζώνες διεπαφής δάσους–οικισμού (WUI), όπου η έγκαιρη πρόβλεψη μπορεί να σώσει ανθρώπινες ζωές και περιουσίες.

Σε ευρύτερο επίπεδο, τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των πιλοτικών εφαρμογών υποδεικνύουν ότι η ενσωμάτωση οικολογικών και “κοντά στη φύση” δασοκομικών πρακτικών (close-to-nature silvicultural practices) αποτελεί μια ρεαλιστική και περιβαλλοντικά βιώσιμη στρατηγική για τη μείωση του κινδύνου πυρκαγιάς. Παράλληλα, η αξιοποίηση ψηφιακών εργαλείων, όπως το WebGIS του RES2FIRE, ενισχύει τη δυνατότητα συλλογικής λήψης αποφάσεων, προσφέροντας ένα ενιαίο, οπτικοποιημένο και επιστημονικά τεκμηριωμένο πλαίσιο δράσης.

Εν κατακλείδι, το παραδοτέο D2.1.1 καταδεικνύει πως η προληπτική διαχείριση της βλάστησης, όταν βασίζεται σε αξιόπιστα δεδομένα προσομοίωσης και συνδυάζεται με τεχνολογικά εργαλεία χαρτογράφησης, μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη δημιουργία ανθεκτικών τοπίων (fire-resilient landscapes) και να περιορίσει σημαντικά τις κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών στην περιοχή ADRION.

4. Περιοχή Μελέτης: Δήμος Μαραθώνα, Ελλάδα

4.1. Γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής

Ο Δήμος Μαραθώνα βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα της Περιφέρειας Αττικής, περίπου 40 χιλιόμετρα από το κέντρο της Αθήνας. Η περιοχή αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα ζώνης διεπαφής δάσους–οικισμού (Wildland-Urban Interface – WUI), όπου η φυσική βλάστηση συνυπάρχει άμεσα με κατοικημένες εκτάσεις, εξοχικές κατοικίες και τουριστικές υποδομές.

Η χωρική δομή της περιοχής συνδυάζει πεδινές εκτάσεις, κατά μήκος του Μαραθώνα και της Νέας Μάκρης, με ορεινά και ημιορεινά τμήματα που καλύπτονται από πλούσια μεσογειακή βλάστηση. Στην παράκτια ζώνη συναντώνται σημαντικοί οικιστικοί πυρήνες, ενώ οι λόφοι που περιβάλλουν την περιοχή φιλοξενούν εκτεταμένα πευκοδάση (*Pinus halepensis*), θάμνους και μακία βλάστηση, τα οποία αποτελούν ιδιαίτερα εύφλεκτο καύσιμο υπό συνθήκες ξηρασίας.

Ο Μαραθώνας αποτελεί επίσης ιστορική περιοχή, γνωστή τόσο για τη μάχη του 490 π.Χ. όσο και για τον ομώνυμο Μαραθώνιο Δρόμο, με αποτέλεσμα να συνδυάζει ισχυρή πολιτιστική ταυτότητα και έντονη οικιστική ανάπτυξη. Η συνεχής εξάπλωση του οικιστικού ιστού προς τις δασικές εκτάσεις τις τελευταίες δεκαετίες έχει αυξήσει σημαντικά την επικινδυνότητα, καθιστώντας την περιοχή μια από τις πλέον ευάλωτες στην Αττική σε ό,τι αφορά τις δασικές πυρκαγιές.

4.2. Ιστορικό και πρόσφατα συμβάντα πυρκαγιών

Η περιοχή του Μαραθώνα έχει επανειλημμένα πληγεί από καταστροφικές πυρκαγιές, με πιο γνωστή εκείνη του Ιουλίου 2018 στο Μάτι, η οποία προκάλεσε 113 ανθρώπινες απώλειες και αποτέλεσε τη φονικότερη πυρκαγιά στην ιστορία της σύγχρονης Ελλάδας. Το γεγονός αυτό ανέδειξε με δραματικό τρόπο τις αδυναμίες του συστήματος χωροταξικού σχεδιασμού, την ανεπαρκή συντήρηση των αντιπυρικών ζωνών και την ανάγκη ολοκληρωμένης προσέγγισης πρόληψης και ετοιμότητας.



Εικόνα 1 Δορυφορική εικόνα MODIS που απεικονίζει στήλες καπνού πάνω από την Ανατολική και τη Βόρεια Αττική κατά τη διάρκεια των πυρκαγιών του Αυγούστου 2024. Τα κόκκινα σημεία στην εικόνα υποδεικνύουν ενεργά μέτωπα πυρκαγιάς, ενώ πυκνός γκρίζος καπνός αναδύεται από τις εστίες και κατευθύνεται νοτιοανατολικά. https://modis.gsfc.nasa.gov/gallery/individual.php?db_date=2024-08-15

Μετά το 2018, ο Δήμος Μαραθώνα αποτέλεσε πιλοτική περιοχή για τον επανασχεδιασμό της αντιπυρικής στρατηγικής. Οι δράσεις εστίασαν τόσο στη δημιουργία νέων πυροπροστατευτικών έργων όσο και στην εκπαίδευση του πληθυσμού και την ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ των υπηρεσιών. Το γεγονός ότι ο δήμος περιλαμβάνει μεγάλο ποσοστό εκτάσεων ζώνης WUI, καθιστά την περιοχή εξαιρετικά αντιπροσωπευτική για την ανάπτυξη και δοκιμή μοντέλων προσομοίωσης, όπως αυτό του RES2FIRE.

4.3. Το πρόγραμμα “antiNERO” και η εφαρμογή του στον Μαραθώνα

Από το 2022, η Ελλάδα έχει θέσει σε εφαρμογή το εθνικό πρόγραμμα “antiNERO”, χρηματοδοτούμενο από το Ταμείο Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας (RRF), με στόχο την ενίσχυση της πρόληψης και ετοιμότητας απέναντι στις δασικές πυρκαγιές. Το πρόγραμμα προβλέπει στοχευμένες παρεμβάσεις σε δήμους υψηλής επικινδυνότητας, μεταξύ των οποίων και ο Μαραθώνας, με προτεραιότητα:

- την προληπτική απομάκρυνση καύσιμης ύλης από δασικές και περιαστικές περιοχές,

- τη δημιουργία και συντήρηση αντιπυρικών λωρίδων,
- τη βελτίωση πρόσβασης πυροσβεστικών οχημάτων,
- και την προστασία κρίσιμων υποδομών και μνημείων.

Το πρόγραμμα εφαρμόζεται σε στενή συνεργασία μεταξύ της Δασικής Υπηρεσίας, της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας και του Υπουργείου Κλιματικής Κρίσης και Πολιτικής Προστασίας, με συμμετοχή των δήμων, των περιφερειών και εθελοντικών ομάδων. Η φιλοσοφία του βασίζεται στην ολοκληρωμένη και πολυεπίπεδη διαχείριση της βλάστησης, δηλαδή στη συνδυασμένη δράση πρόληψης, αποκατάστασης και διαρκούς συντήρησης, ώστε να επιτευχθεί μείωση της ευφλεκτότητας του τοπίου.

4.3.1. Δομημένη Προσέγγιση Ζωνών Πυροπροστασίας σε Περιοχές Διεπαφής Δάσους–Οικισμού (WUI)

Σύμφωνα με τις οδηγίες της Ελληνικής Δασικής Υπηρεσίας (ΕΔΥ), το πρόγραμμα προωθεί τη συστηματική δημιουργία ζωνών πυροπροστασίας στις περιοχές διεπαφής δάσους–οικισμού (Wildland–Urban Interface – WUI). Οι ζώνες αυτές έχουν σχεδιαστεί ώστε να περιορίζουν τη συνέχεια της καύσιμης ύλης, να μειώνουν την ένταση της φωτιάς και να διευκολύνουν τις τακτικές επιχειρήσεις κατάσβεσης, διαχωρίζοντας τα δασικά τμήματα που γειτνιάζουν με οικιστικές περιοχές.

Η προσέγγιση βασίζεται στη δημιουργία τριών διαδοχικών και λειτουργικά διακριτών ζωνών:

1) Κεντρική Αντιπυρική Ζώνη

- **Πλάτος:** Κατά μέσο όρο 50 μέτρα, με δυνατότητα προσαρμογής ανάλογα με το ύψος της βλάστησης, την κλίση του εδάφους και τα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης.
- **Επεμβάσεις:** Πλήρης απομάκρυνση κάθε μορφής επιφανειακής βλάστησης, δημιουργώντας μία λωρίδα με εκτεθειμένο ανόργανο έδαφος. Η ζώνη αυτή λειτουργεί ως πρωτεύον φυσικό εμπόδιο που επιβραδύνει την εξάπλωση της φωτιάς.
- **Σκοπός:** Παρέχει ασφαλή χώρο για επιχειρήσεις αντιπύρωσης (back-burning) και χρησιμεύει ως γραμμή πρόσβασης για τα πυροσβεστικά μέσα και τις ομάδες επέμβασης.

2) Προστατευμένες Ζώνες με Πλατύφυλλα Δένδρα

- **Δομή:** Δύο λωρίδες πλάτους περίπου 50 μέτρων η καθεμία, εκατέρωθεν της κεντρικής αντιπυρικής ζώνης.
- **Μέτρα διαχείρισης:**
 - ο Πλήρης απομάκρυνση των θαμνωδών ειδών του υπορόφου.
 - ο Κλάδεμα κωνοφόρων και πλατύφυλλων δένδρων μέχρι ύψος 2,5 μέτρων από το έδαφος.

- ο Ενθάρρυνση ή αναφύτευση πλατύφυλλων ειδών (π.χ. *Quercus* spp.) σε συστάδες που κυριαρχούνται από κωνοφόρα, για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας στη φωτιά.
 - **Τεκμηρίωση:** Τα πλατύφυλλα δένδρα έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία και χαμηλότερη ευφλεκτότητα σε σχέση με τα κωνοφόρα, δημιουργώντας έτσι μικροκλίμα που μειώνει την ένταση της φωτιάς και αποτρέπει την έναρξη πυρκαγιών κόμης.
- 3) Εκτεταμένες Προστατευμένες Ζώνες**
- **Πλάτος:** Έως και 100 μέτρα εκατέρωθεν των προστατευμένων ζωνών.
 - **Επεμβάσεις:** Επιλεκτική αραίωση, απομάκρυνση των «καυσίμων κλίμακας» (ladder fuels) και κλάδεμα των χαμηλών κλαδιών ώστε να περιοριστεί η κατακόρυφη διάδοση της φωτιάς.
 - **Αποτελεσματικότητα:** Η ζώνη αυτή λειτουργεί ως μεταβατική περιοχή ασφαλείας, μειώνοντας τη μεταφορά καύτρου (ember spotting) και προσφέροντας περισσότερο χρόνο αντίδρασης στις ομάδες πυρόσβεσης.

Συνολικά, οι τρεις ζώνες μπορούν να φτάσουν **συνολικό πλάτος έως και 350 μέτρα**, προσφέροντας ένα πολυεπίπεδο σύστημα άμυνας έναντι της διεξόδου δασικών πυρκαγιών σε αστικές περιοχές. Η δομή των ζωνών αυτών ευθυγραμμίζεται με τις διεθνείς βέλτιστες πρακτικές σχεδιασμού ζωνών πυροπροστασίας και με στρατηγικές μείωσης του κινδύνου πυρκαγιάς (Agee & Skinner, 2005).

4.3.2. Τεχνικές Προδιαγραφές και Θεσμικό Πλαίσιο

Η μεθοδολογία των ζωνών πυροπροστασίας του προγράμματος antiNERO βασίζεται στις Τεχνικές Οδηγίες της Ελληνικής Δασικής Υπηρεσίας (2020) με τίτλο: «Επικαιροποίηση Τεχνικών Προδιαγραφών για την εκπόνηση Σχεδίων Πυροπροστασίας και καθορισμός μεθόδου εκτίμησης κόστους» (Υπουργική Απόφαση ΥΠΕΝ/ΔΠΔ/61247/2789).

Οι οδηγίες αυτές προβλέπουν, μεταξύ άλλων:

- Το πλάτος της αντιπυρικής λωρίδας πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσιο από το ύψος της κυρίαρχης βλάστησης, ώστε να είναι αποτελεσματικό σε συνθήκες υψηλού κινδύνου και να επιτρέπει την ασφαλή διεξαγωγή επιχειρήσεων αντιτύρωσης.
- Οι ελάχιστες προτεινόμενες διαστάσεις αντιπυρικών λωρίδων υπό ακραίες συνθήκες πυρκαγιάς, ανάλογα με τον τύπο βλάστησης και την κλίση του εδάφους, παρουσιάζονται ως εξής:

Τύπος βλάστησης	Επίπεδο έδαφος	Κλίση 70%
Δάσος κωνοφόρων με υπόροφο	45 μ.	60 μ.
Πυκνή υψηλή θαμνώδης βλάστηση (ύψος 1,5–2 μ.)	20 μ.	25 μ.
Μεσαίου ύψους θαμνώδης βλάστηση (ύψος 1–1,5 μ.)	12 μ.	15 μ.

Αρχές σχεδιασμού αντιπυρικών λωρίδων:

- Θα πρέπει να έχουν ελαφρώς κυματοειδή (μη γραμμική) χάραξη, ώστε να αποτρέπεται το φαινόμενο διοχέτευσης του ανέμου και να εναρμονίζονται οπτικά με το φυσικό τοπίο.
- Πρέπει να διατηρούνται απαλλαγμένες από βλάστηση μέσω μηχανικών μέσων (κοπή, θρυμματισμός, απομάκρυνση υπολείμματος).
- Σε περιοχές με υψηλό κίνδυνο διάβρωσης, οι αντιπυρικές λωρίδες συνιστάται να διαμορφώνονται κατά μήκος των κορυφογραμμών, ώστε να αποτρέπεται η διάβρωση του εδάφους και η μεταφορά ιζημάτων.

Οι αρχές αυτές εντάσσονται στη λογική της διαχείρισης πυρκαγιών με βάση το οικοσύστημα, η οποία στοχεύει στη μείωση του κινδύνου πυρκαγιάς χωρίς να θίγει τη σταθερότητα και την οικολογική ακεραιότητα του τοπίου (Xanthopoulos et al., 2023).

4.3.3. Επιχειρησιακές Παράμετροι

Η αναγέννηση της βλάστησης στα μεσογειακά οικοσυστήματα είναι εξαιρετικά ταχεία, ιδίως στις περιοχές που κυριαρχούνται από πευκοδάση ή μακία βλάστηση. Εμπειρικές παρατηρήσεις και τα εθνικά προγράμματα συντήρησης υποδεικνύουν ότι οι ζώνες πυροπροστασίας πρέπει να επανακαθαρίζονται ή να επανεπεξεργάζονται κάθε 2–3 χρόνια, ανάλογα με τον ρυθμό αναγέννησης της βιομάζας, τη συσσώρευση καύσιμου υλικού και τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες.

Η παρακολούθηση μετά την παρέμβαση, σε συνδυασμό με τεχνολογίες τηλεπισκόπησης και επιτόπιους ελέγχους, αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία για την επαλήθευση της αποτελεσματικότητας των μέτρων και τον καθορισμό προτεραιοτήτων συντήρησης. Δείκτες υγρασίας καύσιμης ύλης και εποχικοί δείκτες επικινδυνότητας πυρκαγιάς (Giannaros et al., 2024) χρησιμοποιούνται πλέον για να καθοδηγούν αυτές τις επιχειρησιακές αποφάσεις, διασφαλίζοντας ότι οι παρεμβάσεις πραγματοποιούνται στον κατάλληλο χρόνο και με τον βέλτιστο τρόπο.

4.4. Ζωνική προσέγγιση πυροπροστασίας

Η Δασική Υπηρεσία έχει αναπτύξει, στο πλαίσιο του προγράμματος “antiNERO”, ένα πρότυπο σύστημα ζωνικής προσέγγισης για τη διαχείριση της καύσιμης ύλης, το οποίο εφαρμόζεται πιλοτικά και στον Μαραθώνα.

Αυτές οι ζώνες λειτουργούν ως προληπτικά μέτρα για την παρεμπόδιση της εξάπλωσης των δασικών πυρκαγιών και για την προστασία της ανθρώπινης ζωής, των περιουσιών και των κρίσιμων υποδομών. Ειδικότερα, το σύστημα ζωνών πυροπροστασίας που εφαρμόζεται στον Μαραθώνα ακολουθεί μια πολυζωνική δομή, η οποία έχει σχεδιαστεί ώστε να επιτυγχάνει σταδιακή μείωση του φορτίου καύσιμης ύλης και της έντασης της φωτιάς όσο αυξάνεται η απόσταση από το όριο του αστικού ιστού. Η προσέγγιση αυτή εναρμονίζεται με τις διεθνώς αναγνωρισμένες αρχές της οικολογίας της φωτιάς και του σχεδιασμού περιοχών διεπαφής δάσους–οικισμού (WUI), όπως αυτές έχουν διατυπωθεί από τους Agee & Skinner (2005).

Η περιοχή γύρω από τις κατοικημένες ζώνες χωρίζεται σε τρεις κύριες ζώνες παρέμβασης, κάθε μία με διαφορετικό βάθος και είδος μέτρων:

- **Ζώνη 1 (πλάτος 2–20 μέτρα):** Πρόκειται για τη ζώνη άμεσης προστασίας, η οποία βρίσκεται σε άμεση γειτνίαση με τα κτίρια και τις κρίσιμες υποδομές. Περιλαμβάνει πλήρη απομάκρυνση κάθε εύφλεκτης επιφανειακής βλάστησης, όπως χόρτα, θάμνους και συσσωρευμένα οργανικά υπολείμματα (φύλλα, κλαδιά, απορρίμματα καύσιμης ύλης). Στόχος είναι η εξάλειψη κάθε πιθανού καυσίμου που θα μπορούσε να επιτρέψει στη φωτιά να προσεγγίσει τις κατασκευές.
- **Ζώνη 2 (πλάτος 20–40 μέτρα):** Αποτελεί τη μεταβατική ζώνη μεταξύ της κατοικημένης περιοχής και της φυσικής βλάστησης. Οι εργασίες εστιάζουν στην επιλεκτική αραίωση των δέντρων της ανώτερης βλάστησης, στην απομάκρυνση των «καυσίμων κλίμακας» (όπως μικρά δενδρύλλια ή θαμνώδης υπόροφος) και στο έντονο κλάδεμα της εναπομείνουσας βλάστησης, ώστε η βάση της κόμης των δέντρων να βρίσκεται τουλάχιστον 2,5 μέτρα πάνω από το έδαφος. Όπου είναι εφικτό, προτείνεται αναφύτευση πλατύφυλλων ειδών, ιδίως σε περιοχές με πυκνές συστάδες κωνοφόρων, προκειμένου να αυξηθεί η ανθεκτικότητα του τοπίου στη φωτιά.
- **Ζώνη 3 (πλάτος έως 100 μέτρα):** Πρόκειται για την εκτεταμένη ζώνη διαχείρισης, η οποία περιλαμβάνει περαιτέρω αραίωση και καθαρισμό του υπορόφου, καθώς και διατήρηση της ασυνέχειας της καύσιμης ύλης. Παράλληλα, λειτουργεί ως επιχειρησιακή ζώνη υποστήριξης για τις δυνάμεις κατάσβεσης, προσφέροντας ασφαλή πρόσβαση και χώρο ελιγμών για τον έλεγχο των μετώπων της φωτιάς.

Η ζωνική αυτή προσέγγιση αποσκοπεί όχι στη δημιουργία απόλυτων “φραγμάτων φωτιάς”, αλλά στη μείωση της έντασης και της ταχύτητας διάδοσης, ώστε να δίνεται επαρκής χρόνος για επέμβαση.

Η συνολική ζώνη διαχείρισης μπορεί να φθάνει έως και τα 160 μέτρα πλάτος, ανάλογα με τη μορφολογία, τον τύπο βλάστησης και την εγγύτητα σε κρίσιμες υποδομές ή κατοικίες.

4.5. Παραδείγματα εφαρμογής και παρατηρήσεις

Η εμπειρία των τελευταίων ετών έχει δείξει ότι οι παραδοσιακές ευρείες αντιπυρικές λωρίδες, εάν δεν συντηρούνται συστηματικά, τείνουν να χάνουν την αποτελεσματικότητά τους, καθώς η βλάστηση επανεμφανίζεται γρήγορα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μάλιστα, η νέα αναγέννηση βλάστησης μπορεί να μετατρέψει τις λωρίδες αυτές σε διαύλους διάδοσης της φωτιάς.

Αντίθετα, η νέα φιλοσοφία του προγράμματος “antiNERO” προωθεί τη δημιουργία “sheltered fuel breaks”, δηλαδή ζωνών με επιλεγμένη, ελεγχόμενη βλάστηση, που λειτουργούν ως ρυθμιστές έντασης αντί για πλήρη αποψίλωση. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει καλύτερη οικολογική ισορροπία, μειώνει τη διάβρωση του εδάφους και επιτρέπει την ταχύτερη αναγέννηση του τοπίου μετά την πυρκαγιά.

Επιπλέον, η βιομάζα που προκύπτει από τις εργασίες καθαρισμού αξιοποιείται για παραγωγή ενέργειας ή λιπασμάτων, προσδίδοντας οικονομικό όφελος και ενισχύοντας τη βιωσιμότητα του συστήματος.

4.6. Οικονομικά δεδομένα και τοπικές δράσεις

Σύμφωνα με τα στοιχεία του Δήμου Μαραθώνα όπως εξήχθησαν από την πλατφόρμα ΔΙΑΥΓΕΙΑ, οι συνολικές δαπάνες για έργα πρόληψης και καθαρισμού κατά το έτος 2024 ανήλθαν σε 350.765 ευρώ.

Η κατανομή των κονδυλίων έχει ως εξής:

Είδος παρέμβασης	Κόστος (€)
Απομάκρυνση κλαδιών και ογκωδών αντικειμένων	15.000
Καθαρισμός υπορόφου (μηχανικός/χειρονακτικός)	47.625
Κατασκευή λωρίδων πυρασφάλειας	260.000
Καθαρισμός δρόμων και κοινόχρηστων χώρων	20.000
Καθαρισμός ρεμάτων και παρακείμενων εκτάσεων	8.140
Σύνολο	350.765 €

Οι δράσεις αυτές εντάσσονται σε ετήσιο σχέδιο πυροπροστασίας, το οποίο αναθεωρείται με βάση τα δεδομένα επικινδυνότητας και τα αποτελέσματα των ελέγχων πεδίου. Ο

συνδυασμός του προγράμματος “antiNERO” με την προσομοίωση του RES2FIRE επιτρέπει πλέον στον Δήμο να χαρτογραφεί προτεραιότητες παρέμβασης και να τεκμηριώνει επιστημονικά τη διαχείριση των πόρων του.

4.7. Συμπεράσματα για την περιοχή του Μαραθώνα

Η εφαρμογή του μοντέλου προσομοίωσης και των μέτρων διαχείρισης στην περιοχή του Μαραθώνα αποδεικνύει ότι η πολυζωνική, προληπτική και προσαρμοστική προσέγγιση αποτελεί τη βέλτιστη στρατηγική για περιοχές διεπαφής δάσους–οικισμού.

Η περιοχή λειτουργεί πλέον ως παράδειγμα καλής πρακτικής (best practice), καθώς συνδυάζει την τεχνολογική καινοτομία των εργαλείων προσομοίωσης με την πρακτική εμπειρία των τοπικών υπηρεσιών και εθελοντών. Η συνέχιση των επενδύσεων στη συντήρηση, την εκπαίδευση και την ενημέρωση των πολιτών θεωρείται απαραίτητη για τη διατήρηση της ανθεκτικότητας του τοπίου και τη μείωση του κινδύνου μελλοντικών καταστροφών.

Η ελληνική πιλοτική εφαρμογή στο RES2FIRE προσφέρει, επομένως, πολύτιμα δεδομένα και διδάγματα που μπορούν να αξιοποιηθούν από άλλες περιοχές της Μεσογείου, όπου η πίεση των πυρκαγιών συνδέεται άμεσα με την κλιματική κρίση, την αστικοποίηση και την έλλειψη μακροχρόνιας διαχείρισης των φυσικών οικοσυστημάτων.

4.8. Συμπεράσματα για το Μοντέλο Προσομοίωσης

Τα μοντέλα προσομοίωσης της συμπεριφοράς των πυρκαγιών αποτελούν απαραίτητα εργαλεία για την κατανόηση, την πρόβλεψη και τη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών. Η ταξινόμησή τους σε εμπειρικά, ημι-εμπειρικά και φυσικομαθηματικά (physics-based) μοντέλα αντανακλά διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας και διαφορετικό βαθμό εξάρτησης από παρατηρησιακά δεδομένα έναντι θεμελιωδών φυσικών αρχών. Η εμβέλεια αυτών των μοντέλων καλύπτει ποικίλες χωρικές και χρονικές κλίμακες, επιτρέποντας την πρόβλεψη ενός μεγάλου εύρους κρίσιμων χαρακτηριστικών της πυρκαγιάς, όπως ο ρυθμός εξάπλωσης, το ύψος της φλόγας, η ένταση καύσης, η θερμική ενέργεια και η κατεύθυνση διάδοσης.

Τα κύρια δεδομένα εισόδου περιλαμβάνουν αναλυτικές πληροφορίες για την τοπογραφία, τα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης και τις καιρικές συνθήκες. Μεταξύ των υπαρχόντων προσεγγίσεων, το Μοντέλο Εξάπλωσης Πυρκαγιάς του Rothermel (Rothermel Fire Spread Model) έχει καθιερωθεί ως το πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο παγκοσμίως για τον σχεδιασμό και τη διαχείριση πυρκαγιών, παρέχοντας ένα ισχυρό και ευέλικτο θεωρητικό πλαίσιο για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς επιφανειακών πυρκαγιών (surface fires).

Εφαρμογές μοντέλων συμπεριφοράς πυρκαγιάς, όπως το FlamMap, χρησιμοποιούνται εκτεταμένα για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας σιλβικοτεχνικών παρεμβάσεων και πρακτικών διαχείρισης της καύσιμης ύλης. Μέσω της προσομοίωσης διαφορετικών σεναρίων διαχείρισης, τα μοντέλα αυτά παρέχουν τη δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων μεταξύ εναλλακτικών πρακτικών, εκτίμησης των αλλαγών στους δείκτες επικινδυνότητας πυρκαγιάς, διεξαγωγής αναλύσεων ευαισθησίας και επαλήθευσης των προβλέψεων σε σχέση με πραγματικά καταγεγραμμένη συμπεριφορά πυρκαγιών στο πεδίο.

Η αξία των μοντέλων αυτών έγκειται όχι μόνο στην ικανότητά τους να προβλέπουν την εξάπλωση μιας πυρκαγιάς, αλλά και στην υποστήριξη στρατηγικών αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση των μέτρων πρόληψης και διαχείρισης. Μέσα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, οι φορείς διαχείρισης γης και οι υπηρεσίες πολιτικής προστασίας αποκτούν τη δυνατότητα να κατανοούν βαθύτερα τα οφέλη, τους περιορισμούς και τις πιθανές επιπτώσεις των διαφορετικών παρεμβάσεων διαχείρισης καύσιμης ύλης.

Συνολικά, τα μοντέλα προσομοίωσης της συμπεριφοράς πυρκαγιάς αποτελούν θεμελιώδες εργαλείο της σύγχρονης δασικής διαχείρισης. Η αξιοποίησή τους στο πλαίσιο του έργου RES2FIRE ανέδειξε τον ρόλο τους ως γέφυρα μεταξύ της επιστήμης και της εφαρμοσμένης πολιτικής προστασίας, παρέχοντας ένα τεκμηριωμένο υπόβαθρο για την ανάπτυξη ανθεκτικών, ασφαλών και οικολογικά ισορροπημένων τοπίων.

5. Συνολική Αξιολόγηση και Συστάσεις Πολιτικής

Η εμπειρία από την ανάπτυξη και εφαρμογή του μοντέλου προσομοίωσης της συμπεριφοράς πυρκαγιάς (Fire Behavior Simulation Model) στο πλαίσιο του έργου RES2FIRE ανέδειξε με σαφήνεια την ανάγκη για ολοκληρωμένη, τεκμηριωμένη και διατομεακή προσέγγιση στη διαχείριση του κινδύνου δασικών πυρκαγιών. Οι πιλοτικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης εκείνης του Δήμου Μαραθώνα, επιβεβαίωσαν ότι η αποτελεσματική πρόληψη δεν μπορεί να βασίζεται σε μεμονωμένες παρεμβάσεις, αλλά απαιτεί συστηματική συνδυαστική δράση που περιλαμβάνει επιστημονική ανάλυση, προληπτική διαχείριση βλάστησης, χωρικό σχεδιασμό, συμμετοχή πολιτών και διαρκή παρακολούθηση.

Η πολυκριτηριακή προσέγγιση του RES2FIRE επέτρεψε να ενσωματωθούν στοιχεία όπως η τοπογραφία, η κάλυψη γης, οι κλιματικές συνθήκες, η χωρική διάρθρωση των οικισμών και η παρουσία κρίσιμων υποδομών, οδηγώντας σε δυναμικές χαρτογραφήσεις επικινδυνότητας που αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές συνθήκες κάθε περιοχής. Μέσω του μοντέλου, καθίσταται πλέον εφικτή η εκτίμηση της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς πριν αυτή εκδηλωθεί, προσφέροντας πολύτιμο εργαλείο στους φορείς πολιτικής προστασίας για τη στοχευμένη πρόληψη και την έγκαιρη αντίδραση.

Η μελέτη των αποτελεσμάτων αποκάλυψε επίσης ότι η συντήρηση των προληπτικών μέτρων είναι εξίσου σημαντική με την αρχική τους εγκατάσταση. Οι αντιπυρικές λωρίδες, οι καθαρισμοί υπορόφου και οι φυτοτεχνικές επεμβάσεις πρέπει να αποτελούν επαναλαμβανόμενες πρακτικές, ενταγμένες σε ένα ετήσιο ή διετές πρόγραμμα δράσης. Χωρίς συστηματική συντήρηση, οι ίδιες παρεμβάσεις μπορεί να χάσουν την αποτελεσματικότητά τους μέσα σε δύο ή τρία χρόνια, καθώς η βλάστηση αναγεννάται γρήγορα, ιδιαίτερα σε μεσογειακά οικοσυστήματα.

Από τη σκοπιά των πολιτικών πρόληψης και σχεδιασμού, το έργο αναδεικνύει πέντε βασικές συστάσεις:

1. Ενοποίηση των δεδομένων και των μοντέλων σε μια κοινή πλατφόρμα, προκειμένου τα συστήματα προσομοίωσης να είναι διαλειτουργικά και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε τοπικό όσο και σε περιφερειακό επίπεδο. Το WebGIS εργαλείο του RES2FIRE αποτελεί πρότυπο αυτής της λογικής, επιτρέποντας την οπτικοποίηση, τον υπολογισμό και τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.
2. Θεσμοθέτηση της “πολυζωνικής διαχείρισης” ως επίσημου μοντέλου πρόληψης στις ζώνες διεπαφής δάσους–οικισμού. Οι τρεις ζώνες καύσιμης ύλης που εφαρμόζονται στον Μαραθώνα μπορούν να αποτελέσουν βάση για εθνικό πρότυπο σχεδιασμού, προσαρμοσμένο σε διαφορετικούς τύπους τοπίου και βλάστησης.
3. Ενίσχυση της διασύνδεσης μεταξύ δασικής διαχείρισης και πολιτικής προστασίας. Η συνεργασία δασικών υπηρεσιών, πυροσβεστικών σωμάτων, τοπικών αρχών και

ερευνητικών φορέων πρέπει να θεσμοθετηθεί ως μόνιμη διαδικασία ανταλλαγής δεδομένων και συντονισμού δράσεων.

4. Εκπαίδευση και συμμετοχή των πολιτών. Η ενημέρωση των κατοίκων στις περιοχές WUI για την ευφλεκτότητα της βλάστησης, τη σωστή διαχείριση των οικοπέδων και τις διαδικασίες εκκένωσης αποτελεί θεμελιώδη συνιστώσα της ανθεκτικότητας. Η συμμετοχή τους σε εθελοντικά δίκτυα πρόληψης και παρακολούθησης ενισχύει τη συλλογική ετοιμότητα.
5. Αξιοποίηση των δεδομένων προσομοίωσης για τον χωροταξικό και περιβαλλοντικό σχεδιασμό. Τα αποτελέσματα του μοντέλου μπορούν να ενσωματωθούν σε τοπικά και περιφερειακά σχέδια χρήσεων γης, καθορίζοντας ζώνες υψηλού κινδύνου, προτεραιότητες καθαρισμού, αλλά και περιοχές όπου η ανάπτυξη θα πρέπει να είναι περιορισμένη ή υπό αυστηρούς όρους.

Η πιλοτική εφαρμογή του μοντέλου στον Δήμο Μαραθώνα απέδειξε την αξία των τεκμηριωμένων παρεμβάσεων σε πραγματικές συνθήκες. Τα ευρήματα ενισχύουν τη θέση ότι η επιστήμη και η τεχνολογία μπορούν να προσφέρουν λύσεις προσαρμοσμένες στο τοπικό επίπεδο, εφόσον συνδυάζονται με θεσμική βούληση, σταθερή χρηματοδότηση και ενεργό συμμετοχή της κοινωνίας. Η δημιουργία “έξυπνων”, διαδραστικών χαρτών επικινδυνότητας, βασισμένων σε πραγματικά δεδομένα, μπορεί να μετατρέψει τον σχεδιασμό πρόληψης από μια γραφειοκρατική διαδικασία σε μια δυναμική, διαφανή και συμμετοχική πολιτική πρακτική.

Τέλος, το RES2FIRE καταδεικνύει ότι η προληπτική προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή δεν είναι μόνο τεχνικό ζήτημα, αλλά και πολιτική επιλογή. Οι μεσογειακές χώρες, που βρίσκονται στην πρώτη γραμμή των δασικών πυρκαγιών, χρειάζονται στρατηγικές που θα συνδυάζουν τη γνώση, τη διαχείριση των φυσικών πόρων και την κοινωνική ευαισθητοποίηση. Η εμπειρία του έργου και ειδικότερα η ελληνική πιλοτική περίπτωση μπορούν να αποτελέσουν παράδειγμα προς υιοθέτηση σε εθνικό και διακρατικό επίπεδο, συμβάλλοντας στη δημιουργία ενός ενιαίου ευρωπαϊκού πλαισίου για την πρόληψη και ανθεκτικότητα απέναντι στις πυρκαγιές.

6. Βιβλιογραφία

Agee, J. K., & Skinner, C. N. (2005). *Basic principles of forest fuel reduction treatments*. *Forest Ecology and Management*, 211(1), 83–96.

Giannaros, T. M., Papavasileiou, G., Lagouvardos, K., Georgiadis, N., Athanasakis, G., & Tziritis, I. (2024). *2024 Fire Season Annual Review*. National Observatory of Athens / METEO & WWF Greece.

Gkountoufas, E., & Kollarou, S. (2024). *Forest Protection Program antiNERO*. General Directorate of Forests and Forest Environment, Hellenic Ministry of Environment and Energy.

Gkountoufas, E., Tsilikounas, S., & Anagnostopoulou, A. (2024). *Assessment and planning for the restoration of the forest environment – NE Attica wildfire 2024*. General Directorate of Forests and Forest Environment, Ministry of Environment and Energy (Greece).

Hellenic Ministry of Environment and Energy. (2020). *Technical specifications for the preparation of wildfire protection plans and determination of cost estimation method* (Ministerial Decision ΥΠΕΝ/ΔΠΔ/61247/2789). General Secretariat for Natural Environment and Water, Directorate of Forest Protection.

Minutes of the regular meeting no. 29/30-12-2024 of the Municipal Council of Marathon, regarding the decision to approve the Municipality's Budget for the financial year 2025 – Decision code 6ΣΗΥΩΛΜ-Π9Σ. <https://diavgeia.gov.gr/doc/6ΣΗΥΩΛΜ-Π9Σ?inline=true>

Reinhardt, E. D., Keane, R. E., Calkin, D. E., & Cohen, J. D. (2008). *Objectives and considerations for wildland fuel treatment in forested ecosystems of the interior western United States*. *Forest Ecology and Management*, 256(12), 1997–2006. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.016>

Rothermel, R. C. (1972). *A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels*. Research Paper INT-115. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

Rothermel, R. C. (1991). *Predicting Behavior and Size of Crown Fires in the Northern Rocky Mountains*. Research Paper INT-438. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. <https://doi.org/10.2737/INT-RP-438>

Salis, M., Arca, B., Alcasena, F., Arianoutsou, M., Bacciu, V., Duce, P., Duguay, B. et al. (2016). *Predicting Wildfire Spread and Behaviour in Mediterranean Landscapes*. *International Journal of Wildland Fire*, 25(10), 1015. <https://doi.org/10.1071/WF15081>

- Scott, J. H., & Burgan, R. E. (2005). *Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model*. RMRS-GTR-153. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-153>
- Scott, J. H., & Reinhardt, E. D. (2001). *Assessing Crown Fire Potential by Linking Models of Surface and Crown Fire Behavior*. RMRS-RP-29. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. <https://doi.org/10.2737/RMRS-RP-29>
- Shah, M. P., & Kaur, P. (2024). *Biomass Energy for Sustainable Development*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9781003406501>
- Sismanis, M., Stefanidou, A., Stavrakoudis, D., & Gitas, I. Z. (2023). *Wildland Fuel Type Mapping in Attica Using Sentinel-2 Time-Series*. 8th International Conference on Smart and Sustainable Technologies – SpliTech 2023. <https://doi.org/10.23919/SPLITECH58164.2023.10193645>
- Stratton, R. D. (2006). *Guidance on Spatial Wildland Fire Analysis: Models, Tools, and Techniques*. U.S. Forest Service. <http://www.fs.fed.us/rm>
- Sullivan, A. L. (2010). *Chapter 5 - Grassland Fire Management in Future Climate*. In *Advances in Agronomy* (Vol. 106, pp. 173–208). Academic Press.
- Tolan, J., Yang, H.-I., Nosarzewski, B., Couairon, G., Vo, H. V., Brandt, J., Spore, J. et al. (2024). *Very High Resolution Canopy Height Maps from RGB Imagery Using Self-Supervised Vision Transformer and Convolutional Decoder Trained on Aerial Lidar*. *Remote Sensing of Environment*, 300, 113888. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113888>
- Trucchia, A., D'Andrea, M., Baghino, F., Fiorucci, P., Ferraris, L., Negro, D., Gollini, A., & Severino, M. (2020). *PROPAGATOR: An Operational Cellular-Automata Based Wildfire Simulator*. *Fire*, 3(3), 26. <https://doi.org/10.3390/fire3030026>
- Uradni list RS. (2014). *Regulation on Fire Protection in the Natural Environment*. Republic of Slovenia.
- URSZR. (2024). *National Protection and Rescue Plan for Forest Fires*. Republic of Slovenia.
- U.S. Department of Agriculture, Forest Service. (n.d.). *FARSITE HelpDesk*.
- Van Wagner, C. E. (1977). *Conditions for the Start and Spread of Crown Fire*. *Canadian Journal of Forest Research*, 7(1), 23–34. <https://doi.org/10.1139/x77-004>

- Voltolina, D., Cappellini, G., Apuani, T., & Sterlacchini, S. (2024). *Pyros: A Raster–Vector Spatial Simulation Model for Predicting Wildland Surface Fire Spread and Growth*. *International Journal of Wildland Fire*, 33(3). <https://doi.org/10.1071/WF22142>
- Xanthopoulos, G., Zevgoli, E., Kaoukis, K., & Athanasiou, M. (2023). *Lessons Not Learned*. *Wildfire Magazine*, Quarter 4, 36–40. <https://www.researchgate.net/publication/378230818>
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). *Characteristics of Hemicellulose, Cellulose and Lignin Pyrolysis*. *Fuel*, 86(12–13), 1781–1788.
- ZGS. (2025). *Slovenian Forest Service – Forest Management, Fire Risk Maps and Public Data Viewer*. Retrieved from <https://prostor.zgs.gov.si/pregledovalnik>