

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΙΧΘΥΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΝΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΓΩΓΗΣ



ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΕΙΦΟΡΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Εκτίμηση επικινδυνότητας δασικών πυρκαγιών με χρήση Γεωγραφικών
Συστημάτων Πληροφοριών. Η περίπτωση του νομού Χαλκιδικής»

Αθανάσιος Τσιώρας

ΛΑΡΙΣΑ, 2025

UNIVERSITY OF THESSALY

DEPARTMENT OF ICHTHYOLOGY AND AQUATIC
ENVIRONMENT AND DEPARTMENT OF SPECIAL EDUCATION



JOINT POSTGRADUATE PROGRAMME

**«EDUCATION FOR SUSTAINABILITY
AND THE ENVIRONMENT»**

JOINT POSTGRADUATE MASTER'S THESIS

«Forest fire hazard assessment using
Geographic Information Systems. The
case of the Chalkidiki prefecture»

Athanasios Tsioras

Larissa, 2025

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	7
3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	11
3.1. Περιοχή μελέτης	11
3.2 Δεδομένα και μεθοδολογία.....	12
3.2.1. Περιβαλλοντικοί παράγοντες.....	13
3.2.2. Ανθρωπογενείς παράγοντες	14
3.2.3. Μεθοδολογία	15
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	19
4.1. Φυσικοί παράγοντες επιρροής και διάδοσης πυρκαγιών και εκτίμηση της επικινδυνότητας.....	19
4.2. Ανθρωπογενείς παράγοντες επιρροής και διάδοσης πυρκαγιών και εκτίμηση της επικινδυνότητας.....	27
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	37
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	39

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η κλιματική αλλαγή συμβάλλει καθοριστικά στην αύξηση της συχνότητας, της έντασης και της χωρικής εξάπλωσης των δασικών πυρκαγιών, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη για συστηματική πρόληψη, προσαρμογή και χωρικό σχεδιασμό. Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στη χαρτογραφική αποτύπωση και ανάλυση της επικινδυνότητας εκδήλωσης δασικών πυρκαγιών στον νομό Χαλκιδικής, αξιοποιώντας τη μεθοδολογία της πολυκριτηριακής ανάλυσης (MCDA) σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS). Η προσέγγιση βασίστηκε στη συνεκτίμηση πέντε κρίσιμων παραμέτρων επιφανείας: της καύσιμης ύλης (μέσω των καλύψεων γης), της κλίσης και του προσανατολισμού του εδάφους, καθώς και της εγγύτητας τόσο στο οδικό δίκτυο όσο και σε ανθρωπογενείς οικισμούς. Για κάθε παράγοντα δημιουργήθηκαν θεματικοί χάρτες, στους οποίους αποδόθηκαν ειδικά βάρη βάσει βιβλιογραφικών πηγών και ιδιαιτεροτήτων της περιοχής μελέτης. Η τελική σύνθεση των παραμέτρων πραγματοποιήθηκε με άλγεβρα χαρτών, οδηγώντας στη δημιουργία ενός ενιαίου χάρτη επικινδυνότητας, με τιμές που κυμαίνονται από 0 έως 100. Η χωρική ανάλυση ανέδειξε περιοχές αυξημένης επικινδυνότητας κυρίως στα ορεινά και ημιορεινά τμήματα του νομού, καθώς και στις ζώνες διεπαφής δάσους – οικισμού. Αντίθετα, χαμηλότερη επικινδυνότητα καταγράφεται σε περιοχές αγροτικής χρήσης, επίπεδου αναγλύφου και βόρειου προσανατολισμού. Τα αποτελέσματα της έρευνας μπορούν να αξιοποιηθούν ως εργαλείο πρόληψης και διαχείρισης κινδύνου από αρμόδιους φορείς Πολιτικής Προστασίας και Τοπικής Αυτοδιοίκησης, συμβάλλοντας στον ορθολογικό σχεδιασμό δράσεων, τη βελτιστοποίηση της επιχειρησιακής ετοιμότητας και τη μείωση των επιπτώσεων των δασικών πυρκαγιών.

Λέξεις-κλειδιά

Δασικές πυρκαγιές · Επικινδυνότητα · Πολυκριτηριακή ανάλυση · Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ) · Χαρτογράφηση κινδύνου · Χαλκιδική

ABSTRACT

Climate change plays a decisive role in increasing the frequency, severity, and spatial extent of wildfires, making the need for systematic prevention, adaptation, and spatial planning more urgent than ever. This study aims to map and assess wildfire hazard in the region of Halkidiki, Greece, by applying a Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) framework within a Geographic Information Systems (GIS) environment. The methodology is based on the integration of five key surface parameters: fuel type (derived from land cover data), slope, aspect, proximity to the road network, and proximity to human settlements. For each parameter, thematic maps were created and weighted based on literature and local conditions. The synthesis of all factors was carried out through map algebra, resulting in a unified wildfire hazard map with values ranging from 0 to 100. The spatial analysis revealed that areas of high hazard are mainly concentrated in the mountainous and semi-mountainous interior, as well as in wildland-urban interface zones of the region. In contrast, lower hazard values were recorded in flat, agriculturally dominated areas with low vegetation flammability and northern exposure. The outcomes of this research can serve as a valuable decision-support tool for Civil Protection authorities and local governments, facilitating risk-informed planning, optimisation of resource allocation, and the overall strengthening of wildfire prevention and preparedness strategies.

Keywords

Wildfires · Fire hazard · Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) · Geographic Information Systems (GIS) · Hazard mapping · Halkidiki

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα δάση προσφέρουν στον πλανήτη μας πληθώρα βασικών υλικών και άυλων αγαθών – από ζωτικής σημασίας χημικές ουσίες όπως το οξυγόνο (O₂), μέχρι πρώτες ύλες για οικονομικές δραστηριότητες, όπως το ξύλο. Μια από τις μεγαλύτερες απειλές τους όμως, οι δασικές πυρκαγιές, αν και φυσικό φαινόμενο που έχει συμβάλει διαχρονικά στη διαμόρφωση των οικολογικών χαρακτηριστικών των δασών, όταν είναι συχνές και ιδιαίτερα έντονες, μπορούν να μετατραπούν σε έναν από τους σοβαρότερους κινδύνους για τη βιωσιμότητα των δασικών οικοσυστημάτων. Οι συνέπειες τους επηρεάζουν όχι

μόνο το φυσικό και πολιτιστικό περιβάλλον, αλλά και την οικονομία και την καθημερινότητα των τοπικών κοινωνιών (Sakellariou et al., 2017a).

Οι πυρκαγιές μεγάλης έντασης επιφέρουν σημαντικές επιπτώσεις σε οικολογικό και κοινωνικο-οικονομικό επίπεδο. Μεταξύ αυτών συγκαταλέγονται:

i) η απώλεια ανθρώπινων ζώων και οι επιπτώσεις στην υγεία, τόσο σωματική όσο και ψυχική, όπως αναπνευστικά προβλήματα (Kim et al., 2017; Mateus and Fernandes, 2014),

ii) η καταστροφή οικοσυστημάτων και η απώλεια βιοποικιλότητας (Durán-Medraño et al., 2017; Silveira et al., 2016),

iii) οι οικονομικές απώλειες από ζημιές σε κατοικίες, μνημεία, υποδομές και άλλες δημόσιες και ιδιωτικές περιουσίες (Thomas et al., 2017) (Sakellariou et al., 2023).

Το πρόβλημα επιτείνεται από την κλιματική αλλαγή, η οποία ενισχύει τη συχνότητα και την ένταση των πυρκαγιών (Xu et al., 2020; Yu et al., 2019). Στη Μεσόγειο ειδικά, παρατηρείται αυξημένος κίνδυνος, λόγω των συνθηκών ξηρασίας που προβλέπονται για τις επόμενες δεκαετίες (Ruffault et al., 2020; Turco et al., 2017). Ενδεικτικά, το 2023 στην Ελλάδα καταγράφηκαν δύο καταστροφικά συμβάντα σε Έβρο και Ρόδο.

Η αποτελεσματική πρόληψη των δασικών πυρκαγιών αποσκοπεί στη διατήρηση της οικολογικής ποικιλομορφίας κάθε εθνικής επικράτειας (π.χ. ενδημική χλωρίδα και πανίδα, απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα και παραγωγή οξυγόνου, αντιδιαβρωτική λειτουργία και προστασία από πλημμύρες στις γειτονικές αστικές περιοχές, χώροι αναψυχής κ.ά.). Παράλληλα, συμβάλλει στην εξοικονόμηση περιορισμένων δημοσιονομικών πόρων (π.χ. αποκατάσταση ζημιών), ενισχύοντας ταυτόχρονα τη κοινωνική συνοχή και την τοπική και περιφερειακή ανάπτυξη.

Για τον λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια αυξανόμενη προσπάθεια καταγραφής των τοπικών χαρακτηριστικών κάθε υπό μελέτη περιοχής, αξιοποιώντας τις τεχνολογικές εξελίξεις και τα σύγχρονα εργαλεία. Στόχος αυτής της προσέγγισης είναι η συνολική αποτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς στις πλέον ευάλωτες περιοχές, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη μεμονωμένη όσο και τη συνδυαστική συμβολή των τοπικών παραγόντων στην έναρξη και την εξέλιξη των πυρκαγιών.

Η επιστημονική βιβλιογραφία έχει εξετάσει διάφορες μεθόδους εκτίμησης του κινδύνου πυρκαγιάς (Sharma et al., 2012; Sakellariou et al., 2019), εστιάζοντας όχι

μόνο στις φυσικές αλλά και στις ανθρωπογενείς αιτίες ανάφλεξης. Σημειώνεται ότι ο βαθμός επιρροής αυτών των παραγόντων ενδέχεται να διαφέρει ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες (π.χ. γεωμορφολογία, μετεωρολογικά δεδομένα, τουριστική πίεση κ.λπ.).

Με βάση όλα τα παραπάνω, βασικός στόχος της παρούσας μελέτης αποτελεί η εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς στο νομό Χαλκιδικής, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους επιφανειακούς παράγοντες που ευνοούν την ανάφλεξη και εξάπλωση δασικών πυρκαγιών. Κατόπιν της ανάλυσης επικινδυνότητας, προτείνονται συγκεκριμένα προληπτικά μέτρα, με ιδιαίτερη έμφαση στις πιο ευάλωτες περιοχές του νησιού. Η δομή της εργασίας οργανώνεται σε πέντε κύρια κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου των δασικών πυρκαγιών και αναδεικνύεται η σημασία της πρόληψης στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής. Το δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνει αναλυτική επισκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας με έμφαση στις μεθοδολογίες εκτίμησης πυροκινδυνότητας μέσω Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και πολυκριτηριακής ανάλυσης. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης, τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν και τα επιμέρους θεματικά επίπεδα. Το τέταρτο κεφάλαιο αναλύει τη μεθοδολογία και τα στάδια κατασκευής του ενιαίου χάρτη επικινδυνότητας. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης, ακολουθούμενα από τα συμπεράσματα, τις εφαρμογές της έρευνας και τις μελλοντικές δυνατότητες εξέλιξης της μεθοδολογίας.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η ενότητα αυτή εστιάζει στην αναγνώριση και χαρτογράφηση των βασικότερων παραγόντων πυρκαγιάς με τη συνδρομή των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και της τηλεπισκόπησης. Επίσης εξετάζεται η μεμονωμένη και συνεργιστική δράση των παραγόντων αυτών ώστε να αποδίδεται ένας ενιαίος χάρτης επικινδυνότητας πυρκαγιών.

Η μελέτη των Sakellariou et al. (2019) ανέπτυξε χάρτη επικινδυνότητας πυρκαγιών λαμβάνοντας υπόψη τη μεμονωμένη και συνδυαστική επίδραση των βασικότερων επιφανειακών παραγόντων. Αυτοί οι παράγοντες διακρίνονται σε φυσικούς και ανθρωπογενείς, όπως: μορφολογία εδάφους (κλίση και προσανατολισμός), είδος καύσιμης ύλης και προβλεπόμενη συμπεριφορά φωτιάς, απόσταση από οδικό δίκτυο και κατοικημένες περιοχές (πόλεις/οικισμοί). Σε κάθε έναν από αυτούς τους

παράγοντες αποδόθηκε συγκεκριμένο βάρος ανάλογα με τη συμβολή του στην έναρξη και εξάπλωση της πυρκαγιάς.

Οι Eugenio et al. (2016b) δημιούργησαν έναν χάρτη επικινδυνότητας πυρκαγιάς, αξιοποιώντας Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) και την τεχνική της Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytical Hierarchy Process - AHP). Οι παράγοντες που χρησιμοποιήθηκαν συνδύαζαν φυσικά και ανθρωπογενή χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς ανέπτυξαν θεματικούς χάρτες για: 1) ύψος υετού, 2) εξατμισοδιαπνοή, 3) υδατικό έλλειμμα και 4) μέση θερμοκρασία, μέσω χωρικής παρεμβολής. Επιπλέον, συμπεριλήφθηκαν μεταβλητές όπως: 5) κλίση, 6) υψόμετρο, 7) προσανατολισμός, 8) χρήσεις γης και 9) εγγύτητα στο οδικό δίκτυο. Όλοι οι παράγοντες ταξινομήθηκαν σύμφωνα με τη σχετική επικινδυνότητά τους, σταθμίστηκαν με AHP και συνδυάστηκαν μέσω άλγεβρας χαρτών. Η αξιοπιστία του τελικού χάρτη επιβεβαιώθηκε μέσω συσχέτισής του με ιστορικά δεδομένα πυρκαγιών.

Αντίστοιχα, οι Sivrikaya et al. (2014) συνέθεσαν χάρτη επικινδυνότητας πυρκαγιών λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως ο τύπος και τα χαρακτηριστικά της βλάστησης (κόμη, στάδιο ανάπτυξης), η μορφολογία (κλίση, έκθεση εδάφους) και ανθρωπογενείς παράμετροι (εγγύτητα σε δρόμους, οικισμούς και καλλιέργειες). Οι μεταβλητές αυτές σταθμίστηκαν και συνδυάστηκαν σε ενιαίο χάρτη επικινδυνότητας. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ορατότητας για την αξιολόγηση της επάρκειας εποπτείας των δασικών εκτάσεων.

Οι Roberto Barbosa et al. (2010) εστίασαν στην ανάπτυξη ενός συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης με βάση την πυροευσαισθησία περιοχών. Χρησιμοποίησαν δορυφορικά δεδομένα θερμών σημείων, τα οποία ενημέρωναν τον χάρτη κινδύνου σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα ενσωμάτωνε επίσης μετεωρολογικές πληροφορίες (θερμοκρασία, υγρασία, άνεμο), καλύψεις γης, τοπογραφικά χαρακτηριστικά (κλίση, προσανατολισμός) και την εγγύτητα σε ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι παράγοντες οργανώθηκαν σε θεματικούς χάρτες και σταθμίστηκαν μέσω εμπειρογνωμονικής αξιολόγησης, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη συνεισφορά τους στην έναρξη όσο και στην εξάπλωση πυρκαγιών. Το τελικό αποτέλεσμα ήταν ένας δυναμικός χάρτης επικινδυνότητας, ο οποίος παρείχε επίσης τη δυνατότητα ιεράρχησης ενεργών εστιών φωτιάς.

Οι Amalina et al. (2016) υιοθέτησαν την προσέγγιση της άλγεβρας χαρτών, ενσωματώνοντας παραμέτρους όπως: χρήσεις γης, δείκτες βλάστησης και υγρασίας (NDVI, NDMI), θερμοκρασία, και εγγύτητα σε οδικά και οικιστικά δίκτυα, υδάτινα σώματα και γεωργικές εκτάσεις. Αντί να δώσουν μεμονωμένα βάρη σε κάθε παράγοντα, ταξινόμησαν τις μεταβλητές σε φυσικές και ανθρωπογενείς και προσέδωσαν βάρη σε αυτές τις δύο κατηγορίες. Η συγκριτική ανάλυση έδειξε την υψηλή σημασία των φυσικών παραγόντων, κάτι που επιβεβαιώθηκε από τη σύγκριση με ιστορικά δεδομένα.

Οι Kant Sharma et al. (2012) επικεντρώθηκαν σε πέντε βασικούς παράγοντες: καύσιμη ύλη, υψόμετρο, κλίση, έκθεση και εγγύτητα σε δρόμους και οικισμούς. Εφάρμοσαν και συνέκριναν τρεις διαφορετικές μεθόδους στάθμισης: γνώσης βάσει ειδικών εμπειρογνομόνων (knowledge-based), διακριτής στάθμισης -βάρη με απόλυτους αριθμούς- (crisp) και στάθμιση μέσω της ασαφούς (fuzzy) Αναλυτικής Ιεράρχησης. Η τελευταία προσέγγιση επέτρεψε την καλύτερη ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στη διαδικασία εκτίμησης κινδύνου.

Οι Vadrevu et al. (2010) συνέθεσαν έναν ενιαίο χάρτη επικινδυνότητας συνδυάζοντας τεχνικές ασαφούς λογικής, αναλυτικής ιεράρχησης και άλγεβρας χαρτών. Οι παράγοντες που ενσωματώθηκαν κάλυπταν γεωμορφολογία (π.χ. υψόμετρο, κλίση, έκθεση), χαρακτηριστικά της βλάστησης (π.χ. υγρασία, πυκνότητα), μετεωρολογικές μεταβλητές (μέση θερμοκρασία, βροχόπτωση, εξατμισοδιαπνοή), καθώς και κοινωνικοοικονομικά δεδομένα (πυκνότητα πληθυσμού, μόρφωση, απασχόληση στον πρωτογενή τομέα). Οι μεταβλητές αυτές σταθμίστηκαν, συνδυάστηκαν και απεικονίστηκαν σε έναν σύνθετο χάρτη εκτίμησης κινδύνου πυρκαγιάς.

Οι Gai et al. (2011) ανέπτυξαν έναν χάρτη εκτίμησης πυροκινδυνότητας βασισμένο σε τρεις αλληλεξαρτώμενες κατηγορίες παραγόντων: τα φυσικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, τις κοινωνικοοικονομικές παραμέτρους και την προσβασιμότητα των δυνάμεων πυρόσβεσης και των σχετικών υποδομών. Συγκεκριμένα, στο μοντέλο ενσωματώθηκαν γεωμορφολογικά δεδομένα (υψόμετρο, κλίση και προσανατολισμός), χρήσεις γης και μετεωρολογικά στοιχεία (θερμοκρασία, υγρασία και ταχύτητα ανέμου). Παράλληλα, ελήφθησαν υπόψη η πυκνότητα πληθυσμού και η οικονομική αξία των δασικών εκτάσεων, ενώ στην κατηγορία της προσβασιμότητας περιλήφθηκε η απόσταση από εγκαταστάσεις πυροσβεστικών υπηρεσιών, παρατηρητήρια

πυρκαγιών και βάσεις ελικοπτέρων πυρόσβεσης. Εκτός από την επιμέρους στάθμιση των παραγόντων, καθορίστηκε και ένα εξωτερικό βάρος για κάθε μεταβλητή, με βάση την τεχνική Grey Relativity Analysis. Αφού κατασκευάστηκαν επιμέρους χάρτες κινδύνου για κάθε γενική θεματική ενότητα, ακολούθησε η σύνθεσή τους σε έναν ενιαίο χάρτη επικινδυνότητας πυρκαγιών, ο οποίος ενσωματώνει συνολικά όλους τους κρίσιμους παράγοντες της ανάλυσης.

Οι You et al. (2017) αξιολόγησαν τον κίνδυνο δασικών πυρκαγιών σε μια περιοχή παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς, προχωρώντας σε χωροχρονική ανάλυση του κινδύνου σε χρονικό ορίζοντα δώδεκα ετών. Στη μελέτη τους ενσωμάτωσαν γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά (κλίση, προσανατολισμός και υψόμετρο μέσω Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους - DEM), μετεωρολογικές παραμέτρους (θερμοκρασία, ύψος βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοή), στοιχεία της βλάστησης (τύποι και υγρασία καύσιμης ύλης, στάδιο ανάπτυξης και πυκνότητα κόμης), καθώς και ανθρωπογενείς παράγοντες (εγγύτητα σε πόλεις, αγροτικούς δρόμους, υδάτινα σώματα και χρήσεις γης). Η εκτίμηση της σχετικής βαρύτητας κάθε μεταβλητής πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP), ενώ η τελική σύνθεση και παραγωγή του χάρτη επικινδυνότητας έγινε με χρήση άλγεβρας χαρτών, εργαλείο εγγενές στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS). Τέλος, εφαρμόστηκαν τεχνικές χωρικής στατιστικής (όπως η Εξερευνητική Χωρική Ανάλυση Δεδομένων – ESDA, και δείκτες χωρικής αυτοσυσχέτισης), με στόχο την ανάδειξη χωρικών προτύπων (π.χ. τύποι συσσωρεύσεων) που μεταβάλλονται στον χρόνο.

Αρκετές μελέτες έχουν αναπτύξει μεθοδολογίες εκτίμησης της επικινδυνότητας πυρκαγιάς αξιοποιώντας πολυκριτηριακή ανάλυση. Σε αυτό το πλαίσιο, ερευνητές συλλέγουν εξειδικευμένα χωρικά δεδομένα —προερχόμενα είτε από επίσημες υπηρεσίες είτε από δορυφορικές πηγές— τα οποία θεωρούνται καθοριστικά για την κατανόηση της έναρξης και της εξάπλωσης των δασικών πυρκαγιών. Οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη καλύπτουν τόσο φυσικές όσο και ανθρωπογενείς μεταβλητές. Μεταξύ των φυσικών παραμέτρων περιλαμβάνονται οι τύποι της καύσιμης ύλης και τα χαρακτηριστικά τους (π.χ. ευφλεκτότητα, δυναμική καύσης), καθώς και στοιχεία τοπογραφίας, όπως το υψόμετρο, η κλίση και η έκθεση του εδάφους. Οι ανθρωπογενείς παράγοντες αφορούν κυρίως την εγγύτητα σε οικισμούς και στο οδικό δίκτυο, στοιχεία που συχνά σχετίζονται με αυξημένες πιθανότητες πυρκαγιάς λόγω ανθρώπινης δραστηριότητας. Αρχικά, πραγματοποιείται εσωτερική στάθμιση, δηλαδή αποτίμηση

της συσχέτισης κάθε παράγοντα με την επικινδυνότητα εμφάνισης πυρκαγιάς, μέσω της απόδοσης ειδικών βαρών. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται εξωτερική στάθμιση, η οποία επιχειρεί να εκτιμήσει τη σχετική σημασία κάθε παραμέτρου στο γενικό σύστημα εκτίμησης κινδύνου, ενσωματώνοντας τη συλλογική τους συνεισφορά στην έναρξη και την εξέλιξη των πυρκαγιών. Η τελική αποτύπωση του κινδύνου προκύπτει από τη χωρική σύνθεση όλων αυτών των παραγόντων, αξιοποιώντας τις δυνατότητες των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ), ώστε να παραχθεί ένας ενιαίος θεματικός χάρτης επικινδυνότητας για κάθε υπό μελέτη περιοχή (Power, 2006; Sakellariou et al., 2015).

3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1. Περιοχή μελέτης

Η Περιφερειακή Ενότητα Χαλκιδικής βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της Ελλάδας και υπάγεται διοικητικά στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, με έδρα τον Πολύγυρο. Το υψόμετρο στην περιοχή κυμαίνεται από το επίπεδο της θάλασσας έως και τα 1.162 μέτρα, με τις υψηλότερες περιοχές να εντοπίζονται κυρίως στο εσωτερικό του νομού. Από γεωμορφολογική άποψη, περίπου το 25% της έκτασης χαρακτηρίζεται ως πεδινό, το 51% ως ημιορεινό και το 24% ως ορεινό έδαφος. Αξιοσημείωτο είναι ότι η Χαλκιδική διαθέτει τη μεγαλύτερη ακτογραμμή μεταξύ των ελληνικών νομών που δεν είναι νησιωτικοί, με μήκος που φτάνει περίπου τα 550 χιλιόμετρα (Σακελλαρίου, 2024).

Η Περιφερειακή Ενότητα Χαλκιδικής διαθέτει πληθυσμό 105.908 μόνιμων κατοίκων, κατανεμημένο σε συνολική έκταση 2.922 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Ο Δήμος Πολυγύρου, που αποτελεί και την πρωτεύουσα της περιοχής, συγκεντρώνει τον μεγαλύτερο αριθμό κατοίκων, με 22.048 άτομα. Η μέση πληθυσμιακή πυκνότητα της ενότητας ανέρχεται σε περίπου 36 κατοίκους ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο (ΕΛ.ΣΤΑΤ, 2018).

Η Χαλκιδική χαρακτηρίζεται από μεσογειακό κλίμα, με θερμά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες. Οι υψηλότερες μέσες θερμοκρασίες παρατηρούνται τον Ιούλιο (28,1 °C) και τον Αύγουστο (27,7 °C), ενώ οι μέσες μέγιστες τιμές καταγράφονται επίσης τους ίδιους μήνες, με 32,4 °C και 32,3 °C αντίστοιχα, βάσει δεδομένων εικοσαετίας (1997–2017). Η σχετική υγρασία παρουσιάζει τα χαμηλότερα επίπεδά της τον Ιούλιο (49,4%) και τον

Αύγουστο (52%). Αντίστοιχα, το μικρότερο μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης έχει καταγραφεί τον Αύγουστο (16,2 mm). Η μέση ταχύτητα ανέμου κατά τη θερινή περίοδο (Ιούνιος έως Αύγουστος) κυμαίνεται μεταξύ 10,8 και 11,4 χλμ./ώρα, ενώ οι μέγιστες ημερήσιες τιμές φτάνουν τα 38,2 έως 49,5 χλμ./ώρα (Σακελλαρίου, 2024).

Σε ό,τι αφορά τις καλύψεις και χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης, κυρίαρχη είναι η δασική κάλυψη (συμπεριλαμβανομένων των θαμνωδών εκτάσεων), η οποία καταλαμβάνει περίπου το 44% της συνολικής έκτασης. Ακολουθούν οι αγροτικές καλλιέργειες, που καταλαμβάνουν το 32%, ενώ οι αστικοποιημένες περιοχές καλύπτουν μόλις το 2%. Οι υπόλοιπες κατηγορίες χρήσεων, όπως λιβάδια και καμένες εκτάσεις, καταλαμβάνουν το υπόλοιπο ποσοστό (Σακελλαρίου, 2021).

Ιδιαίτερη σημασία έχει και η γεωγραφική κατανομή των ανθρωπογενών δομών. Στην περιοχή εντοπίζονται συνολικά 160 κατοικήσιμοι οικισμοί (πόλεις και χωριά), καθώς και ένα εκτεταμένο οδικό δίκτυο μήκους 8.027 χιλιομέτρων, το οποίο διακρίνεται σε επιμέρους κατηγορίες, ανάλογα με τη λειτουργία και τη χρήση του (Σακελλαρίου, 2021).

Επιπλέον, κρίσιμο ρόλο στη χωρική ανάλυση παίζει το ιστορικό πυρκαγιών για την περίοδο 2000–2017. Εξετάζοντας μόνο τα συμβάντα με έκταση άνω των 3 εκταρίων, προκύπτει ότι οι δασικές εκτάσεις υπέστησαν τις σοβαρότερες απώλειες, καλύπτοντας το 91% της συνολικά καμένης έκτασης (5.500 εκτάρια). Ακολουθούν οι γεωργικές εκτάσεις με 535 εκτάρια (9%) και οι χορτολιβαδικές περιοχές με 52 εκτάρια (1%) (Πυροσβεστικό Σώμα Ελλάδας, 2018).

3.2 Δεδομένα και μεθοδολογία

Ο βασικός άξονας της μεθοδολογίας στηρίζεται στην ανάπτυξη ενός ενιαίου χάρτη επικινδυνότητας πυρκαγιών, βασισμένου στα τοπικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, όπως η κλίση και ο προσανατολισμός του εδάφους, οι καλύψεις γης, καθώς και η απόσταση από το οδικό δίκτυο και τους ανθρώπινους οικισμούς. Αρχικά, εκτιμάται η επιμέρους επίδραση κάθε παράγοντα —φυσικού ή ανθρωπογενούς— στη συνολική επικινδυνότητα πυρκαγιάς. Στη συνέχεια, όλα τα παραπάνω δεδομένα ενσωματώνονται σε έναν ενιαίο χάρτη, ο οποίος αποτυπώνει τη συνολική επικινδυνότητα, λαμβάνοντας υπόψη τη συμβολή όλων των παραμέτρων. Η διαδικασία περιλαμβάνει την απόδοση διαφορετικών βαρών σε κάθε παράγοντα, ανάλογα με τον

βαθμό επιρροής του στην έναρξη, την ένταση και την εξάπλωση της πυρκαγιάς. Όλη η ανάλυση υλοποιείται με την υποστήριξη των αναλυτικών δυνατοτήτων των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και την πολυκριτηριακή ανάλυση (Sakellariou et al., 2019).

3.2.1. Περιβαλλοντικοί παράγοντες

Κλίση εδάφους: Η κλίση του εδάφους αποτελεί έναν από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες στην εξάπλωση των δασικών πυρκαγιών, καθώς έχει αποδειχθεί ότι η φωτιά εξαπλώνεται ταχύτερα σε ανωφέρεια σε σχέση με κατωφέρεια (Sivrikaya et al., 2014; Suryabhagavan, 2016). Αυτό συμβαίνει επειδή η φλόγα βρίσκεται πιο κοντά στην καύσιμη ύλη, ενώ η ακτινοβολούμενη θερμότητα μειώνει την υγρασία της, δημιουργώντας συνθήκες ευνοϊκές για ανάφλεξη, ιδίως σε περιοχές με έντονες κλίσεις (Σακελλαρίου, 2021).

Σε τέτοιες περιπτώσεις, ακόμη και αν οι υπόλοιπες συνθήκες είναι σταθερές, η διάδοση της πυρκαγιάς σε ανωφέρεια μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις. Επιπλέον, η καταστολή πυρκαγιών σε περιοχές με μεγάλη κλίση είναι ιδιαίτερα δύσκολη, λόγω της δυσβατότητας του εδάφους και της περιορισμένης προσβασιμότητας για τα επίγεια μέσα. Παράλληλα, ο γρήγορος ρυθμός εξάπλωσης καθιστά δύσκολη την αναχαίτιση και τον έλεγχο του μετώπου της φωτιάς. Ως αποτέλεσμα, καθίσταται συχνά αναγκαία η χρήση εναέριων μέσων, γεγονός που αυξάνει σημαντικά το επιχειρησιακό κόστος της καταστολής.

Έκθεση εδάφους: Ο προσανατολισμός (ή αλλιώς έκθεση) του εδάφους αποτελεί σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει τη συμπεριφορά και την εξέλιξη των δασικών πυρκαγιών (Suryabhagavan, 2016). Ο συγκεκριμένος παράγοντας σχετίζεται άμεσα με τη θερμική επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, στοιχεία που ρυθμίζουν την υγρασία του εδάφους και κατ' επέκταση την ευφλεκτότητα της καύσιμης ύλης.

Ειδικά στο βόρειο ημισφαίριο, όπως και στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, οι νότιου προσανατολισμού εκτάσεις θεωρούνται υψηλού κινδύνου, καθώς δέχονται μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό οδηγεί σε ταχύτερη εξάτμιση της υγρασίας και

συνεπώς σε μείωση του υδατικού αποθέματος στο έδαφος, με αποτέλεσμα η περιοχή να γίνεται πιο ευάλωτη στην ανάφλεξη (Sivrikaya et al., 2013).

Η ταξινόμηση του προσανατολισμού πραγματοποιήθηκε με στόχο τη συσχέτισή του με διαφορετικά επίπεδα επικινδυνότητας. Συγκεκριμένα, ο προσανατολισμός του εδάφους κατανεμήθηκε σε πέντε διακριτές κατηγορίες, όπως συνέβη και με την κλίση, με βάση τη σχετική συμβολή κάθε κατηγορίας στην πιθανότητα εκδήλωσης και εξάπλωσης πυρκαγιάς. Η αντιστοίχιση πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Καλύψεις γης: Η βλάστηση, όπως αποτυπώνεται στις καλύψεις γης, αποτελεί βασικό παράγοντα στον μηχανισμό ανάφλεξης και εξέλιξης των δασικών πυρκαγιών, καθώς από τη φύση και τα χαρακτηριστικά της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η ευαλωτότητα μιας περιοχής, καθώς και η ένταση και η κλίμακα που μπορεί να λάβει το φαινόμενο. Ο τύπος, η ποσότητα και η κατανομή της βλάστησης επηρεάζουν άμεσα τόσο την πιθανότητα ανάφλεξης όσο και τη δυναμική της εξάπλωσης της φωτιάς (Σακελλαρίου, 2016).

Ωστόσο, εκτός από τη φυσική βλάστηση, κρίσιμος είναι και ο τρόπος με τον οποίο αυτή κατανέμεται χωρικά στο τοπίο. Η διάρθρωση των φυτικών ειδών, καθώς και η εγγύτητά τους με ανθρωπογενείς δομές, επηρεάζουν σημαντικά τον κίνδυνο πυρκαγιάς. Η παρουσία διεπαφών μεταξύ φυσικών και ανθρωπογενών στοιχείων (π.χ. οικισμοί, υποδομές) ενδέχεται να αυξήσει την πιθανότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς (Σακελλαρίου, 2016).

3.2.2. Ανθρωπογενείς παράγοντες

Απόσταση από το οδικό δίκτυο: Σε ό,τι αφορά τους ανθρωπογενείς παράγοντες που επηρεάζουν την επικινδυνότητα μιας περιοχής, δύο θεωρούνται οι πλέον καθοριστικοί. Ο πρώτος είναι η εγγύτητα με το οδικό δίκτυο, καθώς μεγάλο ποσοστό περιστατικών πυρκαγιάς εκδηλώνεται κοντά σε δρόμους. Τα συμβάντα αυτά συχνά οφείλονται είτε σε ανθρώπινη αμέλεια, όπως η ρίψη αναμμένων τσιγάρων, είτε σε εσκεμμένους εμπρησμούς (Ager et al., 2014; Suryabhagavan, 2016).

Για τον λόγο αυτό, η μεθοδολογική προσέγγιση περιλαμβάνει τη δημιουργία ζωνών γύρω από το οδικό δίκτυο, με διακριτά χωρικά επίπεδα κάθε 100 μέτρα. Η ζώνη που

βρίσκεται σε άμεση επαφή με τους δρόμους —δηλαδή τα πρώτα 100 μέτρα— θεωρείται ως η πλέον επικίνδυνη. Σταδιακά, ο βαθμός επικινδυνότητας μειώνεται έως και τη ζώνη των 500 μέτρων, όπου και περιορίζεται η άμεση ανθρώπινη δραστηριότητα, ενώ ταυτόχρονα αυξάνονται οι δυσκολίες προσβασιμότητας.

Απόσταση από οικισμούς και πόλεις: Το τελευταίο κριτήριο που ενσωματώνεται στην παρούσα μεθοδολογική προσέγγιση για την κατασκευή του ενοποιημένου χάρτη επικινδυνότητας πυρκαγιών αφορά την απόσταση από αστικούς σχηματισμούς και μικρούς οικισμούς (Suryabhagavan, 2016). Η μεταβλητή αυτή θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς πολλές δασικές πυρκαγιές εκδηλώνονται στις ζώνες διεπαφής μεταξύ δασικών περιοχών και ανθρώπινων οικισμών — γνωστές και ως Wildland-Urban Interface (Narayanaraj and Wimberly, 2012; Sakellariou et al., 2019).

Η μεθοδολογική διαδικασία είναι ανάλογη με αυτήν που εφαρμόστηκε για το οδικό δίκτυο, προσαρμοσμένη όμως στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οικισμών, οι οποίοι συνήθως παρουσιάζονται ως πολυγωνικά δεδομένα και όχι ως γραμμικές οντότητες. Οι ζώνες επιρροής ορίστηκαν ανά 100 μέτρα, καθώς γύρω από τους οικισμούς παρατηρείται συχνότερη ανθρώπινη δραστηριότητα και ευκολότερη προσβασιμότητα. Η μέγιστη ακτίνα επιρροής ορίστηκε 1 χιλιόμετρο καθώς πέρα από αυτό το όριο η επίδραση της εγγύτητας στους οικισμούς θεωρείται περιορισμένη ή αμελητέα.

Επιπλέον, για αποστάσεις πέραν του 1 χιλιομέτρου, η μετακίνηση βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά στο οδικό δίκτυο, του οποίου ο ρόλος έχει ήδη συνεκτιμηθεί στα προηγούμενα στάδια της ανάλυσης.

3.2.3. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία της παρούσας εργασίας βασίστηκε στη δημιουργία θεματικών χαρτών για πέντε κρίσιμους παράγοντες επιφανείας που σχετίζονται με την εκδήλωση και εξάπλωση δασικών πυρκαγιών. Οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν την κλίση και τον προσανατολισμό του εδάφους, τα οποία υπολογίστηκαν με χρήση των αντίστοιχων εργαλείων ανάλυσης στο περιβάλλον GIS, βάσει του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM) της περιοχής μελέτης. Παράλληλα, δημιουργήθηκαν ζώνες επιρροής (buffers) γύρω από το οδικό δίκτυο και τους ανθρωπογενείς πολυγωνικούς σχηματισμούς, ώστε να αποτυπωθεί η σχετική εγγύτητα που ενδέχεται να επηρεάζει την έναρξη πυρκαγιών.

Όλοι οι θεματικοί χάρτες επαναταξινομήθηκαν σε πέντε επίπεδα επικινδυνότητας και βαθμονομήθηκαν σύμφωνα με τον πίνακα των ειδικών βαρών, ο οποίος καθορίζει τη σχετική συμβολή κάθε παράγοντα στον τελικό δείκτη επικινδυνότητας (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Στάθμιση επιφανειακών παραγόντων αναφορικά με τη συμβολή τους στην επικινδυνότητα πυρκαγιών (Ozenen Kavlak, 2021, Sakellariou et al., 2019, Adjusted)

Κλίση εδάφους	Βάρ ο	Βαθμός Επικινδυνότη τας	Έκθεση εδάφους	Βάρ ο	Βαθμός Επικινδυνότη τας
0 – 5	2	Πολύ χαμηλός	Επίπεδο έδαφος	1	Εξαιρετικά χαμηλός
5 – 10	4	Μέτριος	Βόρειος	2	Πολύ χαμηλός
10 – 15	6	Υψηλός	Βορειοανατολικ ός	4	Μέτριος
15 – 35	8	Πολύ υψηλός	Βορειοδυτικός	4	Μέτριος
> 35	10	Εξαιρετικά υψηλός	Ανατολικός	6	Υψηλός
			Νοτιοανατολικό ς	8	Πολύ υψηλός
			Δυτικός	6	Υψηλός
			Νοτιοδυτικός	9	Πολύ υψηλός
			Νότιος	10	Εξαιρετικά υψηλός
Κάλυψη γης	Βάρ ο	Βαθμός Επικινδυνότη τας	Απόσταση από το οδικό δίκτυο [μέτρα]	Βάρ ο	Βαθμός Επικινδυνότη τας
Παραλίες αμμόλοφοι	0	Μηδενικός	400 - 1000	2	Πολύ χαμηλός

αμμουδιές / Απογυμνωμέν οι βράχοι / Παραθαλάσσι οι βάλτοι / Θάλασσα και ωκεανός					
Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση / Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες / Ζώνες λιμένων / Χώροι εξορύξεως ορυκτών / Χώροι απορρίψεως απορριμμάτων / Χώροι οικοδόμησης / Εγκαταστάσει ς αθλητισμού και αναψυχής / Καμένες εκτάσεις	2	Χαμηλός	400	4	Χαμηλός
Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη / Αμπελώνες / Ελαιώνες / Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας / Γη που	4	Μέτριος	300	6	Μέτριος

καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία					
Φυσικοί βοσκότοποι / Λιβάδια	6	Υψηλός	200	8	Υψηλός
Δάσος πλατυφύλλων	7	Υψηλός	100	10	Πολύ υψηλός
Μικτό δάσος / Σκληροφυλλικ ή βλάστηση / Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	8	Πολύ υψηλός			
Δάσος κωνοφόρων	9	Εξαιρετικά υψηλός			
			Απόσταση από αστικούς σχηματισμούς [μέτρα]	Ειδικ ό Βάρο ς	Βαθμός Επικινδυνότητ ας
			500 – 1000	2	Χαμηλός
			400 – 500	4	Μέτριος
			300 – 400	5	Μέτριος
			200 - 300	6	Υψηλός
			100 - 200	7	Πολύ υψηλός
			0 - 100	9	Εξαιρετικά υψηλός

Σύμφωνα με τα δεδομένα του Πίνακα Χ, κάθε εικονοστοιχείο της περιοχής μελέτης βαθμολογείται με βάση μια σύνθετη εξίσωση που συνυπολογίζει τα επιμέρους κριτήρια επικινδυνότητας. Η εξίσωση έχει ως εξής:

$$\text{Επικινδυνότητα εικονοστοιχείου} = 4 \cdot LC + 1,5SI + 1,5As + 1,5Rd + 1,5Td$$

όπου:

- **LC** αντιστοιχεί στην κάλυψη γης και τη σχετική πυροσυμπεριφορά της,
- **SI** στην κλίση του εδάφους,
- **As** στον προσανατολισμό του εδάφους,
- **Rd** στην απόσταση από το οδικό δίκτυο και
- **Td** στην απόσταση από τους οικισμούς.

Σε κάθε περίπτωση, οι επιμέρους τιμές σταθμίζονται με συντελεστές ανάλογα με τη σημασία τους, με την κάλυψη γης να έχει τη μεγαλύτερη βαρύτητα (4), ενώ οι υπόλοιποι παράγοντες λαμβάνουν συντελεστή 1,5.

Κάθε εικονοστοιχείο, το οποίο αντιστοιχεί σε χωρική μονάδα μεγέθους 100×100 μέτρων, μπορεί να λάβει συνολική τιμή επικινδυνότητας που κυμαίνεται μεταξύ 0 και 100, επιτρέποντας έτσι την κατηγοριοποίηση της περιοχής μελέτης ως προς τον βαθμό έκθεσής της σε κίνδυνο πυρκαγιάς.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1. Φυσικοί παράγοντες επιρροής και διάδοσης πυρκαγιών και εκτίμηση της επικινδυνότητας

Μία από τις βασικές εισροές για την ανάλυση του φαινομένου των δασικών πυρκαγιών αποτελεί το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Digital Elevation Model – DEM) της περιοχής μελέτης. Με τη χρήση των εργαλείων των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), και ειδικότερα μέσω του λογισμικού ArcGIS 10.8.1, κατασκευάστηκε χάρτης ισοϋψών καμπυλών ανά 200 μέτρα..

Όλα τα γεωχωρικά δεδομένα επεξεργάζονται στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ '87), το οποίο υιοθετείται ως σύστημα προβολής. Σύμφωνα με τον Πίνακα 2, η ζώνη μέχρι τα 400 μέτρα καλύπτει περίπου το 74% της συνολικής

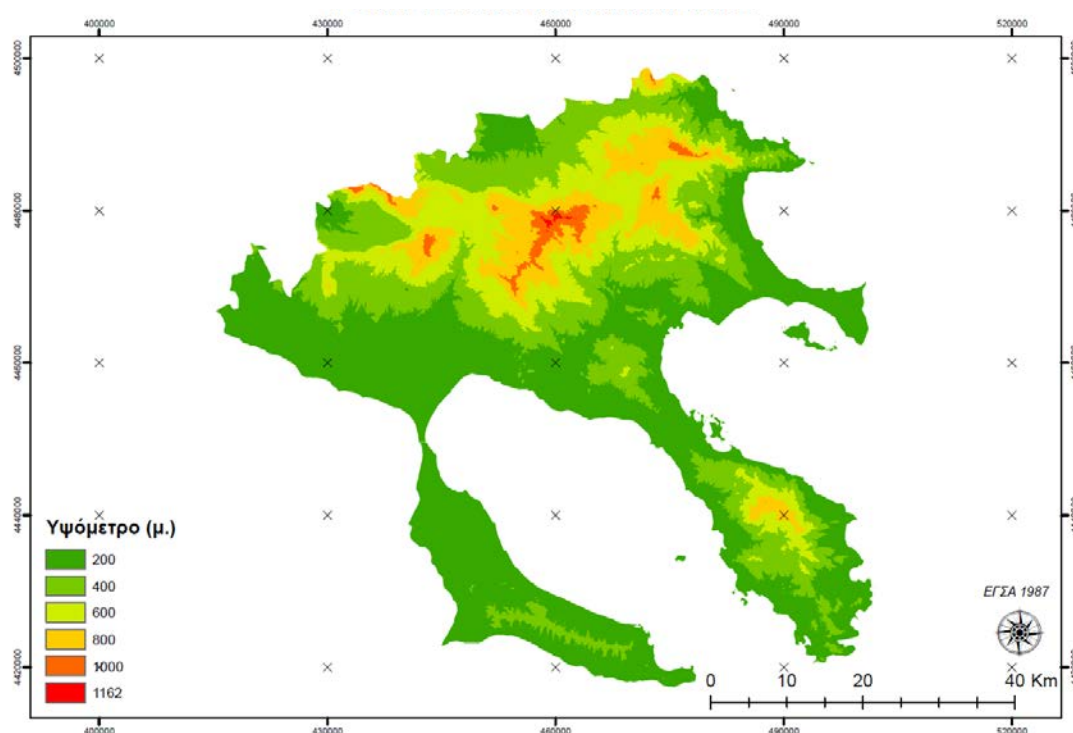
έκτασης του νησιού. Η ενδιάμεση υψομετρική κατηγορία (400–800 μ.) καλύπτει το 24%, ενώ οι περιοχές άνω των 800 μέτρων αντιστοιχούν στο 1,5% της έκτασης.

Πίνακας 2. Έκτασης των υψομετρικών ζωνών

Υψομετρικά επίπεδα (μ.)	Έκταση (ha)	% του συνόλου
0-200	141339	48,5
200-400	74952	25,7
400-600	45615	15,7
600-800	25243	8,6
800-1000	4149	1,4
1000-1162	187	0,1

Ο Χάρτης 1 αποτυπώνει τη διαβάθμιση των υψομετρικών επιπέδων του νομού Χαλκιδικής σε ζώνες των 200 μέτρων. Όπως παρατηρείται, οι παράκτιες περιοχές και γενικότερα η περιμετρική ζώνη του νομού εμφανίζουν χαμηλά υψόμετρα, κυρίως μεταξύ 0 και 300 μέτρων. Αντίθετα, η ενδοχώρα της Χαλκιδικής χαρακτηρίζεται από υψηλότερα υψόμετρα, τα οποία κυμαίνονται μεταξύ 300 και 1.162 μέτρων.

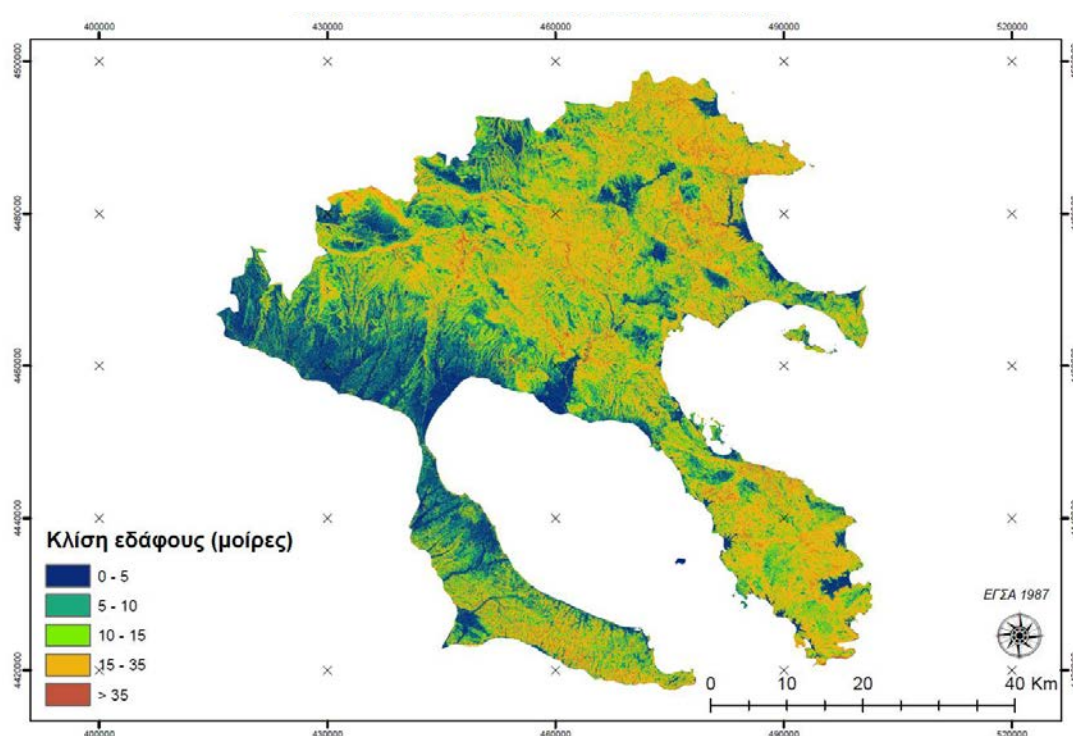
Χάρτης 1. Υψόμετρο του Νομού Χαλκιδικής (σε μέτρα)



Η κλίση του εδάφους αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη δυναμική εξάπλωσης των δασικών πυρκαγιών. Έχει παρατηρηθεί ότι η πυρκαγιά εξαπλώνεται ταχύτερα σε ανωφέρειες σε σύγκριση με κατωφέρειες (Suryabhagavan et al., 2016), γεγονός που συνδέεται με τη μεγαλύτερη εγγύτητα των φλογών προς την καύσιμη ύλη και τη μειωμένη υγρασία του εδάφους λόγω αυξημένης ακτινοβολούμενης θερμότητας (Butler et al., 2007). Ως αποτέλεσμα, οι περιοχές με υψηλή κλίση παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευπάθεια στην ανάφλεξη και στη ραγδαία εξάπλωση της φωτιάς σε σχέση με επίπεδες ή ήπιες κλίσεις.

Ο Χάρτης 2 απεικονίζει την κατανομή της κλίσης του εδάφους σε ζώνες ανά 5 μοίρες. Όπως παρατηρούμε, οι μέτριες και υψηλότερες κλίσεις εντοπίζονται κυρίως στην ενδοχώρα, στο ανατολικό και νότιο τμήμα του νομού. Οι υπόλοιπες περιοχές παρουσιάζουν σχετικά ήπιες κλίσεις.

Χάρτης 2. Κλίση εδάφους του Νομού Χαλκιδικής (σε μοίρες)



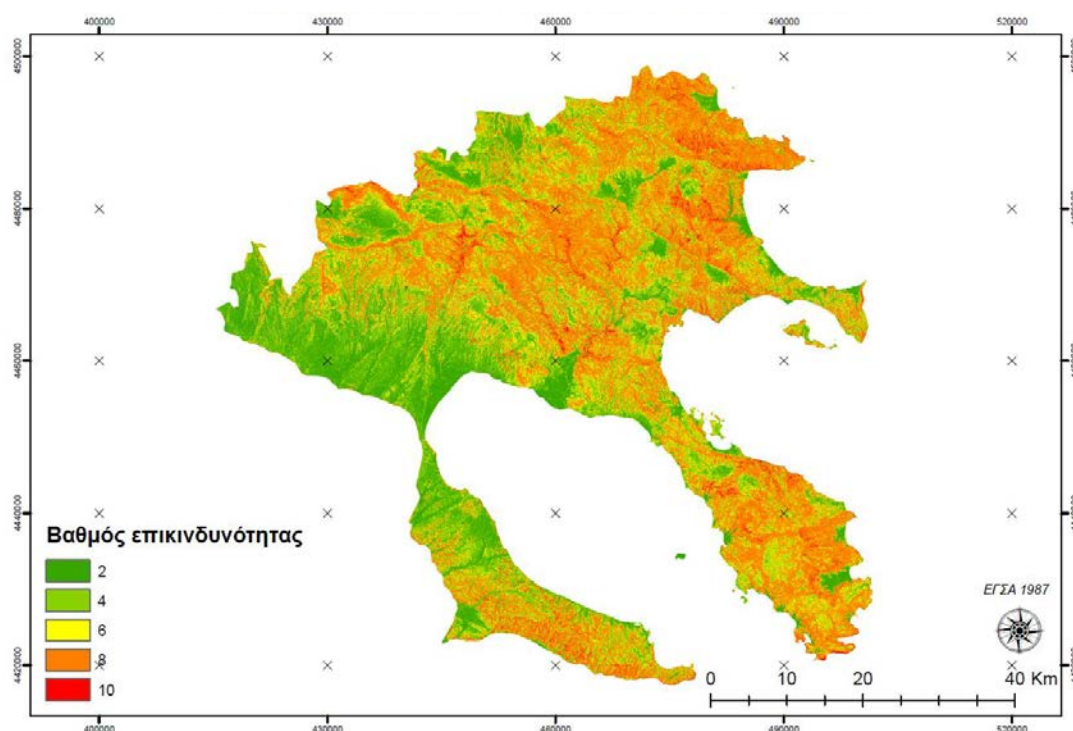
Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει την κατανομή των εδαφών ανά ζώνη κλίσης. Σύμφωνα με τον πίνακα, το 40% της συνολικής έκτασης του νομού καταλαμβάνεται από περιοχές με πολύ ήπιες κλίσεις (έως 10°), οι οποίες περιλαμβάνουν κυρίως τις παράκτιες ζώνες. Οι ενδιάμεσες κλίσεις (11°–30°) καλύπτουν το 54% της περιοχής. Τέλος, περιοχές με υψηλότερες κλίσεις (> 30°) αντιστοιχούν σε περίπου 5% της έκτασης.

Πίνακας 2. Έκταση επιπέδων κλίσεων εδάφους

Κλίση Εδάφους (σε μοίρες)	Έκταση (Ha)	%
0 - 10	116979	40
11 - 15	54982	19
16 - 20	49175	17
21 - 25	34433	12
26 - 30	19528	7
31 - 35	10131	3
> 35	6255	2

Ο υψηλότερος βαθμός επικινδυνότητας λόγω της κλίσης του εδάφους παρατηρείται κυρίως στα ενδότερα και ορεινά τμήματα της Χαλκιδικής, ιδιαίτερα στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα του νομού, καθώς και σε εκτεταμένες περιοχές του δεύτερου χερσαίου σχηματισμού (Χάρτης 3). Αντίθετα, οι παραθαλάσσιες ζώνες, οι οποίες περιβάλλουν μεγάλο μέρος της Χαλκιδικής, παρουσιάζουν χαμηλότερους βαθμούς επικινδυνότητας, γεγονός που αποδίδεται στη γενικά ήπια μορφολογία των ακτών.

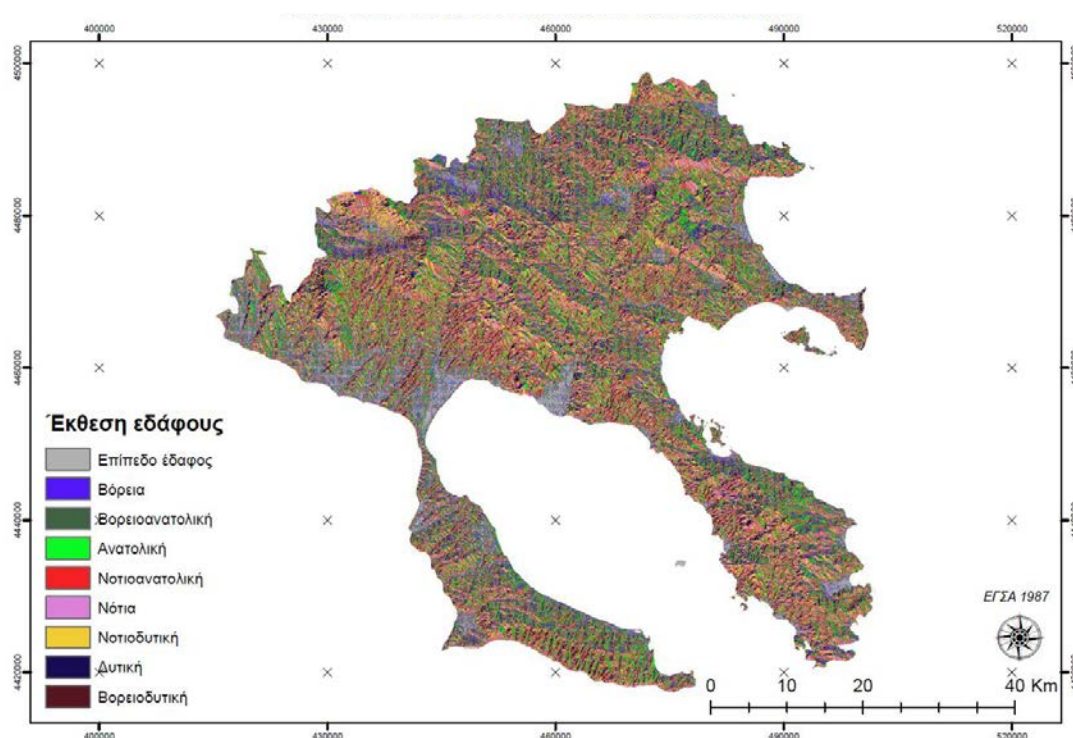
Χάρτης 3. Επικινδυνότητα με βάση την κλίση εδάφους στον Νομό Χαλκιδικής



Η έκθεση του εδάφους (aspect) αποτελεί έναν ακόμη φυσικό παράγοντα που επηρεάζει την εξέλιξη των δασικών πυρκαγιών, καθώς σχετίζεται με ένα σύμπλεγμα μεταβλητών όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία και η υγρασία του εδάφους (Suryabhagavan et al., 2016). Στις περιοχές της Μεσογείου, ο νότιος προσανατολισμός θεωρείται γενικά πιο ευνοϊκός για την εκδήλωση και την ένταση των πυρκαγιών, καθώς δέχεται μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό επιταχύνει την απώλεια υγρασίας από τη φυτοκάλυψη, καθιστώντας την πιο ευάλωτη στην ανάφλεξη (Sivrikaya et al., 2013).

Ο Χάρτης 4 απεικονίζει τη χωρική κατανομή όλων των βασικών κατηγοριών προσανατολισμού του εδάφους στον νομό Χαλκιδικής. Από την ανάλυση του χάρτη διαπιστώνεται ότι οι προσανατολισμοί κατανέμονται σχετικά ομοιόμορφα στον χώρο, χωρίς να εντοπίζεται κάποιο κυρίαρχο ή συστηματικό γεωγραφικό πρότυπο κατανομής.

Χάρτης 4. Έκθεση εδάφους του Νομού Χαλκιδικής



Η σχετική ισοκατανομή των προσανατολισμών επιβεβαιώνεται και από τα δεδομένα του Πίνακα 3, σύμφωνα με τα οποία οι περισσότερες κατηγορίες καταλαμβάνουν περίπου το 10% της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης. Ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι οι νότιου προσανατολισμού εκτάσεις, οι οποίες συνδέονται με αυξημένο

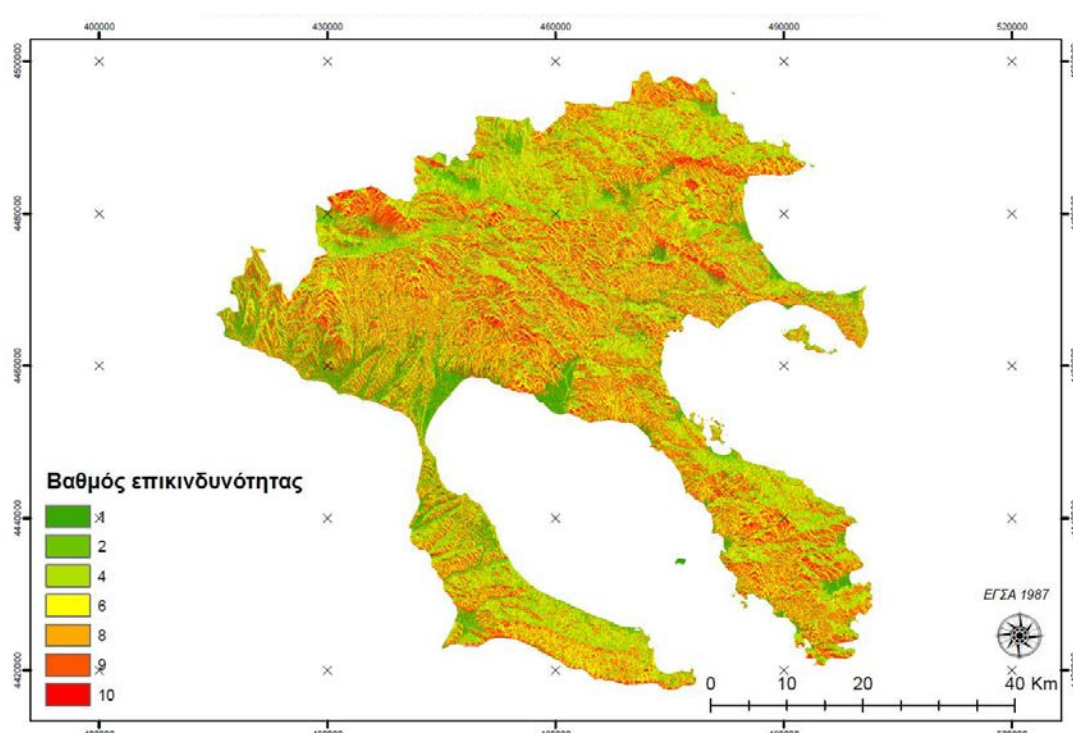
βαθμό πυροκινδυνότητας, αντιστοιχούν συνολικά σε ποσοστό περίπου 37% της περιοχής.

Πίνακας 3. Έκταση κατευθύνσεων προσανατολισμού εδάφους

Προσανατολισμός εδάφους	Έκταση (Ha)	%	Εύρος μοιρών
Επίπεδο έδαφος	27214	9%	0
Βόρειος	26086	9%	0 – 22,5
Βορειοανατολικός	33796	12%	22,5 – 67,5 και 337,5 - 360
Ανατολικός	33150	11%	67,5 – 112,5
Νοτιοανατολικός	35225	12%	112,5 – 157,5
Νότιος	32366	11%	157,5 – 202,5
Νοτιοδυτικός	41217	14%	202,5 – 247,5
Δυτικός	32460	11%	247,5 – 292,5
Βορειοδυτικός	29970	10%	292,5 – 337,5

Ο βαθμός επικινδυνότητας βάσει της έκθεσης του εδάφους εμφανίζεται αυξημένος κυρίως στο νότιο, νοτιοανατολικό, νοτιοδυτικό και κεντρικό τμήμα της Χαλκιδικής, όπου κυριαρχούν οι εκτάσεις με αντίστοιχους προσανατολισμούς, οι οποίοι απορροφούν μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας (Χάρτης 5). Αντίθετα, περιοχές με βόρειο ή βορειοδυτικό προσανατολισμό, όπως τμήματα του πρώτου «ποδίου» και της βόρειας ενδοχώρας, παρουσιάζουν χαμηλότερη επικινδυνότητα. Συνολικά, η επικινδυνότητα είναι αυξημένη στις νότιες έκθεσης πλαγιές, γεγονός που ευθυγραμμίζεται με τη γενική βιβλιογραφική παραδοχή για τις Μεσογειακές περιοχές.

Χάρτης 5. Επικινδυνότητα με βάση την έκθεση εδάφους στον Νομό Χαλκιδικής



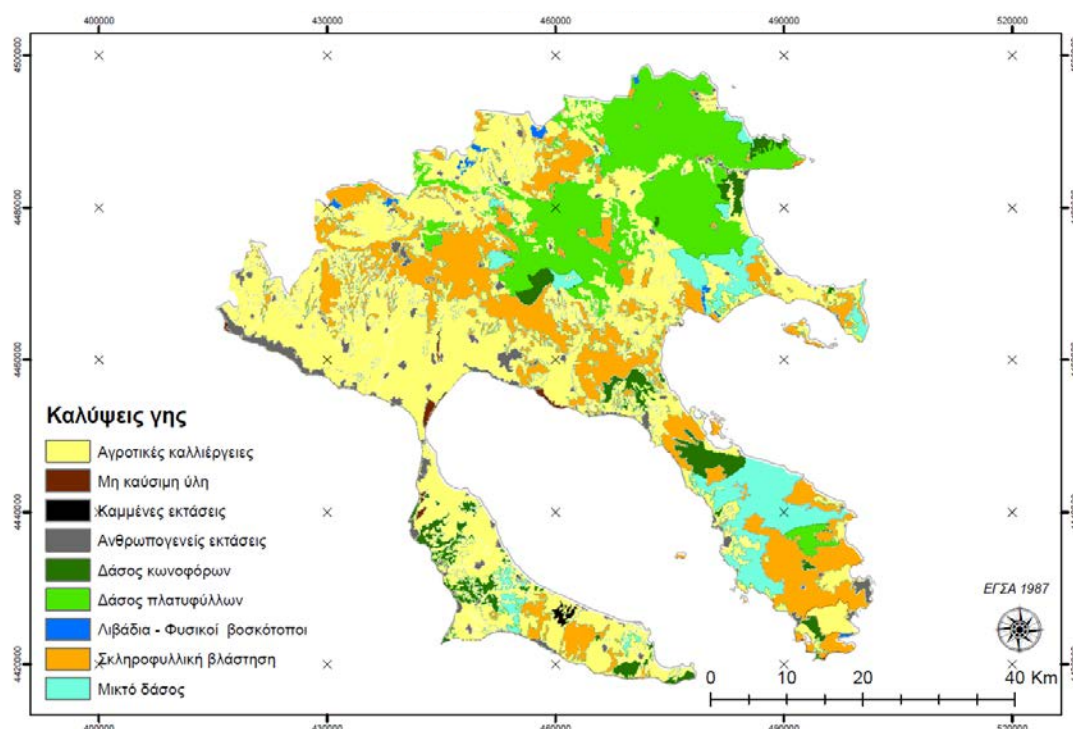
Η επικρατέστερη κάλυψη γης στο σύνολο της περιοχής αποτελείται από αγροτικές καλλιέργειες (κίτρινο χρώμα), οι οποίες καταλαμβάνουν εκτεταμένες ζώνες κυρίως στα παράκτια και πεδινά τμήματα του νομού, ιδίως στα βόρεια, δυτικά και νοτιοανατολικά (Χάρτης 6).

Στο κεντρικό και βορειοανατολικό τμήμα του νομού δεσπόζουν δάση κωνοφόρων (έντονο πράσινο) και δάση πλατύφυλλων (λαχανί), ενώ στο νότιο και ανατολικό άκρο του δεύτερου χερσαίου σχηματισμού απαντώνται μικτά δάση και περιοχές με σκληροφυλλική βλάστηση (γαλάζιο και πορτοκαλί χρώμα αντίστοιχα).

Οι ανθρωπογενείς εκτάσεις (γκρι), που περιλαμβάνουν αστικούς και οικιστικούς σχηματισμούς, είναι χωρικά διάσπαρτες με μεγαλύτερη πυκνότητα κατά μήκος των παράκτιων περιοχών, καθώς και στα σημεία σύνδεσης της ενδοχώρας με τους τρεις κύριους χερσαίους σχηματισμούς της Χαλκιδικής (Κασσάνδρα, Σιθωνία και Άθως).

Καμένες εκτάσεις (σκούρο καφέ) εμφανίζονται σε επιμέρους περιοχές, κυρίως στο εσωτερικό του πρώτου και δεύτερου «ποδιού», ενώ λιβάδια και φυσικοί βοσκότοποι (γαλάζιο) είναι ορατά σε αποσπασματικές ζώνες στη νοτιοκεντρική Χαλκιδική.

Χάρτης 6. Καλύψεις γης του Νομού Χαλκιδικής

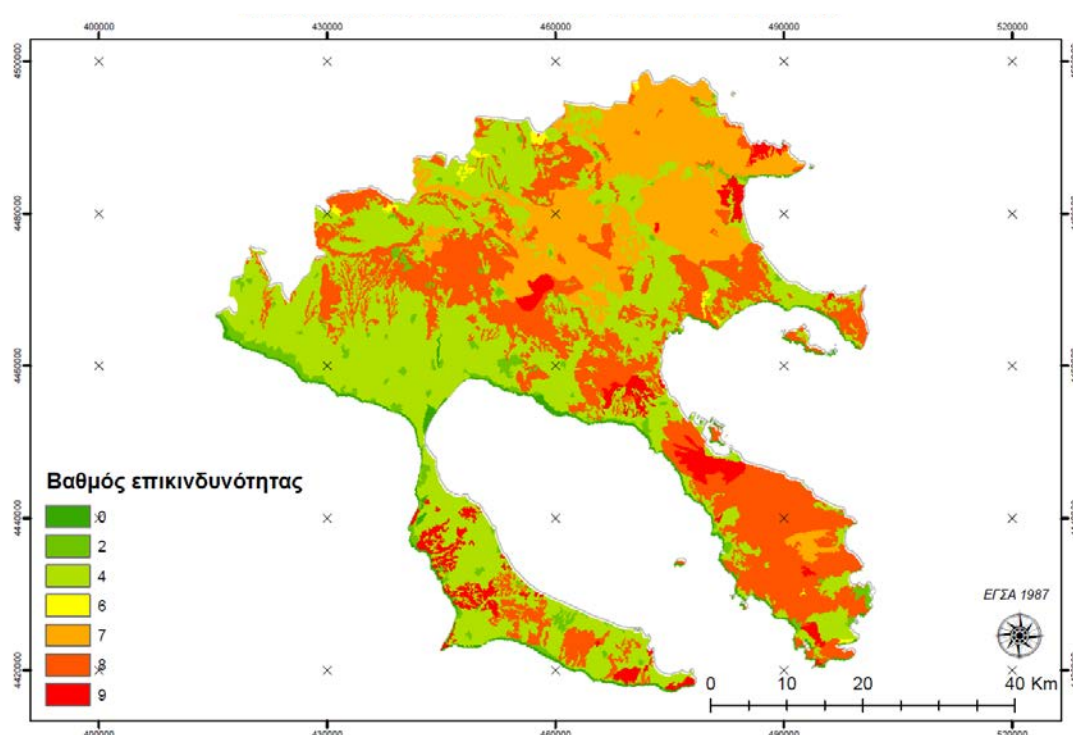


Οι υψηλότερες τιμές επικινδυνότητας (κόκκινο και πορτοκαλί) εντοπίζονται στον κεντρικό, ανατολικό και νότιο τομέα του νομού, καθώς και σε εκτεταμένες περιοχές των δύο χερσαίων σχηματισμών (ιδίως στη Σιθωνία και στο νότιο άκρο της Κασσάνδρας) (Χάρτης 7). Οι περιοχές αυτές αντιστοιχούν κυρίως σε εκτάσεις με πυκνή και εύφλεκτη φυσική βλάστηση, όπως δάση κωνοφόρων, μικτά δάση και σκληροφυλλική βλάστηση, τα οποία παρουσιάζουν υψηλό δυναμικό ανάφλεξης και έντονη δυναμική εξάπλωσης της φωτιάς.

Αντίθετα, οι χαμηλότερες τιμές επικινδυνότητας (ανοιχτό πράσινο και πράσινο) εμφανίζονται στα δυτικά και βορειοδυτικά παράκτια τμήματα, όπου κυριαρχούν αγροτικές καλλιέργειες και λιγότερο εύφλεκτες χρήσεις, αλλά και περιοχές μη καύσιμης ύλης ή βοσκότοποι, που προσδίδουν στον χώρο έναν πιο ήπιο πυρολογικό χαρακτήρα.

Η χωρική ετερογένεια της επικινδυνότητας αντικατοπτρίζει τον ρόλο που διαδραματίζουν οι τύποι βλάστησης και η πυκνότητα καύσιμης ύλης στη διαμόρφωση του πυροκινδύνου, στοιχείο που τεκμηριώνεται και από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Χάρτης 7. Επικινδυνότητα με βάση τις καλύψεις γης στον Νομό Χαλκιδικής

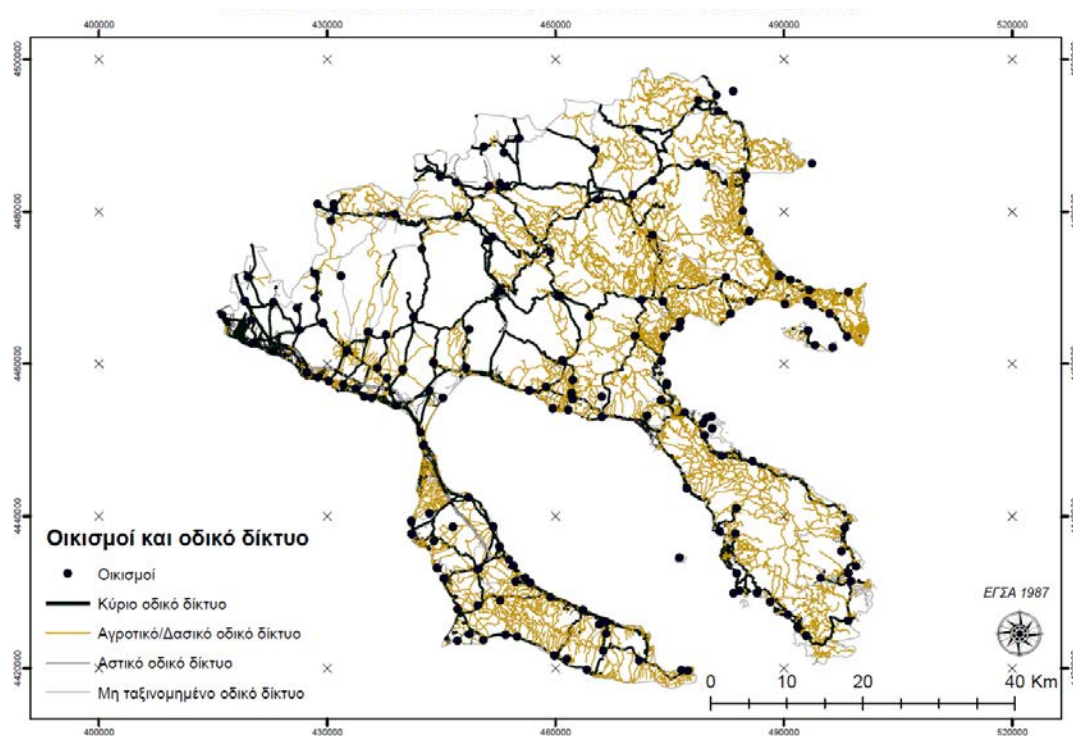


4.2. Ανθρωπογενείς παράγοντες επιρροής και διάδοσης πυρκαγιών και εκτίμηση της επικινδυνότητας

Το οικιστικό και το οδικό δίκτυο συνιστούν δύο βασικούς ανθρωπογενείς παράγοντες που σχετίζονται με την πιθανότητα εκδήλωσης δασικών πυρκαγιών (Χάρτης 8). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά μήκος αυτών των γραμμικών δομών – ανεξαρτήτως τύπου δρόμου – μπορούν να προκύψουν ποικίλα περιστατικά, είτε από αμέλεια είτε εσκεμμένα (εμπρησμοί), καθώς τα σημεία αυτά προσφέρουν υψηλή προσβασιμότητα.

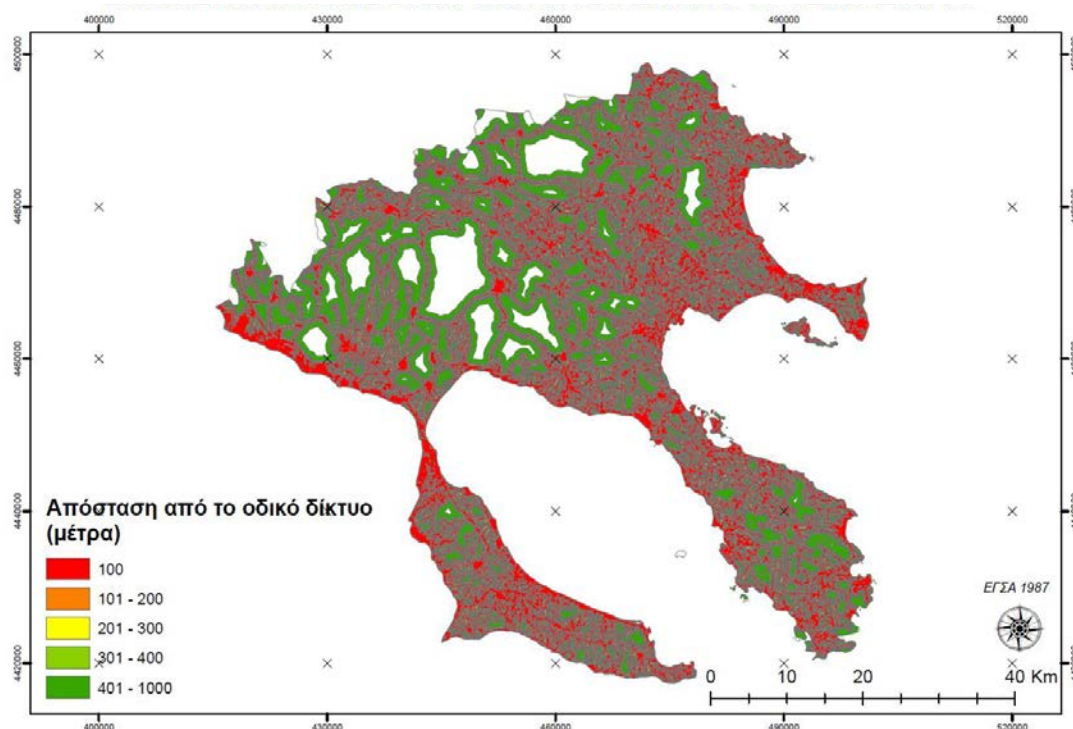
Επιπλέον, οι περιοχές διεπαφής μεταξύ δασικών και αστικών ζωνών φιλοξενούν έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως γεωργικές και βιομηχανικές χρήσεις, οι οποίες αυξάνουν τον κίνδυνο τυχαίων ή ακούσιων συμβάντων πυρκαγιάς. Η επέκταση τέτοιων πυρκαγιών προς κατοικημένες περιοχές μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις τόσο στον πληθυσμό όσο και σε ευαίσθητα στοιχεία του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος, όπως προστατευόμενες περιοχές υψηλής οικολογικής αξίας, σπάνια οικοσυστήματα, κατοικίες, κρίσιμες υποδομές και ιστορικοί χώροι (Sakellariou et al., 2018).

Χάρτης 8. Οικισμοί και οδικό δίκτυο του Νομού Χαλκιδικής



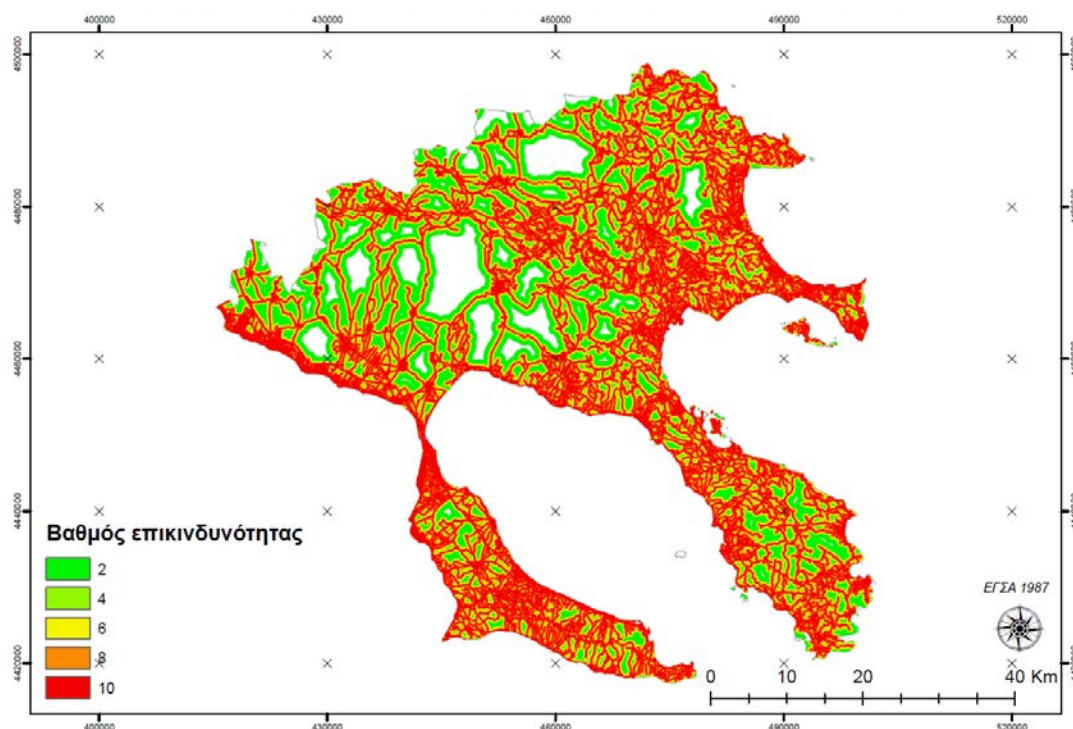
Στο πλαίσιο αυτό, η μεθοδολογική προσέγγιση περιλαμβάνει την οριοθέτηση διακριτών χωρικών ζωνών σε σχέση με το οδικό δίκτυο, εφαρμόζοντας «ζωνοποίηση» ανά 100 μέτρα (Χάρτης 9). Η λογική πίσω από αυτή την επιλογή βασίζεται στην παραδοχή ότι οι περιοχές που βρίσκονται σε άμεση επαφή με τους δρόμους —δηλαδή εντός της πρώτης ζώνης των 100 μέτρων— παρουσιάζουν τον υψηλότερο βαθμό πυροκινδυνότητας. Αντίθετα, όσο απομακρυνόμαστε από το οδικό δίκτυο, η επικινδυνότητα μειώνεται σταδιακά, έως και τη ζώνη των 1000 μέτρων, γεγονός που συνδέεται με τη μείωση της προσβασιμότητας και της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Χάρτης 9. Απόσταση από το οδικό δίκτυο στον Νομό Χαλκιδικής



Ο υψηλότερος βαθμός επικινδυνότητας λόγω εγγύτητας με το οδικό δίκτυο εντοπίζεται κατά μήκος σχεδόν του συνόλου των οδικών αξόνων της Χαλκιδικής, κυρίως εντός της πρώτης ζώνης των 100 μέτρων, η οποία εμφανίζεται έντονα με κόκκινο χρώμα στον χάρτη (Χάρτης 10). Η πυκνότητα και η έκταση αυτών των ζωνών είναι ιδιαίτερα εμφανής στο δυτικό και νότιο τμήμα του νομού, καθώς και στα παράκτια και ημιορεινά σημεία. Η επικινδυνότητα μειώνεται σταδιακά σε περιοχές που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από τους δρόμους, ειδικά μετά τα 400 μέτρα, όπου οι περιοχές καταγράφονται με πολύ χαμηλές τιμές κινδύνου (πράσινες αποχρώσεις).

Χάρτης 10. Επικινδυνότητα με βάση την απόσταση από το οδικό δίκτυο στον Νομό Χαλκιδικής

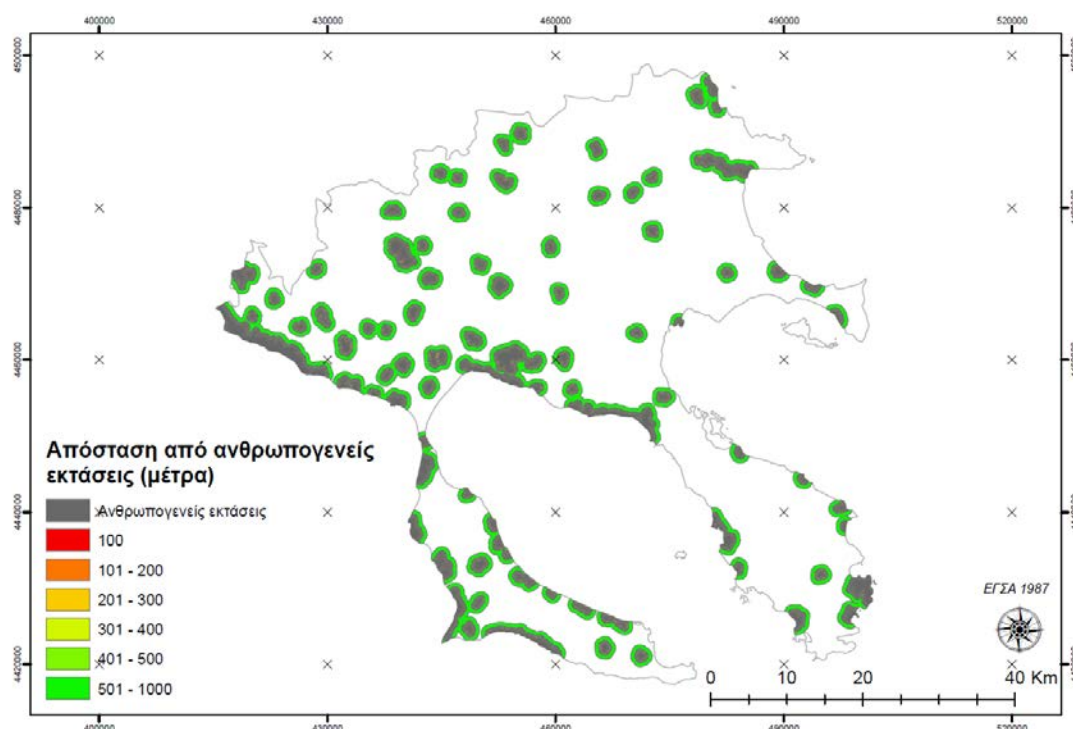


Το τελευταίο κριτήριο που ενσωματώνεται στην παρούσα μεθοδολογική προσέγγιση για την κατασκευή του ενιαίου χάρτη πυροκινδυνότητας αφορά την απόσταση από αστικούς σχηματισμούς και μικρούς οικισμούς (Suryabhagavan, 2016). Η συγκεκριμένη παράμετρος θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς πολλές πυρκαγιές εκδηλώνονται στις ζώνες διεπαφής μεταξύ δασικών και κατοικημένων περιοχών, γνωστές ως Wildland-Urban Interface (WUI) (Narayanaraj and Wimberly, 2012).

Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι αντίστοιχη με εκείνη που εφαρμόστηκε για το οδικό δίκτυο, με τη διαφορά ότι εδώ οι οικισμοί αποτελούν πολυγωνικά και όχι γραμμικά δεδομένα. Οι ζώνες επιρροής γύρω από τους οικισμούς καθορίστηκαν σε διαστήματα των 1.000 μέτρων, λαμβάνοντας υπόψη τη γενικά αυξημένη προσβασιμότητα και παρουσία ανθρώπινης δραστηριότητας στις περιφερειακές ζώνες των κατοικημένων περιοχών (Χάρτης 11).

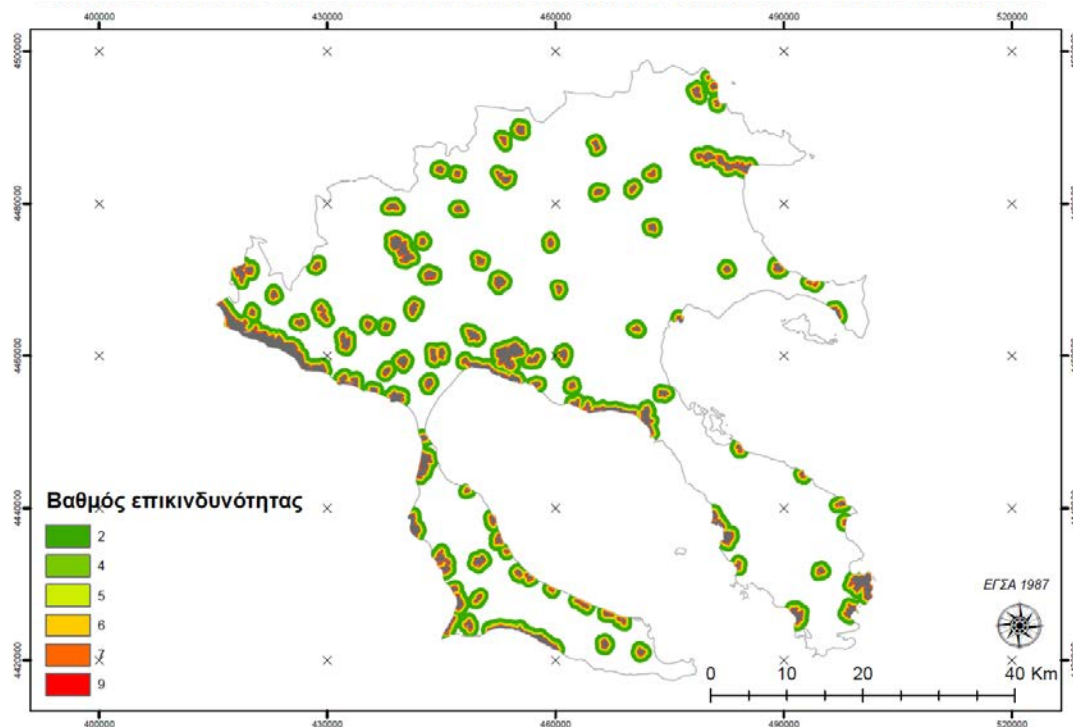
Η μέγιστη ακτίνα επιρροής ορίστηκε στα 4 χιλιόμετρα, καθώς πέραν του ορίου αυτού, η επίδραση της εγγύτητας σε οικισμούς θεωρείται περιορισμένη ή ακόμη και αμελητέα. Επιπλέον, για αποστάσεις μεγαλύτερες από 4 χιλιόμετρα, η κινητικότητα εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από το οδικό δίκτυο, του οποίου ο ρόλος έχει ήδη αξιολογηθεί και ενσωματωθεί στην ανάλυση σε προηγούμενο στάδιο.

Χάρτης 11. Απόσταση από ανθρωπογενείς εκτάσεις στον Νομό Χαλκιδικής



Η μεγαλύτερη επικινδυνότητα βάσει της εγγύτητας σε ανθρωπογενείς εκτάσεις (οικισμούς και δομημένες περιοχές) εντοπίζεται στις άμεσες περιμετρικές ζώνες αυτών των σχηματισμών, κυρίως εντός της πρώτης ζώνης των 100 μέτρων (Χάρτης 12). Οι περιοχές αυτές εμφανίζονται έντονα με κόκκινες και πορτοκαλί αποχρώσεις, επιβεβαιώνοντας τη βιβλιογραφικά τεκμηριωμένη αυξημένη επικινδυνότητα του φαινομένου στη ζώνη Wildland-Urban Interface. Η πυκνότητα τέτοιων υψηλού κινδύνου ζωνών είναι μεγαλύτερη κατά μήκος των παραλιακών περιοχών και της νότιας Χαλκιδικής, όπου η ανθρώπινη παρουσία είναι εντονότερη. Αντίθετα, όσο αυξάνεται η απόσταση από τους οικισμούς, ιδιαίτερα πέραν των 400–500 μέτρων, η επικινδυνότητα μειώνεται αισθητά.

Χάρτης 12. Επικινδυνότητα με βάση την απόσταση από το οδικό δίκτυο στον Νομό Χαλκιδικής



4.3. Ενιαίος χάρτης επικινδυνότητας βάσει πολυκριτηριακής ανάλυσης

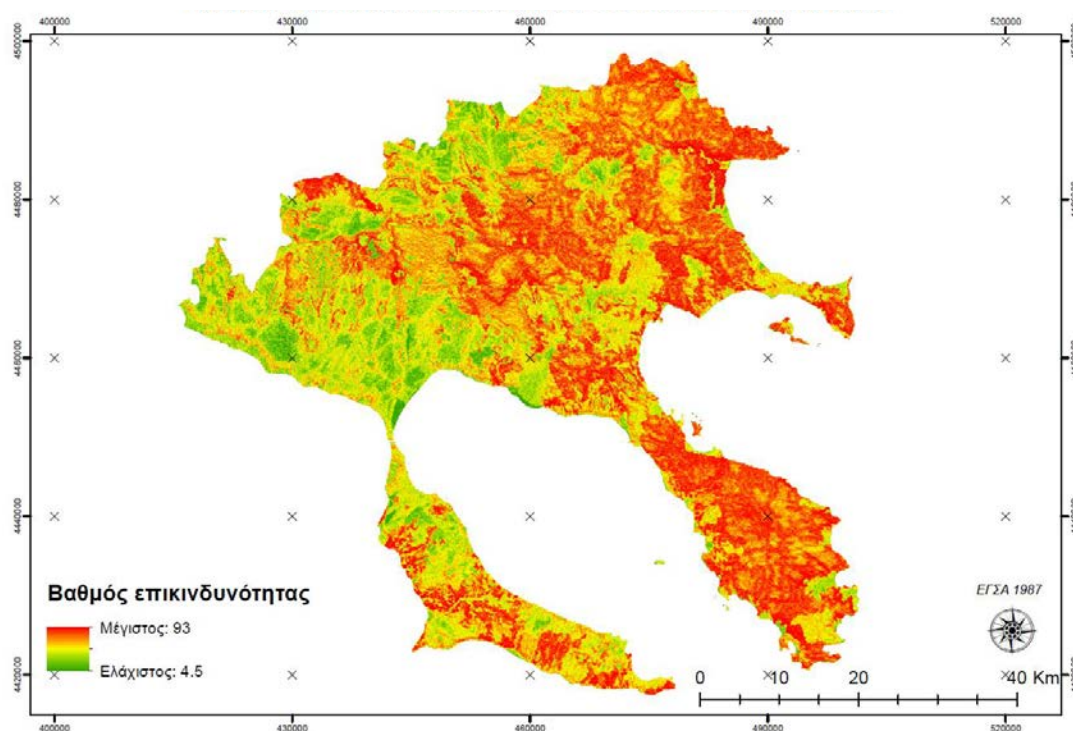
Το τελικό προϊόν της παρούσας μεθοδολογικής προσέγγισης είναι ο ενιαίος, συνδυαστικός χάρτης εκτίμησης πυροκινδυνότητας, ο οποίος βασίζεται στα τοπικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής. Συνοψίζοντας, οι παράγοντες που συνεκτιμώνται και συμβάλλουν στον καθορισμό της επικινδυνότητας είναι: η χρήση και κάλυψη γης, η κλίση και ο προσανατολισμός του εδάφους, καθώς και η εγγύτητα προς το οδικό δίκτυο και προς υφιστάμενους οικισμούς.

Μετά την απόδοση ειδικών βαρών σε κάθε έναν από αυτούς τους παράγοντες, παράγεται ο τελικός θεματικός χάρτης επικινδυνότητας, η διαδικασία σύνθεσης του οποίου περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια.

Αξίζει να διευκρινιστεί ότι η εκτίμηση επικινδυνότητας περιορίζεται, σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης, αποκλειστικά σε παράγοντες επιφανείας. Παρότι οι μετεωρολογικές συνθήκες αποτελούν καθοριστική μεταβλητή για την εκδήλωση και εξέλιξη των πυρκαγιών, δεν εξετάζονται στο πλαίσιο της συγκεκριμένης ενότητας.

Τέλος, κεντρικό μεθοδολογικό εργαλείο της προσέγγισης αποτελεί η πολυκριτηριακή ανάλυση (Multi-Criteria Decision Analysis – MCDA), η οποία υποστηρίζεται από τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS), επιτρέποντας μια συστηματική και τεκμηριωμένη διερεύνηση της πυροκινδυνότητας με στόχο την υποστήριξη της βέλτιστης λήψης αποφάσεων.

Χάρτης 13. Επικινδυνότητα πυρκαγιών στον Νομό Χαλκιδικής



Ο συνολικός χάρτης επικινδυνότητας πυρκαγιάς αποτυπώνει σημαντική χωρική διαφοροποίηση στον νομό Χαλκιδικής, με τιμές που κυμαίνονται από 4,5 έως 93 σε κλίμακα 0–100 (Χάρτης 13). Οι περιοχές υψηλής επικινδυνότητας (αποχρώσεις κόκκινου) εντοπίζονται κυρίως:

- Στα κεντρικά και ανατολικά ημιορεινά τμήματα του νομού, όπου συγκλίνουν απότομη κλίση, νότιος προσανατολισμός και πυκνή καύσιμη ύλη (δάση κωνοφόρων, σκληροφυλλική βλάστηση).
- Στη Σιθωνία και το νότιο τμήμα της Κασσάνδρας, λόγω της συνύπαρξης εύφλεκτης βλάστησης, εγγύτητας σε παραθεριστικούς οικισμούς και έντονης οδικής ανάπτυξης.
- Σε ζώνες διεπαφής δασών με κατοικημένες ή γεωργικές εκτάσεις, όπου η ανθρωπογενής δραστηριότητα αυξάνει τον κίνδυνο ανάφλεξης.

Αντίθετα, χαμηλότερη επικινδυνότητα (πράσινες αποχρώσεις) παρατηρείται:

- Στα βορειοδυτικά και δυτικά παράκτια τμήματα του νομού, όπου επικρατούν αγροτικές καλλιέργειες, ήπιες κλίσεις και λιγότερη καύσιμη ύλη.
- Σε ορισμένες απομονωμένες ζώνες της ενδοχώρας με χαμηλή προσβασιμότητα και μικρότερη ανθρώπινη επίδραση.

Η κατανομή αυτή επιβεβαιώνει τη χωρική συνθετότητα του πυροκινδύνου, με τις επικίνδυνες περιοχές να συγκεντρώνονται εκεί όπου συνυπάρχουν «αρνητικές» γεωφυσικές και ανθρωπογενείς μεταβλητές. Ο χάρτης αυτός μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο χωρικής ιεράρχησης προτεραιοτήτων για προληπτικά μέτρα και κατασταλτικές παρεμβάσεις, καθώς και βάση για την ορθολογική κατανομή πόρων.

Πιο αναλυτικά και με βάση τον Πίνακα 4, η ποσοτική ανάλυση της τελικής κατανομής των ζωνών πυροκινδυνότητας αποτυπώνεται στον πίνακα που ακολουθεί, ο οποίος παρουσιάζει την έκταση (σε εκτάρια) και το ποσοστό κάλυψης κάθε ζώνης σε σχέση με το σύνολο της περιοχής μελέτης. Παρατηρείται ότι η πλειονότητα της επιφάνειας εντάσσεται σε μεσαία επίπεδα επικινδυνότητας. Συγκεκριμένα, η ζώνη 40–60 μονάδων καταλαμβάνει τη μεγαλύτερη έκταση με 142.784 εκτάρια, ποσοστό που αντιστοιχεί σε 50,15% του συνολικού εδάφους. Ακολουθεί η ζώνη 60–80 μονάδων, η οποία καλύπτει 80.676 εκτάρια ή 28,33% της περιοχής.

Οι χαμηλές επικινδυνότητες (4,5–20 και 20–40 μονάδες) καταλαμβάνουν συνολικά περίπου 21,29%, με τη ζώνη 20–40 να παρουσιάζει σημαντική έκταση (59.736 εκτάρια – 20,98%), ενώ οι πολύ χαμηλές τιμές (κάτω από 20 μονάδες) καταλαμβάνουν μόλις 0,31% της περιοχής, γεγονός που υποδηλώνει ότι η πλήρης απουσία κινδύνου είναι εξαιρετικά περιορισμένη.

Τέλος, περιορισμένη είναι και η κάλυψη της ζώνης πολύ υψηλής επικινδυνότητας (80–93 μονάδες), η οποία αφορά μόλις 648 εκτάρια, δηλαδή 0,23% της συνολικής έκτασης. Παρά το μικρό ποσοστό, οι περιοχές αυτές απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή, καθώς συγκεντρώνουν συνθήκες έντονης ευφλεκτότητας και δυσχερούς πρόσβασης.

Συνολικά, η κατανομή αυτή καταδεικνύει ότι η μεγάλη πλειονότητα του εδάφους κατατάσσεται σε ενδιάμεσες ή αυξημένες τιμές πυροκινδυνότητας, επιβεβαιώνοντας την ανάγκη στοχευμένων παρεμβάσεων πρόληψης και διαχείρισης, ιδίως στις ζώνες 40–80 μονάδων που συγκεντρώνουν σχεδόν το 79% της συνολικής έκτασης.

Πίνακας 4: Κατανομή της έκτασης της περιοχής μελέτης ανά ζώνη πυροκινδυνότητας

Ζώνη επικινδυνότητας	Βαθμός επικινδυνότητας	Έκταση (Ha)	%
4,5 - 20	Χαμηλός	889	0.31%
20 - 40	Μέτριος	59.736	20.98%
40 - 60	Υψηλός	142.784	50.15%
60 - 80	Πολύ υψηλός	80.676	28.33%
80 - 93	Εξαιρετικά υψηλός	648	0.23%

4.4. Περιορισμοί και μελλοντικές προοπτικές

Παρότι η παρούσα μελέτη παρείχε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο εκτίμησης πυροκινδυνότητας με βάση στατικούς παράγοντες επιφανείας, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που θα μπορούσαν να αποτελέσουν αφετηρία για μελλοντική βελτίωση της προσέγγισης.

Πρώτον, τα αποτελέσματα του τελικού χάρτη επικινδυνότητας δεν έχουν ακόμη επαληθευτεί (validated) σε σύγκριση με ιστορικά δεδομένα πυρκαγιών. Η συσχέτιση μεταξύ των επιπέδων εκτιμώμενου κινδύνου και των καταγεγραμμένων συμβάντων πυρκαγιάς (π.χ. για την περίοδο 2000–2023) θα μπορούσε να ενισχύσει τη βαθμονόμηση του μοντέλου και την αξιοπιστία του (Sakellariou et al., 2019).

Δεύτερον, η προσέγγιση επικεντρώθηκε αποκλειστικά σε στατικούς παράγοντες (όπως το ανάγλυφο και η κάλυψη γης), ενώ δεν ελήφθησαν υπόψη δυναμικές και κρίσιμες μεταβλητές όπως η θερμοκρασία, η ένταση και διεύθυνση του ανέμου ή η σχετική υγρασία. Η ενσωμάτωση τέτοιων μετεωρολογικών δεδομένων, είτε με τη μορφή εποχικών τιμών είτε μέσω πρόγνωσης καιρού, θα μπορούσε να καταστήσει τη χαρτογράφηση του κινδύνου πιο ρεαλιστική και χρονικά ευαίσθητη (Eugenio et al., 2016).

Επιπλέον, οι παραπάνω εισροές θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την προώθηση της μοντελοποίησης της εξάπλωσης των πυρκαγιών, μέσω εξειδικευμένων προσομοιωτικών εργαλείων (όπως το Burn-P3, FlamMap, FARSITE κ.ά.), προσδίδοντας μεγαλύτερη ακρίβεια και επιχειρησιακή αξία στο τελικό προϊόν (Sakellariou et al., 2020).

Τέλος, η χαρτογράφηση σε υψηλότερη ανάλυση (fine scale resolution) θα μπορούσε να προσφέρει μεγαλύτερη λεπτομέρεια στον εντοπισμό των επικίνδυνων περιοχών, ιδίως σε τοπικές ζώνες διεπαφής ανθρώπινης δραστηριότητας και φυσικού περιβάλλοντος. Η χρήση δορυφορικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης ή drone imagery μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά προς αυτή την κατεύθυνση.

Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εστιάσει τόσο στην τεχνική ενίσχυση του μοντέλου όσο και στη δοκιμή της εφαρμογής του σε περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά, ώστε να διερευνηθεί η δυνατότητα γενίκευσης και επαναχρησιμοποίησής του σε ευρύτερη γεωγραφική κλίμακα.

4.5. Προτάσεις πολιτικής

Με βάση τα ευρήματα της παρούσας εργασίας και τη χωρική αποτύπωση της πυροκινδυνότητας στον νομό Χαλκιδικής, προκύπτει η ανάγκη ενίσχυσης της πρόληψης μέσα από στοχευμένα και ρεαλιστικά μέτρα πολιτικής. Οι παρακάτω προτάσεις μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της ετοιμότητας και της αποτελεσματικής διαχείρισης του φαινομένου των δασικών πυρκαγιών:

- **Εναισθητοποίηση και κοινωνική συναίνεση:** Είναι απαραίτητο να προωθηθεί η καλλιέργεια περιβαλλοντικής συνείδησης και η ενημέρωση της κοινής γνώμης σχετικά με την ανάγκη προστασίας των δασικών οικοσυστημάτων. Η ευρεία αξιοποίηση των μέσων μαζικής ενημέρωσης και των κοινωνικών δικτύων μπορεί να υποστηρίξει αυτή την προσπάθεια, ιδιαίτερα κατά την αντιπυρική περίοδο.
- **Εκπαιδευτικές δράσεις και βιωματική μάθηση:** Η διοργάνωση εκπαιδευτικών εκστρατειών σε σχολεία, τοπικές κοινότητες και εθελοντικούς φορείς μπορεί να ενισχύσει την ετοιμότητα και να μειώσει την πιθανότητα ακούσιας πρόκλησης πυρκαγιών.
- **Βελτιστοποίηση των υποδομών πρόληψης:** Η χωροθέτηση παρατηρητηρίων στις περιοχές υψηλής επικινδυνότητας κρίνεται σημαντική για την έγκαιρη ανίχνευση πυρκαγιών. Η χρήση γεωχωρικών εργαλείων μπορεί να υποστηρίξει τη στρατηγική τοποθέτηση τέτοιων υποδομών (Sakellariou et al., 2017).

- **Ορθολογική διαχείριση της καύσιμης ύλης:** Σε περιοχές με έντονη παρουσία εύφλεκτης βλάστησης, απαιτούνται προληπτικές παρεμβάσεις, όπως καθαρισμοί, αραίωση της βλάστησης ή δημιουργία αντιπυρικών ζωνών, με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον (Σακελλαρίου, 2021).
- **Χωρική κατανομή πυροσβεστικών δυνάμεων:** Η αξιοποίηση χαρτών επικινδυνότητας μπορεί να διευκολύνει την ορθολογική ανακατανομή προσωπικού και μέσων. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα ενίσχυσης των περιοχών που εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαλωτότητα, με ταυτόχρονη μείωση δυνάμεων σε περιοχές χαμηλότερου κινδύνου (Sakellariou et al., 2020b).
- **Περιοριστικά μέτρα πρόσβασης:** Σε περιόδους που προβλέπονται ακραία καιρικά φαινόμενα (π.χ. υψηλές θερμοκρασίες, έντονοι άνεμοι), μπορεί να εφαρμοστεί προσωρινός περιορισμός της πρόσβασης σε ευαίσθητες δασικές περιοχές, ώστε να μειωθεί η πιθανότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς.

Οι παραπάνω προτάσεις δεν απαιτούν απαραίτητα υψηλό κόστος ή τεχνολογική καινοτομία, αλλά προϋποθέτουν συνεργασία των εμπλεκόμενων φορέων και συνέργειες μεταξύ πολιτείας, αυτοδιοίκησης και τοπικής κοινωνίας. Μέσα από συντονισμένες παρεμβάσεις, είναι δυνατόν να μειωθεί ο κίνδυνος εκδήλωσης καταστροφικών πυρκαγιών και να ενισχυθεί η ανθεκτικότητα των φυσικών και ανθρωπογενών συστημάτων της Χαλκιδικής.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία ανέπτυξε ένα ολοκληρωμένο σύστημα εκτίμησης πυροκινδυνότητας στον νομό Χαλκιδικής, βασισμένο στη μεθοδολογία της πολυκριτηριακής ανάλυσης (MCDA) και την αξιοποίηση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS). Η ανάλυση στηρίχθηκε στη συνεκτίμηση πέντε κρίσιμων παραμέτρων επιφανείας: της καύσιμης ύλης (μέσω των καλύψεων γης), της κλίσης και του προσανατολισμού του εδάφους, καθώς και της εγγύτητας τόσο στο οδικό δίκτυο όσο και στους ανθρωπογενείς οικισμούς.

Η διαδικασία στάθμισης των παραμέτρων πραγματοποιήθηκε με βάση βιβλιογραφικές αναφορές και τις τοπικές ιδιαιτερότητες της περιοχής μελέτης, αποδίδοντας μεγαλύτερη βαρύτητα στις καλύψεις γης, οι οποίες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την

ευφλεκτότητα και την ένταση των πυρκαγιών. Η χωρική επίδραση κάθε παράγοντα αποτυπώθηκε σε αντίστοιχους θεματικούς χάρτες και ενσωματώθηκε στον τελικό ενιαίο χάρτη επικινδυνότητας μέσω άλγεβρας χαρτών.

Η χωρική ανάλυση του τελικού χάρτη ανέδειξε σαφείς διακυμάνσεις του κινδύνου εντός του νομού. Οι περιοχές υψηλής επικινδυνότητας συγκεντρώνονται κυρίως στην ενδοχώρα και σε ορεινές και ημιορεινές ζώνες, καθώς και σε τμήματα των χερσαίων σχηματισμών – ιδίως της Σιθωνίας – όπου συνυπάρχουν απότομο ανάγλυφο, νότιος προσανατολισμός και πυκνή φυσική βλάστηση. Επιπλέον, η εγγύτητα σε ανθρωπογενείς υποδομές και δραστηριότητες (οικισμοί, δρόμοι) αποδείχθηκε κρίσιμος παράγοντας εκκίνησης πυρκαγιών, ιδίως σε περιοχές διεπαφής δασών και οικισμών. Αντίθετα, περιοχές με αγροτική χρήση, ήπιες κλίσεις και βόρειο προσανατολισμό παρουσίασαν σαφώς χαμηλότερα επίπεδα επικινδυνότητας.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας ανέδειξε την αξία της πολυκριτηριακής προσέγγισης για τη χαρτογραφική ιεράρχηση του κινδύνου πυρκαγιάς και την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων στον τομέα της πρόληψης και της πολιτικής προστασίας. Ο χάρτης επικινδυνότητας που παρήχθη μπορεί να λειτουργήσει ως επιχειρησιακό εργαλείο για τις δασικές υπηρεσίες, τους ΟΤΑ και τις αρχές πολιτικής προστασίας, τόσο για τον σχεδιασμό προληπτικών δράσεων όσο και για την κατανομή των πυροσβεστικών πόρων.

Ωστόσο, η μεθοδολογία παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς. Απουσιάζει η σύγκριση με ιστορικά δεδομένα πυρκαγιών, η οποία θα μπορούσε να λειτουργήσει ως εργαλείο επικύρωσης (validation) και να ενισχύσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, δεν έχουν ενσωματωθεί δυναμικές μεταβλητές όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και οι άνεμοι, παράγοντες κρίσιμοι για την καθημερινή μεταβλητότητα του κινδύνου και την προώθηση της μοντελοποίησης εξάπλωσης πυρκαγιών. Η ένταξη τέτοιων δεδομένων, όπως και η χαρτογράφηση σε υψηλότερη ανάλυση (fine scale resolution), αποτελούν σημαντικές προοπτικές για τη μελλοντική εξέλιξη του μοντέλου.

Παράλληλα, η εργασία ανέδειξε μια σειρά από στοχευμένες προτάσεις πολιτικής, όπως η ανάγκη ενίσχυσης της περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης του πληθυσμού, η χωρική βελτιστοποίηση της θέσης παρατηρητηρίων και δυνάμεων πυρόσβεσης, η διαχείριση της καύσιμης ύλης σε περιοχές υψηλού κινδύνου και η εφαρμογή περιοριστικών

μέτρων πρόσβασης κατά τη διάρκεια ακραίων καιρικών συνθηκών. Η αξιοποίηση του παραγόμενου χάρτη επικινδυνότητας ως εργαλείο λήψης αποφάσεων μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση του κινδύνου εκδήλωσης μεγάλων δασικών πυρκαγιών και στην ενίσχυση της χωρικής ανθεκτικότητας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ager AA., Preisler HK., Arca B., Spano D., and Salis M. 2014. Wildfire risk estimation in the Mediterranean area. *Environmetrics. Special Issue: Wildland Fires*. 25 (6): 384–396
2. Amalina, P., Prasetyo, L. B., & Rushayati, S. B. (2016). Forest Fire Vulnerability Mapping in Way Kambas National Park. *Procedia Environmental Sciences*, 33, 239-252.
3. Butler, B. W., Anderson, W. R., & Catchpole, E. A. (2007). Influence of slope on fire spread rate. In In: Butler, Bret W.; Cook, Wayne, comps. *The fire environment--innovations, management, and policy; conference proceedings*. 26-30 March 2007; Destin, FL. *Proceedings RMRS-P-46CD*. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. CD-ROM. p. 75-82 (Vol. 46).
4. Durán-Medraño, R., Varela, E., Garza-Gil, D., Prada, A., Vázquez, M. X., and Soliño, M. (2017). Valuation of terrestrial and marine biodiversity losses caused by forest wildfires. *Journal of Behavioral and Experimental Economics*, 71, 88-95.
5. Eugenio, F. C., Dos Santos, A. R., Fiedler, N. C., Ribeiro, G. A., da Silva, A. G., Dos Santos, Á. B., ... & Schettino, V. R. (2016). Applying GIS to develop a model for forest fire risk: a case study in Espírito Santo, Brazil. *Journal of environmental management*, 173, 65-71.
6. Gai, C., Weng, W., & Yuan, H. (2011, April). GIS-based forest fire risk assessment and mapping. In 2011 Fourth international joint conference on computational sciences and optimization (pp. 1240-1244). IEEE.
7. Kant Sharma, L., Kanga, S., Singh Nathawat, M., Sinha, S., & Chandra Pandey, P. (2012). Fuzzy AHP for forest fire risk modeling. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 21(2), 160-171.

8. Kim, Y., Knowles, S., Manley, J., and Radoias, V. (2017). Long-run health consequences of air pollution: Evidence from Indonesia's forest fires of 1997. *Economics & Human Biology*, 26, 186-198.
9. Mateus, P., and Fernandes, P. M. (2014). Forest fires in Portugal: dynamics, causes and policies. In *Forest Context and Policies in Portugal* (pp. 97-115). Springer, Cham.
10. Narayanaraj G. and Wimberly M.C., 2012. Influences of forest roads on the spatial patterns of human- and lightning-caused wildfire ignitions. *Applied Geography* 32: 878-888
11. Ozenen Kavlak, M., Cabuk, S. N., & Cetin, M. (2021). Development of forest fire risk map using geographical information systems and remote sensing capabilities: Ören case. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(25), 33265-33291.
12. Power C.J., 2006 A spatial decision support system for mapping bushfire hazard potential using remotely sensed data. In *Proceedings of Bushfire Conference 2006 - Life in a Fire-Prone Environment: Translating Science Into Practice*. Brisbane, 6–9 June 2006
13. Roberto Barbosa, M., Carlos Sicoli Seoane, J., Guimaraes Buratto, M., Santana de Oliveira Dias, L., Paulo Carvalho Raivel, J., & Lobos Martins, F. (2010). Forest Fire Alert System: a Geo Web GIS prioritization model considering land susceptibility and hotspots—a case study in the Carajás National Forest, Brazilian Amazon. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(6), 873-901.
14. Sakellariou S., Samara F., Tampekis S., Sfougaris A. and Christopoulou O., 2015. Targeting to an efficient prevention strategy of forest fires, estimating the fire hazard on islands. The case study of Thasos island, Greece. *International Journal of Advanced Engineering and Nanotechnology* 2(11): 27-32
15. Sakellariou, S., Parisien, M. A., Flannigan, M., Wang, X., de Groot, B., Tampekis, S., ... & Christopoulou, O. (2020). Spatial planning of fire-agency stations as a function of wildfire likelihood in Thasos, Greece. *Science of the total environment*, 729, 139004.
16. Sakellariou, S., Samara, F., Tampekis, S., Christopoulou, O., & Sfougaris, A. (2017). Optimal number and location of watchtowers for immediate detection

- of forest fires in a small island. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems (IJAEIS)*, 8(4), 1-19.
17. Sakellariou, S., Sfougaris, A., & Christopoulou, O. (2020b). Location planning of fire service fleet based on forest fire susceptibility. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 16, 643.
 18. Sakellariou, S., Sfougaris, A., Christopoulou, O., & Tampekis, S. (2022). Integrated wildfire risk assessment of natural and anthropogenic ecosystems based on simulation modeling and remotely sensed data fusion. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 78, 103129.
 19. Sakellariou, S., Tampekis, S., Samara, F., Flannigan, M., Jaeger, D., Christopoulou, O., & Sfougaris, A. (2019). Determination of fire risk to assist fire management for insular areas: the case of a small Greek island. *Journal of Forestry Research*, 30(2), 589-601.
 20. Sakellariou, S., Tampekis, S., Samara, F., Sfougaris, A., and Christopoulou, O. (2017a). Review of state-of-the-art decision support systems (DSSs) for prevention and suppression of forest fires. *Journal of Forestry Research*, 28(6), 1107-1117.
 21. Silveira, J. M., Louzada, J., Barlow, J., Andrade, R., Mestre, L., Solar, R., ... and Cochrane, M. A. (2016). A multi-taxa assessment of biodiversity change after single and recurrent wildfires in a Brazilian Amazon forest. *Biotropica*, 48(2), 170-180.
 22. Sivrikaya, F., Sağlam, B., Akay, A. E., & Bozali, N. (2014). Evaluation of forest fire risk with GIS. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(1).
 23. Suryabhadgavan K.V., Alemu M. and Balakrishnan M., 2016. GIS-based multi-criteria decision analysis for forest fire susceptibility mapping: a case study in Harenn forest, southwestern Ethiopia. *Tropical Ecology* 57(1): 33-43
 24. Thomas, D., Butry, D., Gilbert, S., Webb, D., and Fung, J. (2017). The costs and losses of wildfires. *NIST Special Publication*, 1215.
 25. Turco, M., Levin, N., Tessler, N., and Saaroni, H. (2017). Recent changes and relations among drought, vegetation and wildfires in the Eastern Mediterranean: The case of Israel. *Global and Planetary Change*, 151:28-35.
 26. Xu, R., Yu, P., Abramson, M. J., Johnston, F. H., Samet, J. M., Bell, M. L., ... and Guo, Y. (2020). Wildfires, global climate change, and human health. *New England Journal of Medicine*, 383(22): 2173-2181.

27. You, W., Lin, L., Wu, L., Ji, Z., Yu, J. A., Zhu, J., ... & He, D. (2017). Geographical information system-based forest fire risk assessment integrating national forest inventory data and analysis of its spatiotemporal variability. *Ecological Indicators*, 77, 176-184.
28. Yu, D., Liu, Y., Shi, P., and Wu, J. (2019). Projecting impacts of climate change on global terrestrial ecoregions. *Ecological Indicators*, 103: 114-123.
29. ΕΛ.ΣΤΑΤ, 2018. Ελληνική Στατιστική Αρχή. Διαθέσιμη από: <http://www.statistics.gr/2011-census-pop-hous>
30. Πυροσβεστικό Σώμα Ελλάδας (2018). Στοιχεία συμβάντων. Διαθέσιμη από: https://www.fireservice.gr/el_GR/stoicheia-symbanton
31. Σακελλαρίου, Σ. (2016). Σχεδιασμός και ανάπτυξη χωρικού συστήματος λήψης αποφάσεων για την πρόληψη και αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών. Η περίπτωση των δασικών πυρκαγιών στη Θάσο. Διδακτορική έρευνα. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
32. Σακελλαρίου, Σ. (2021). Εφαρμογή της ανάλυσης έκθεσης κινδύνου και επιπτώσεων (exposure and effect analysis) φυσικών καταστροφών εντός ενός ολοκληρωμένου πλαισίου διαχείρισης κινδύνου (risk analysis and assessment). Η περίπτωση των δασικών πυρκαγιών. Μεταδιδακτορική έρευνα. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
33. Σακελλαρίου, Σ. (2024). Ενίσχυση χωρικής ανθεκτικότητας των περιοχών διεπαφής αστικού-δασικού μετώπου στις δασικές πυρκαγιές. Βιβλίο: Χωρική ανθεκτικότητα: Εννοιολογικές προσεγγίσεις, πολιτικές, εφαρμογές. (pp. 147-166). Εκδόσεις Κλειδάριθμος.