ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΔΙΟΙΚΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ»

Ψηφιακή προσομοίωση και μοντελοποίηση της εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Φοιτητής: Μιχαήλ Φαρσάρης, 22
Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Παναγιωτάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής

©
2025

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΔΙΟΙΚΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ»

Ψηφιακή προσομοίωση και μοντελοποίηση της εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Παναγιωτάκης Κωνσταντίνος (Επιβλέπων)
Αναπληρωτής Καθηγητής, Διοικητικής Επιστήμης & Τεχνολογίας, ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.

Φανουργιάκης Ιωάννης
Επίκουρος Καθηγητής, Διοικητικής Επιστήμης & Τεχνολογίας, ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.

Βασιλειάδης Γεώργιος
Επίκουρος Καθηγητής, Διοικητικής Επιστήμης & Τεχνολογίας, ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.

HELLENIC MEDITERRANEAN UNIVERSITY
SCHOOL OF MANAGEMENT AND ECONOMICS SCIENCE
DEPARTMENT OF MANAGEMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY

MSc in
MANAGEMENT AND DIGITAL TRANSFORMATION

Digital simulation and modeling of forest fire spread

MASTER THESIS

Student : Michail Farsaris, 22
Supervisor :Konstantinos Panagiotakis, Associate Professor

©
2025

Υπεύθυνη Δήλωση *: Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στη διπλωματική εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η διπλωματική εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τις απαιτήσεις του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών Διοίκηση και Ψηφιακός Μετασχηματισμός του Τμήματος Διοικητικής Επιστήμης και Τεχνολογίας του ΕΛΜΕΠΑ.*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα, συχνά προκαλούμενο από φυσικούς παράγοντες, όπως οι κεραυνοί, αλλά και από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η αμέλεια, οι σκόπιμες εμπρηστικές ενέργειες, ή η ανεξέλεγκτη καύση απορριμμάτων. Οι συνέπειες τους είναι καταστροφικές, τόσο για το περιβάλλον όσο και για τον άνθρωπο. Η απώλεια δασών οδηγεί σε μείωση της βιοποικιλότητας, αποσταθεροποίηση των οικοσυστημάτων και επιτάχυνση της κλιματικής αλλαγής λόγω της απελευθέρωσης μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα. Παράλληλα, οι πυρκαγιές θέτουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές, προκαλούν υλικές ζημιές σε κατοικίες και υποδομές, ενώ η έκθεση στον καπνό και τους ρύπους επιβαρύνει σοβαρά τη δημόσια υγεία. Η πρόληψη και η αποτελεσματική διαχείριση των δασικών πυρκαγιών αποτελούν κρίσιμες προτεραιότητες για την προστασία του περιβάλλοντος και της κοινωνίας.

Τα συστήματα προσομοίωσης πυρκαγιάς είναι εξελιγμένα εργαλεία που χρησιμοποιούν μαθηματικά μοντέλα και δεδομένα, όπως μετεωρολογικές συνθήκες, τοπογραφία και καύσιμη ύλη, για να προβλέψουν τη συμπεριφορά της φωτιάς σε πραγματικό χρόνο. Ο ρόλος τους στην επιχειρησιακή δράση των δυνάμεων πυρόσβεσης είναι καθοριστικός, καθώς επιτρέπουν την ακριβή εκτίμηση της κατεύθυνσης, της ταχύτητας και της έντασης της φωτιάς. Μέσω αυτών των πληροφοριών, οι αρμόδιοι μπορούν να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις για τη διάταξη των δυνάμεων, τη διάνοιξη αντιπυρικών ζωνών και την προστασία κρίσιμων υποδομών και οικισμών. Επιπλέον, τα συστήματα αυτά ενισχύουν την ασφάλεια των πυροσβεστών, καθώς προβλέπουν πιθανά σημεία παγίδευσης ή επικίνδυνες αλλαγές στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Η συνεχής βελτίωση και ενσωμάτωση τέτοιων τεχνολογιών συμβάλλει σημαντικά στην αποτελεσματικότητα της καταπολέμησης των δασικών πυρκαγιών.

Η παρούσα εργασία αποτελεί έρευνα που διεξήχθη σχετικά με την ψηφιακή προσομοίωση και μοντελοποίηση της εξάπλωσης των δασικών πυρκαγιών. Παρουσιάζονται τα κυριότερα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την προσομοίωση της εξάπλωσης της πυρκαγιάς, ενώ γίνεται και μια προσπάθεια κατηγοριοποίησής τους με βάση τα κύρια χαρακτηριστικά τους. Παράλληλα, παρουσιάζονται τα κυριότερα συστήματα που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα σε διάφορες περιοχές του κόσμου για την προσομοίωση των δασικών πυρκαγιών και ο βασικός τρόπος λειτουργίας τους. Στο τέλος γίνεται σύγκριση μεταξύ τους με ειδική αναφορά στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

Λέξεις Κλειδιά: Δασική πυρκαγιά, Μοντέλο Προσομοίωσης Πυρκαγιάς, Σύστημα Προσομοίωσης Πυρκαγιάς.

ABSTRACT

Forest fires are a serious environmental problem, often caused by natural factors such as lightning, but also by human activities such as negligence, deliberate arson or uncontrolled burning of waste. Their consequences are devastating for both the environment and humans. Forest loss leads to a reduction in biodiversity, destabilisation of ecosystems and accelerated climate change due to the release of large amounts of carbon dioxide. At the same time, fires endanger human lives, cause damage to housing and infrastructure, and exposure to smoke and pollutants is a serious public health problem. The prevention and effective management of forest fires are critical priorities for the protection of the environment and society.

Fire simulation systems are sophisticated tools that use mathematical models and data, such as meteorological conditions, topography and fuel, to predict fire behaviour in real time. Their role in the operational action of firefighting forces is crucial, as they allow for accurate estimation of fire direction, speed and intensity. With this information, those responsible can make informed decisions on the deployment of forces, the opening of firebreaks and the protection of critical infrastructure and settlements. In addition, these systems enhance the safety of firefighters by anticipating potential entrapment points or dangerous changes in fire behavior. The continuous improvement and integration of such technologies contributes significantly to the effectiveness of forest fire fighting.

This paper is research conducted on the digital simulation and modelling of forest fire spread. The main models that have been developed to simulate fire spread are presented and an attempt is made to categorize them based on their main characteristics. At the same time, the main systems that have been developed to date in different regions of the world for forest fire simulation and their basic mode of operation are presented. Finally, a comparison between them is made with special reference to their advantages and disadvantages.

Key Words: Forest Fire, Fire Simulation Model, Fire Simulation System.

Αφιερωμένη στη μητέρα μου

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 1
ABSTRACT 2
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ 4
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ 5
ΛΙΣΤΑ ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ 6
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ 7
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ 8
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 3
ΦΥΣΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ 3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 7
ΟΙ ΔΑΣΙΚΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ 7
3.1 Οι επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών 8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 12
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ 12
4.1 Εμπειρικά και ημι-εμπειρικά μοντέλα 14
4.2 Φυσικά μοντέλα 19
4.3 Μοντέλα προσομοίωσης με χρήση πολλαπλών κλιμάκων 24
4.4 Μοντέλα βασισμένα σε GIS δεδομένα 25
4.5 Υβριδικά μοντέλα 26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 28
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ 28
5.1 Prometheus 28
5.2 Farsite 32
5.3 Phoenix Rapidfire 38
5.4 Behave 41
5.5 PYROCART 47
5.6 Flamap 51
5.7 Geofogo 55
5.8 LANDFIRE 58
5.9 Cell2fire 61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 65
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ 65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 72
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 72
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 74

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Χώρες προέλευσης φυσικών μοντέλων προσομοίωσης πυρκαγιάς.....24
Πίνακας 2: Μοντέλα προσομοίωσης πυρκαγιάς.....27
Πίνακας 3: Σύγκριση συστημάτων προσομοίωσης πυρκαγιάς.....71

ΛΙΣΤΑ ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Σχεδιάγραμμα 1: Δομή του συστήματος FBP (Forest Fire Behavior System).....16
Σχεδιάγραμμα 2: Η αρχιτεκτονική του Prometheus Common Object Model (COM). 30
Σχεδιάγραμμα 3: Σχηματικό διάγραμμα του PHOENIX που δείχνει τις εισόδους, τις εξόδους και την αποθήκευση δεδομένων. 40
Σχεδιάγραμμα 4: Γενική δομή του συστήματος BEHAVE . Το σύστημα BEHAVE χρησιμοποιεί ένα «αρχείο μμοντέλου καυσίμου» για να παρέχει στο υποσύστημα πρόβλεψης πυρκαγιάς πρόσβαση σε μμοντέλα καυσίμου που κατασκευάζονται στο υποσύστημα μοντελοποίησης καυσίμου. 43
Σχεδιάγραμμα 5: Η δομή του μοντέλου προσομοίωσης PYROCART. 50
Σχεδιάγραμμα 6: Ένα πρωτότυπο του Dynamic GIS 56
Σχεδιάγραμμα 7: Το γενικό μοντέλο DGIS μετασχηματίζεται σε ένα ειδικό δέντρο σύνθεσης, όπου οι Geo-units προσδιορίζονται ως μονάδες Geo-FIRE, δημιουργώντας έτσι ένα από τα πιθανά περιβάλλοντα μοντελοποίησης το οποίο ονομάσαμε Geofogo. Οι διακεκομμένες ανοιχτές γκρι γραμμές αντιπροσωπεύουν την αβεβαιότητα του αριθμού των ενεργών Geo-FIRE σε κάθε στιγμή. 57
Σχεδιάγραμμα 8: Πλαίσιο προσομοίωσης και βελτιστοποίησης Cell2Fire. 63

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Πλημμύρες στη Θεσσαλία (Ανακτήθηκε από: https://www.tanea.gr/2023/09/10/greece/kakokairia-daniel-dyo-akomi-nekroi-apo-tis-plimmyres-sti-thessalia/) 5
Εικόνα 2: Πλημμύρες στη Θεσσαλία (Ανακτήθηκε από: https://www.in.gr/2023/10/30/greece/thessalia-ekthesi-vomva-gia-tis-plimmyres-sti-thessalia-ikseran-kai-den-ekanan-tipota/) 5
Εικόνα 3: Σεισμός στο Αρκαλοχώρι (Ανακτήθηκε από: https://www.protothema.gr/greece/article/1165808/seismos-stin-kriti-vuthistike-kata-14-ekatosta-to-arkalohori/) 6
Εικόνα 4: Σεισμός στο Αρκαλοχώρι (Ανακτήθηκε από: https://www.kathimerini.gr/society/561515158/seismos-stin-kriti-archisan-oi-aytopsies-apo-michanikoys-sto-arkalochori/) 6
Εικόνα 5: Καμένη έκταση (γύρω στα 970.000 στρέμματα) από την πυρκαγιά στον Έβρο το 2023, που χαρακτηρίστηκε ως η μεγαλύτερη δασική πυρκαγιά των τελευταίων 20 ετών στην Ελλάδα. 10
Εικόνα 6: Παράδειγμα τοπίου (Papadopoulos & Pavlidou, 2011) 35
Εικόνα 7: Προσομοίωση FARSITE όπως εκτελείται - αποτελέσματα γραφικών παραστάσεων (Papadopoulos & Pavlidou, 2011) 36
Εικόνα 8: Προσομοίωση FARSITE καθώς εκτελείται-πίνακας αποτελεσμάτων (Papadopoulos & Pavlidou, 2011) 37
Εικόνα 9: Τέλος της προσομοίωσης FARSITE - απεικόνιση της τελικής καταστροφής του τοπίου. (Papadopoulos & Pavlidou, 2011) 37
Εικόνα 10: Αποτελέσματα εξόδου από το BEHAVE -Διάγραμμα μήκους φλόγας σε συνάρτηση της έντασης του ανέμου (Andrews, et al., 2005) 44
Εικόνα 11: Αποτελέσματα εξόδου από το BEHAVE – Κατεύθυνση μέγιστης διάδοσης (Andrews, et al., 2005) 45
Εικόνα 12: Αποτελέσματα εξόδου από το BEHAVE – Επιφανειακός ρυθμός διάδοσης (Andrews, et al., 2005) 46
Εικόνα 13: Παραμετροποίηση πυρκαγιάς – είσοδοι στο σύστημα BEHAVE (Andrews, et al., 2005) 47
Εικόνα 14: Τα θέματα δεδομένων εισόδου που απαιτούνται για την εκτέλεση του FlamMap περιέχονται σε ένα αρχείο «Landscape» που κατασκευάζεται από αρχεία ASCII Grid τα οποία είναι πανομοιότυπης ανάλυσης, συν-καταχωρημένα και ίσης έκτασης. (Finney, 2006) 53
Εικόνα 15: Παραδείγματα αποτελεσμάτων από το FlamMap για (a) τον ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς, (b) τη δραστηριότητα της πυρκαγιάς κόμης (0=καμία, 1=επιφανειακή πυρκαγιά, 2=καύση δέντρων ή παθητική πυρκαγιά κόμης και 3=ενεργή πυρκαγιά κόμης), (c) την εξέλιξη της πυρκαγιάς (λευκές περιμέτρους) που προσομοιώθηκε με τη μέθοδο του ελάχιστου χρόνου ταξιδιού (MTT) και (d) τις διαδρομές της πυρκαγιάς που προέκυψαν από την MTT (οι έντονες κίτρινες γραμμές διακρίνουν τις κύριες διαδρομές από όλες τις διαδρομές με γαλάζιο χρώμα). (Finney, 2006) 54

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

CA – Cellural Automata

COM – Common Object Model

DGIS – Dynamic Geographical Information System

FBP – Forest Fire Behavior System

GIS – Geographical Information System

MTT – Minimum Travel Time

ROS – Rate Of Spread

VDM - Vegetation Dynamics Models

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής αυτής εργασίας, κ. Παναγιωτάκη Κωνσταντίνο, για την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθειά του. Χάρη στην επιστημονική του κατάρτιση, τις πολύτιμες συμβουλές και υποδείξεις αλλά και με τις γνώσεις που απλόχερα μου μετέδιδε, κατέστη εφικτή η επιτυχής ολοκλήρωσή της.
Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υπομονή και την αμέριστη στήριξη που μου προσέφεραν, αλλά και για τον χρόνο που μου εξασφάλισαν, ώστε να μπορέσω να ολοκληρώσω την εργασία αυτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία 100 χρόνια έχει ξεκινήσει μια προσπάθεια, ώστε να βρεθεί ο τρόπος με τον οποίο εξαπλώνεται μια πυρκαγιά στη φύση. Έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα που βασίζονται, είτε σε μαθηματικές εξισώσεις, είτε σε μοντέλα φυσικών διεργασιών που θεωρείται ότι προσομοιάζουν στην πυρκαγιά, είτε σε εμπειρικά δεδομένα που έχουν προκύψει από παρατηρήσεις πυρκαγιών που έχουν λάβει χώρα σε πραγματικό χρόνο. Παρ' όλα αυτά, ο ακριβής μηχανισμός διάδοσης μιας δασικής πυρκαγιάς δεν έχει μπορέσει να προσομοιωθεί ακόμα και σήμερα. Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα του φαινομένου αλλά και στους πολυδιάστατους παράγοντες που την επηρεάζουν. Ο ρόλος τους και το πόσο την επηρεάζει καθένας από αυτούς δεν έχει αποσαφηνιστεί ακόμα επακριβώς. Βέβαια, μερικά από αυτά τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί και σαν συστήματα προσομοίωσης πυρκαγιάς, επιτυγχάνουν να προσεγγίσουν σε ικανοποιητικό ποσοστό και να πετύχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, όταν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με πραγματικές πυρκαγιές,

Σε αυτή την εργασία γίνεται μια προσπάθεια καταγραφής των κυριότερων μοντέλων και συστημάτων που έχουν υλοποιηθεί σε διάφορες χώρες μέχρι και σήμερα. Παρότι η προσομοίωση πυρκαγιάς είναι ένα περίπλοκο πρόβλημα, εν τούτοις γίνονται συνεχώς απόπειρες για τη βελτίωση των υφιστάμενων μοντέλων. Τα κυριότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν είναι η αυξημένη υπολογιστική ισχύς που απαιτείται και η εξειδίκευσή τους σε συγκεκριμένες περιοχές και συνθήκες, γεγονός που καθιστά δύσκολη την επέκτασή τους σε οποιαδήποτε πυρκαγιά ανά την υφήλιο. Στο τέλος, γίνεται μια απόπειρα σύγκρισης μεταξύ τους με βάση τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται και αναλύονται οι έννοιες του φυσικού κινδύνου και της φυσικής καταστροφής. Στην κατηγορία των κλιματολογικών κινδύνων εντάσσονται οι δασικές πυρκαγιές, οι οποίες προκαλούν καταστροφές τόσο στο φυσικό όσο και στο ανθρωπογενές περιβάλλον.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι δασικές πυρκαγιές σαν φυσικό φαινόμενο. Καταγράφονται οι κυριότερες επιπτώσεις που έχουν, τόσο στο φυσικό περιβάλλον όσο και

στην ανθρώπινη δραστηριότητα. Θεωρείται ότι η αύξησή τους τα τελευταία χρόνια έχει συμβάλλει σημαντικά στην κλιματική αλλαγή για διάφορους λόγους.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα κυριότερα μοντέλα προσομοίωσης πυρκαγιάς μέχρι σήμερα. Παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας τους καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα καθενός από αυτά. Ταυτόχρονα γίνεται μια προσπάθεια κατηγοριοποίησής τους με αναφορά στο σήμερα και στα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα κυριότερα συστήματα προσομοίωσης πυρκαγιάς που βασίζονται στα μοντέλα του κεφαλαίου 4. Και εδώ παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας τους καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους. Η αναφορά ξεκινάει από τα πρώτα συστήματα που θεωρούνται αρκετά αξιόπιστα και φτάνει μέχρι σήμερα στις τάσεις που έχουν εμφανιστεί τα τελευταία χρόνια.

Στο Κεφάλαιο 6 επιχειρείται μια σύγκριση όλων των μοντέλων και συστημάτων που αναφέρθηκαν στα κεφάλαια 4 και 5. Η σύγκριση πραγματοποιείται στη βάση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που παρουσιάζει το κάθε μοντέλο και σύστημα, αλλά και στις εγγενείς διαφορές που υπάρχουν λόγω του διαφορετικού τρόπου προσέγγισης του φαινομένου της δασικής πυρκαγιάς.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την εργασία αυτή και προτείνονται μελλοντικές εργασίες που θα έρθουν να καλύψουν τις ελλείψεις που υπάρχουν σήμερα στα συστήματα προσομοίωσης πυρκαγιάς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΦΥΣΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ

Ο όρος φυσικός κίνδυνος έχει οριστεί με τέσσερις τρόπους:

(α) «Μια γεωλογική κατάσταση ή φαινόμενο που ενέχει κίνδυνο ή είναι πιθανός κίνδυνος για τη ζωή ή την ιδιοκτησία και προκαλείται είτε φυσικά ή από ανθρώπινη παρέμβαση» (American Geological Institute, 1987).

(β) «Μια αλληλεπίδραση ανθρώπων και φύσης που διέπεται από τις συνυπάρχουσες καταστάσεις της προσαρμογής του ανθρώπινου χρηστικού συστήματος και της κατάστασης της φύσης στο σύστημα των φυσικών γεγονότων» (White, 2019).

(γ) «Τα στοιχεία εκείνα στο φυσικό περιβάλλον τα οποία είναι επιβλαβή στον άνθρωπο και προκαλούνται από δυνάμεις ξένες προς αυτόν» (Burton & Robert, 1964).

(δ) «Η πιθανότητα της εμφάνισης μέσα σε καθορισμένο χρονικό διάστημα και σε μια δεδομένη περιοχή ενός δυνητικά επιζήμιου φαινομένου» (United Nations Disaster Relief Organization, 1982).

Οι φυσικοί κίνδυνοι είναι διαδικασίες που αποτελούν το έναυσμα για τις φυσικές καταστροφές. Οι φυσικοί κίνδυνοι μπορούν να ταξινομηθούν σε έξι κατηγορίες.

1. Γεωφυσικοί ή γεωλογικοί κίνδυνοι που σχετίζονται με την κίνηση της επιφάνειας της γης, όπως για παράδειγμα η σεισμική και η ηφαιστειακή δραστηριότητα.
2. Υδρολογικοί κίνδυνοι που σχετίζονται με την κίνηση του νερού και περιλαμβάνουν τις πλημμύρες, τις κατολισθήσεις και τις διάφορες κινήσεις των κυμάτων.
3. Μετεωρολογικοί κίνδυνοι, όπως είναι οι καταιγίδες, οι ακραίες θερμοκρασίες και η ομίχλη.
4. Κλιματολογικοί κίνδυνοι, που σχετίζονται όλο και περισσότερο με την κλιματική αλλαγή και περιλαμβάνουν τις ξηρασίες και τις πυρκαγιές.
5. Βιολογικοί κίνδυνοι που προκαλούνται από την έκθεση σε ζωντανούς οργανισμούς και/ή στις τοξικές ουσίες που εκκρίνουν. Ο ιός COVID-19 είναι ένα παράδειγμα βιολογικού κινδύνου.
6. Εξωγήινοι κίνδυνοι που προκαλούνται από αστεροειδείς, μετεωρίτες και κομήτες καθώς περνούν κοντά στη γη ή ακόμα και όταν χτυπούν τη γη. Εκτός από τις τοπικές

ζημιές, μπορούν να αλλάξουν τις πλανητικές συνθήκες στη γη, οι οποίες με τη σειρά τους μπορούν να επηρεάζουν τη μαγνητόσφαιρα, την ιονόσφαιρα και τη θερμόσφαιρά της (Chaudhary & Piracha, 2021).

Μια φυσική καταστροφή μπορεί να οριστεί ως κάποια ταχεία, στιγμιαία ή προφανής επίπτωση που έχει ένα γεγονός που συμβαίνει στο φυσικό περιβάλλον στο κοινωνικοοικονομικό σύστημα. Αυτά τα γεγονότα επηρεάζουν αρνητικά, τόσο τις ανθρώπινες κοινωνίες όσο και το φυσικό περιβάλλον, προκαλώντας συχνά καταστροφές σε υποδομές, απώλειες ανθρώπινων ζωών και σοβαρές οικονομικές επιπτώσεις (Alexander, 2018). Ο Turner (1976), προσδιόρισε το φαινόμενο πληρέστερα ως «ένα γεγονός, συγκεντρωμένο στον χρόνο και στον χώρο, που απειλεί μια κοινωνία ή μια σχετικά αυτάρκη υποδιαίρεση της κοινωνίας με μεγάλες ανεπιθύμητες συνέπειες, ως αποτέλεσμα της κατάρρευσης των προληπτικών μέτρων που ίσχυαν μέχρι τώρα και θεωρούνταν αποδεκτά ως επαρκή».

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι ο όρος "φυσικές καταστροφές" αναφέρεται σε καταστροφικά γεγονότα που προκύπτουν από φυσικά φαινόμενα και έχουν σημαντικές επιπτώσεις στις ανθρώπινες κοινωνίες και το περιβάλλον. Αυτές οι καταστροφές περιλαμβάνουν φαινόμενα, όπως σεισμούς, πλημμύρες, πυρκαγιές, ηφαιστειακές εκρήξεις, τυφώνες, ξηρασίες, καταιγίδες και κατολισθήσεις. Τα γεγονότα αυτά είναι συνήθως αποτέλεσμα φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στον πλανήτη, όπως οι γεωλογικές διεργασίες, οι ατμοσφαιρικές και κλιματικές συνθήκες ή η αλληλεπίδραση νερού και εδάφους. Αν και οι φυσικές καταστροφές είναι μέρος της φυσικής λειτουργίας της Γης, η έντασή τους μπορεί να επιδεινωθεί από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η κλιματική αλλαγή και η περιβαλλοντική υποβάθμιση. Οι συνέπειες των φυσικών καταστροφών μπορεί να είναι καταστροφικές για τις υποδομές, την ανθρώπινη ζωή και την οικονομία, καθιστώντας την κατανόηση και τη διαχείρισή τους κρίσιμες για τη μείωση των επιπτώσεων τους (Smith, 2013).

Ειδικότερα, οι δασικές πυρκαγιές είναι ένα σημαντικό ζήτημα σε πολλά μέρη του κόσμου. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναδειχθεί ως μία από τις κορυφαίες αιτίες στον κόσμο για πρόκληση φυσικών καταστροφών. Οι δασικές πυρκαγιές είναι συχνές σε πολλές περιοχές και μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές στο περιβάλλον και την άγρια ζωή, ακόμα και να θέσουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές. Οι συνθήκες

θερμοκρασίας και ξηρασίας που απαιτούνται για την εκκίνηση μιας πυρκαγιάς μπορούν επίσης να προκαλέσουν τη γρήγορη εξάπλωσή της, καταστρέφοντας δέντρα, σπίτια και άλλες κατασκευές. Ο καπνός από τη φωτιά αλλά και η θερμότητα που εκλύεται μπορεί επίσης να είναι επιβλαβής για ανθρώπους και ζώα. Οι δασικές πυρκαγιές μπορούν να προκληθούν από διάφορους παράγοντες, όπως οι κεραυνοί και οι απρόσεκτοι κατασκηνωτές ή εμπρηστές. Για την αντιμετώπιση μιας δασικής πυρκαγιάς συχνά εμπλέκεται μεγάλος αριθμός ανθρώπων και υπηρεσιών, που συμπεριλαμβάνουν την Πυροσβεστική, την Αστυνομία, την Πολιτική Προστασία ακόμα και εργάτες δασοκομίας (Yandouzi, et al., 2022).

Εικόνες από τις πλημμύρες στην Θεσσαλία το 2023



Εικόνα 1: Πλημμύρες στη Θεσσαλία (Ανακτήθηκε από: https://www.tanea.gr/2023/09/10/greece/kakokairia-daniel-dyo-akomi-nekroi-apo-tis-plimmyres-sti-thessalia/)



Εικόνα 2: Πλημμύρες στη Θεσσαλία (Ανακτήθηκε από: https://www.in.gr/2023/10/30/greece/thessalia-ekthesi-vomva-gia-tis-plimmyres-sti-thessalia-ikseran-kai-den-ekanan-tipota/)

Εικόνες από το σεισμό στο Αρκαλοχώρι το 2021



Εικόνα 3: Σεισμός στο Αρκαλοχώρι (Ανακτήθηκε από: https://www.protothema.gr/greece/article/1165808/seismos-stin-kriti-vuthistike-kata-14-ekatosta-to-arkalohori/)



Εικόνα 4: Σεισμός στο Αρκαλοχώρι (Ανακτήθηκε από: https://www.kathimerini.gr/society/561515158/seismos-stin-kriti-archisan-oi-aytopsies-apo-michanikoys-sto-arkalochori/)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΟΙ ΔΑΣΙΚΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ

Η φωτιά είναι ένα παγκόσμιο φαινόμενο που εμφανίζεται στα γεωλογικά αρχεία αμέσως μετά την εμφάνιση των χερσαίων φυτών περίπου πριν 420 εκατομμύρια χρόνια κατά τη Σιλούριο περίοδο. Επηρεάζει παγκόσμια τα μοτίβα και τις διαδικασίες των οικοσυστημάτων, συμπεριλαμβανομένης της κατανομής και δομής της βλάστησης, τον κύκλο του άνθρακα και το κλίμα. Προκειμένου να γίνουν αντιληπτά περισσότερα για τη φωτιά, θα πρέπει να θεωρηθεί ως εσωτερική διαδικασία του γήινου συστήματος που συνδέει και επηρεάζει τους περιφερειακούς και παγκόσμιους βιογεωχημικούς κύκλους, την ανθρώπινη δραστηριότητα, καθώς και τα μοτίβα βλάστησης (Bowman, et al., 2009).

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η εκδήλωση πυρκαγιών στη βλάστηση είναι κοινή σε όλες τις ηπείρους. Οι πυρκαγιές έχουν διαμορφώσει σημαντικά τη σύνθεση και τη δυναμική ορισμένων οικοσυστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των δασών και των ανοιχτών τοπίων. Από τα πρώτα χρόνια καλλιέργειας της γης, η χρήση της φωτιάς συνέβαλε στην εξέλιξη της ανθρωπότητας, καθώς και στη διαμόρφωση της παραγωγικότητας διαφόρων περιοχών. Σήμερα, η περιοχή με βλάστηση που πλήττεται κάθε χρόνο από πυρκαγιές παγκοσμίως μπορεί να κυμαίνεται από 300 εκατομμύρια έως 600 εκατομμύρια εκτάρια (3 εκατομμύρια - 6 εκατομμύρια τετραγωνικά χιλιόμετρα) (Goldammer, et al., 2017).

Ενώ ορισμένα φυσικά οικοσυστήματα προσαρμόζονται ευκολότερα ή είναι ανεκτικά στη φωτιά, κάποια άλλα οικοσυστήματα παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ευαισθησία. Με την αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού και την επακόλουθη επέκταση αλλαγής χρήσης της γης, τα όρια ανάμεσα στις δασικές πυρκαγιές και τα ευαίσθητα ανθρώπινα περιουσιακά στοιχεία γίνονται όλο και περισσότερα, πιο κρίσιμα και αντικρουόμενα. Τα επιστημονικά στοιχεία αποκαλύπτουν ότι οι έμμεσες επιπτώσεις των πυρκαγιών έχουν σημαντικό αντίκτυπο στο περιβάλλον και την κοινωνία. Το πιο σημαντικό ίσως είναι οι εκπομπές που προέρχονται από τις πυρκαγιές (εκπομπές αερίων και σωματιδίων), που επηρεάζουν τη σύνθεση της ατμόσφαιρας και επομένως το παγκόσμιο κλίμα, καθώς και την ανθρώπινη υγεία και ασφάλεια (Goldammer, et al., 2017).

3.1 Οι επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών

Οι πυρκαγιές καίνε εύφορες εκτάσεις, με αποτέλεσμα να γίνονται άγονες και πολλές φορές οδηγούν τους ανθρώπους να γίνουν άστεγοι. Το τελευταίο έχει ως αποτέλεσμα να δαπανώνται τεράστια χρηματικά ποσά στη διαδικασία επισκευής, παροχής άμεσης φροντίδας και μετέπειτα ανακούφισης από τις ζημιές που έχουν προκληθεί. Οι άνθρωποι πρέπει να μετεγκατασταθούν, τα σπίτια και η ζωή τους πρέπει να ξαναχτιστούν. Η μεγάλη ποσότητα καπνού στον αέρα κάνει προσωρινά τις γύρω περιοχές μη κατοικήσιμες λόγω ανησυχητικών επιπέδων τοξικότητας, γεγονός που οδηγεί σε εκτεταμένη ρύπανση του αέρα, η οποία πρέπει να αντιμετωπιστεί (Dhall, et al., 2020).

Οι δασικές πυρκαγιές παράγουν πολλούς και διαφορετικούς ρύπους, συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών αερολυμάτων και του σχηματισμού αιθάλης. Οι ρύποι αυτοί είναι ένας από τους πιο επιβλαβείς παράγοντες του περιβάλλοντος στις περιοχές ενεργών δασικών πυρκαγιών. Το αερόλυμα είναι εξ ορισμού μια συλλογή στερεών ή υγρών σωματιδίων σε αναστολή μέσα σε αέριο. Αυστηρά μιλώντας, ο όρος αερόλυμα περιλαμβάνει και τα δύο, δηλαδή τα σωματίδια και το αιωρούμενο αέριο. Η ατμοσφαιρική ρύπανση από τις πυρκαγιές που οφείλεται στο αερόλυμα οδηγεί σε καρδιοπνευμονική νόσο και έχει επιπτώσεις, τόσο στο περιβάλλον όσο και στον κύκλο του άνθρακα. Επομένως, οι εκπομπές αιθάλης και αερολυμάτων από δασικές πυρκαγιές πρέπει να ελεγχθούν και να περιοριστούν όσο είναι δυνατόν (Baranovskiy, et al., 2024).

Οι πυρκαγιές προκαλούν τεράστια οικολογική καταστροφή για τον φυσικό κόσμο. Μια δασική πυρκαγιά έχει αρνητικό αντίκτυπο στην ατμόσφαιρα, στα δάση, στην κάλυψη του εδάφους και στον κόσμο των ζώων. Οι επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών μπορούν να χωριστούν σε οικονομικές και περιβαλλοντικές. Αυτές μπορούν να προκαλέσουν άμεσες οικονομικές απώλειες που για την διαχείριση του δάσους και του περιβάλλοντός του περιλαμβάνουν:

- καμένη και κατεστραμμένη ξυλεία από δέντρα που έχουν μείνει όρθια,
- καμένη και κατεστραμμένη ξυλεία που είχε κοπεί,
- καμένη ή κατεστραμμένη παραγωγή από δευτερεύοντα δασικά προϊόντα, που περιλαμβάνει όλα τα συλλεγόμενα δασικά προϊόντα εκτός της ξυλείας,
- δαπάνες της πυροσβεστικής δράσης,

- καθαρισμός της καμένης περιοχής,
- δαπάνες αποκατάστασης καμένων εκτάσεων.

Άλλες συνέπειες των δασικών πυρκαγιών περιλαμβάνουν:

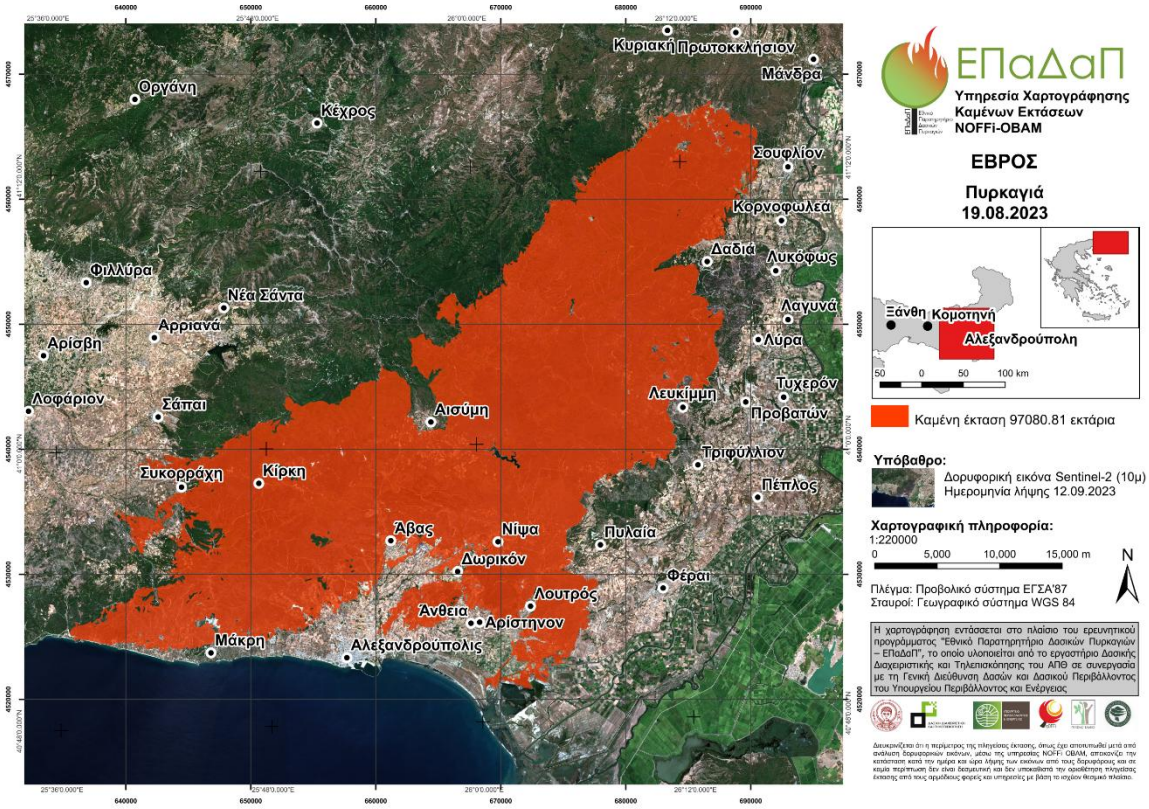
1. Άμεσες συνέπειες (σχετικά με τη διαχείριση του δάσους): πρώτη ύλη συν έξοδα για πυρόσβεση.

2. Έμμεσες συνέπειες (σχετικές με μη παραγωγικές λειτουργίες του δάσους και απώλειες στο οικοσύστημα): ανυπολόγιστες απώλειες στο οικοσύστημα.

Οι συνέπειες των δασικών πυρκαγιών και των σχετιζόμενων με τις πυρκαγιές δραστηριοτήτων περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, εμπλοκή του ανθρώπινου δυναμικού με το έργο που επιτελούν οι πυροσβέστες και οι δασολόγοι, όπως επίσης και εξοπλισμό. Άνθρωποι χάνουν την υγεία ή τη ζωή τους ως αποτέλεσμα πυρκαγιών. Υπάρχει, επίσης, μείωση της βιοποικιλότητας και διαταραχές στους βιογεωχημικούς κύκλους, ενώ η ποσότητα προϊόντων καύσης κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς (μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα, κυκλοαλκάνια), καθώς και οι εκπομπές στην ατμόσφαιρα μπορούν να βλάψουν σοβαρά την υγεία των ανθρώπων και της πανίδας στις περιοχές που έχει εκδηλωθεί η πυρκαγιά. Οι οικολογικές επιπτώσεις είναι κυρίως η εμφάνιση όξινης βροχής, η κλιματική αλλαγή, η μείωση του αριθμού των πληθυσμών θηραμάτων, η μείωση του αριθμού της εντομοπανίδας, ο περιορισμός των βιολογικών ιδιοτήτων του εδάφους λόγω της καταστροφής της μικροχλωρίδας κ.ά. (Sadowska, et al., 2021).

Επίσης, η κλιματική αλλαγή που προκαλείται από τον άνθρωπο, προωθεί τις συνθήκες, από τις οποίες εξαρτώνται οι πυρκαγιές, ενισχύοντας την πιθανότητα εκδήλωσής τους, ενώ παράλληλα δημιουργεί νέες προκλήσεις στις προσπάθειες καταστολής τους. Η υπερθέρμανση που προκαλείται από την ανθρώπινη δραστηριότητα έχει ήδη οδηγήσει σε παγκόσμια αύξηση της συχνότητας και της έντασης των καιρικών συνθηκών που ευνοούν την εκδήλωση πυρκαγιάς, αυξάνοντας συνεπακόλουθα τους κινδύνους πυρκαγιάς. Αυτό προέκυψε από τη φυσική μεταβλητότητα σε πολλές περιοχές, συμπεριλαμβανομένων των δυτικών ΗΠΑ, του Καναδά, της νότιας Ευρώπη, της Σκανδιναβίας και της Αμαζονίας με βάση αποτελέσματα διαφόρων ερευνών. Η υπερθέρμανση που προκαλείται από τον άνθρωπο αυξάνει, επίσης, τους κινδύνους πυρκαγιάς σε άλλες περιοχές, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται η Σιβηρία και η

Αυστραλία. Ωστόσο, η εκδήλωση των δασικών πυρκαγιών καθορίζεται από μια σειρά άλλων παραγόντων, συμπεριλαμβανομένου του τρόπου διαχείρισης της γης και τυχόν πηγών ανάφλεξης, σε παγκόσμια κλίμακα Τα περισσότερα σύνολα δεδομένων υποδεικνύουν μείωση της καμένης επιφάνειας τα τελευταία χρόνια, κυρίως λόγω της εκκαθάρισης της φυσικής γης για τη γεωργία (Jones, et al., 2020).



Εικόνα 5: Καμένη έκταση (γύρω στα 970.000 στρέμματα) από την πυρκαγιά στον Έβρο το 2023, που χαρακτηρίστηκε ως η μεγαλύτερη δασική πυρκαγιά των τελευταίων 20 ετών στην Ελλάδα.
Πηγή: Εθνικό Παρατηρητήριο Δασικών Πυρκαγιών - Υπηρεσία αυτόματης χαρτογράφησης καμένων εκτάσεων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Όπως είδαμε και παραπάνω, οι πυρκαγιές είναι μια ετήσια επαναλαμβανόμενη απειλή για τους ανθρώπους και τις ιδιοκτησίες σε πολλά κράτη του κόσμου. Βασικός λόγος για την αδυναμία έγκαιρης και ολοκληρωμένης αντιμετώπισής τους αποτελεί η άγνοια για τις βασικές χημικές και φυσικές διεργασίες που συντελούν στην εξάπλωση της πυρκαγιάς. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού είναι οι (άγνωστες) συνθήκες που δημιουργούν την αλλαγή μεταξύ των τρόπων εξάπλωσης της φωτιάς, όπως για παράδειγμα όταν μια φωτιά σε ένα στέμμα βλάστησης θα αλλάξει από μια επιφανειακή πυρκαγιά με παθητικό αποτέλεσμα σε μια ταχεία μεταδιδόμενη και ανεξέλεγκτη πυρκαγιά. Η πολυπλοκότητα με την οποία διαμορφώνονται τα φυσικά καύσιμα για την πυρκαγιά, η καύση τους και η αλληλεπίδρασή τους με τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες, έχει αποτρέψει την ανάπτυξη οποιουδήποτε ολοκληρωμένου μοντέλου συμπεριφοράς άγριας πυρκαγιάς, πόσο μάλλον την ενσωμάτωσή της σε μια στρατηγική διαχείρισής της.

Γι’ αυτόν τον λόγο, εμπειρικά μοντέλα που βασίζονται σε δοκιμαστικές πυρκαγιές στο εργαστήριο και στο φυσικό πεδίο έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Ενώ αυτό υπήρξε το απαραίτητο πρώτο βήμα για την κατανόηση της συμπεριφοράς της, είναι ουσιαστικά ένα μη ικανοποιητικό τελικό σημείο, τόσο από επιστημονικής όσο και από πρακτικής άποψης. Για περισσότερα από πενήντα χρόνια έχει γίνει έρευνα για την κατανόηση της συμπεριφοράς και της ελεύθερης εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς, τόσο σε τακτικές όσο και σε ακανόνιστες συστοιχίες καυσίμων. Πολλοί άνθρωποι έχουν προσπαθήσει να αναπτύξουν μοντέλα γενικής εφαρμογής. Τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν ταξινομούνται ως στατιστικά, εμπειρικά ή φυσικά, σύμφωνα με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τους (Weber, 1991).

Τα τελευταία χρόνια, η πρόοδος στην υπολογιστική ισχύ οδήγησε σε αύξηση των προσπαθειών μοντελοποίησης της συμπεριφοράς των πυρκαγιών στην άγρια φύση και της προσομοίωσης της εξάπλωσής τους σε όλο το τοπίο. Έτσι, θα μπορούσαμε να χωρίσουμε τα μοντέλα που αναφέρθηκαν παραπάνω σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: φυσικά και οιονεί φυσικά μοντέλα, εμπειρικά και ημι-εμπειρικά μοντέλα και μοντέλα προσομοίωσης και μαθηματικά ανάλογα.

Σε αυτό το πλαίσιο, ένα φυσικό μοντέλο είναι αυτό που επιχειρεί να αντιπροσωπεύσει τόσο τη φυσική όσο και τη χημεία της εξάπλωσης της φωτιάς. Ένα οιονεί φυσικό μοντέλο επιχειρεί να αναπαραστήσει μόνο τη φυσική. Ένα εμπειρικό μοντέλο δεν περιέχει καθόλου φυσική κατανόηση (γενικά μόνο στατιστικής φύσης), ενώ ένα οιονεί εμπειρικό μοντέλο χρησιμοποιεί κάποια μορφή φυσικού πλαισίου στο οποίο βασίζεται η στατιστική μοντελοποίηση. Τα εμπειρικά και ημι-εμπειρικά μοντέλα μπορούν περαιτέρω να κατηγοριοποιηθούν σε εργαστηριακά και βασισμένα σε προσομοιώσεις στο πεδίο, ώστε να υπάρξει διαφοροποίηση μεταξύ των πλήρως ελεγχόμενων πειραμάτων μικρής κλίμακας που διεξάγονται σε εσωτερικούς χώρους και εκείνων που διεξάγονται σε εξωτερικό χώρο και κατ' επέκταση έχουν περιορισμένο έλεγχο. Τα μοντέλα προσομοίωσης υλοποιούν ένα προϋπάρχον μοντέλο συμπεριφοράς πυρκαγιάς (συχνά χαμηλής χωρικής διάστασης) σε μια εφαρμογή εξάπλωσης τοπίου και επομένως απευθύνονται σε ένα διαφορετικό σύνολο προβλημάτων που σχετίζονται με μαθηματικούς υπολογισμούς. Τα μαθηματικά αναλογικά μοντέλα είναι εκείνα που χρησιμοποιούν μια μαθηματική αρχή αντί μιας φυσικής για τη μοντελοποίηση της εξάπλωσης της πυρκαγιάς στην άγρια φύση (Sullivan, 2009).

Τα μοντέλα δασικών πυρκαγιών χρησιμοποιούνται γενικά σε διαφορετικές πτυχές της διαχείρισης πυρκαγιών και βοηθούν στην κατανόηση και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Αυτό βοηθά τους πυροσβέστες να επικεντρωθούν σε μια περιοχή με μεγαλύτερο κίνδυνο και να αναπτύξουν καλύτερη υποδομή για την εκπαίδευσή τους. Ο τελικός σκοπός είναι να σχεδιάσουν πολιτικές πυρόσβεσης, για να ελαχιστοποιήσουν τις ζημιές και να παραμείνουν ασφαλείς. Με τον ίδιο τρόπο η μοντελοποίηση προσομοίωσης παρέχει ένα κατάλληλο εργαλείο για την εκτίμηση του κινδύνου, όταν τα πραγματικά δεδομένα κινδύνου είναι περιορισμένα ή μη διαθέσιμα.

Τελικά, υπάρχει ανάγκη να μοντελοποιηθούν οι δασικές πυρκαγιές σε καύσιμα εδάφους, στέμματος και επιφανείας. Ο κίνδυνος δασικής πυρκαγιάς μπορεί να υπολογιστεί ως το ποσοστό των διαδρομών προσομοίωσης που έκαψαν ένα συγκεκριμένο σημείο και συσσωρεύτηκαν σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης. Για τον σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν σύνολα δεδομένων από δορυφόρο σε συνδυασμό με σύνολα δεδομένων τοπογραφίας, βλάστησης και κλίματος, για να συμπεράνουμε τους αιτιολογικούς παράγοντες των πυρκαγιών. Τα χωρικά δεδομένα για όλες αυτές τις παραμέτρους

μπορούν να συγκεντρωθούν και να οργανωθούν σε ένα πλαίσιο GIS (Geographical Information System). Τα παραπάνω καθίστανται αρκετά σημαντικά για τον εντοπισμό πιθανών ενεργών σημείων κινδύνου πυρκαγιάς, όπου μπορούν να ληφθούν μέτρα δασικής πυροπροστασίας εκ των προτέρων. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα μοντελοποίησης και προσομοίωσης με χρήση τεχνολογιών GIS ως αποτελεσματικό εργαλείο για την αξιολόγηση του τόπου και του χρόνου που πιθανόν θα εκδηλωθούν δασικές πυρκαγιές (Kanga, et al., 2014).

Με βάση τα παραπάνω θα μπορούσαμε να κατηγοριοποιήσουμε τα μοντέλα προσομοίωσης πυρκαγιάς ως εξής:

1. Εμπειρικά και ημι-εμπειρικά μοντέλα: βασίζονται σε παρατηρήσεις πεδίου και εμπειρικές σχέσεις.
2. Φυσικά μοντέλα: βασίζονται σε φυσικούς νόμους και χρησιμοποιούν πιο λεπτομερή δεδομένα για την αλληλεπίδραση μεταξύ της φωτιάς και του περιβάλλοντος.
3. Μοντέλα προσομοίωσης με χρήση πολλαπλών κλιμάκων: συνδυάζουν φυσικά και εμπειρικά δεδομένα για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς.
4. Μοντέλα βασισμένα σε GIS δεδομένα: χρησιμοποιούν γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) για την ανάλυση των πυρκαγιών σε μεγάλες περιοχές.
5. Υβριδικά μοντέλα: συνδυάζουν εμπειρικά και φυσικά μοντέλα για να δημιουργήσουν πιο ακριβείς προσομοιώσεις.

4.1 Εμπειρικά και ημι-εμπειρικά μοντέλα

Ένα από τα σημαντικότερα μοντέλα προσομοίωσης πυρκαγιάς είναι αυτό που αναπτύχθηκε από τον Rothermel το 1972 και το οποίο αποτελεί τη βάση για πολλά συστήματα που χρησιμοποιούνται σήμερα. Το μαθηματικό μοντέλο εξάπλωσης πυρκαγιάς προσφέρει μια μέθοδο για την πραγματοποίηση ποσοτικών αξιολογήσεων, τόσο του ρυθμού εξάπλωσης όσο και της έντασης της φωτιάς στα καύσιμα που πληρούν τις προϋποθέσεις για τις υποθέσεις που γίνονται στο μοντέλο. Οι παράμετροι καυσίμου και καιρού που μπορούν να μετρηθούν στο πεδίο εμφανίζονται ως είσοδοι στο μοντέλο. Αναπτύχθηκε για την πρόβλεψη του ρυθμού εξάπλωσης και της έντασης σε ένα συνεχές στρώμα καυσίμου που είναι εφαπτόμενο με το έδαφος. Η αρχική ανάπτυξη μιας δασικής πυρκαγιάς εμφανίζεται στα καύσιμα της επιφάνειας (καύσιμα που υποστηρίζονται σε

απόσταση 6 ποδιών ή λιγότερο από το έδαφος). Κάτω από ευνοϊκές συνθήκες καύσης, εάν παράγεται επαρκής θερμότητα, η φωτιά μπορεί να αναπτυχθεί κατακόρυφα στις κορυφές των δέντρων προκαλώντας την ανάπτυξη πυρκαγιάς στο στέμμα.

Η φύση και οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας σε μια πυρκαγιά με στέμμα είναι σημαντικά διαφορετικοί από εκείνους για μια φωτιά στο έδαφος, επομένως, το μοντέλο που αναπτύχθηκε δεν είναι εφαρμόσιμο σε πυρκαγιές στέμματος. Επιπλέον, το μοντέλο έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει μια πυρκαγιά που έχει σταθεροποιηθεί σε κατάσταση σχεδόν σταθερής εξάπλωσης. Οι περισσότερες πυρκαγιές ξεκινούν από μία μόνο πηγή και εξαπλώνονται προς τα έξω, αυξάνοντας σε μέγεθος και παίρνοντας ένα ελλειπτικό σχήμα με τον κύριο άξονα προς την πιο ευνοϊκή κατεύθυνση για εξάπλωση. Όταν η φωτιά είναι αρκετά μεγάλη ώστε η εξάπλωση οποιουδήποτε τμήματος να είναι ανεξάρτητη από επιρροές που προκαλούνται από την αντίθετη πλευρά, μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει σταθεροποιηθεί σε μια πυρκαγιά γραμμής. Μια πυρκαγιά γραμμής συμπεριφέρεται σαν ένα κύμα αντίδρασης με πρόοδο που είναι σταθερή με την πάροδο του χρόνου σε ομοιόμορφα καύσιμα (Rothermel, 1972).

Η βασική μαθηματική εξίσωση που διατύπωσε ο Rothermel και αφορά το ROS (Rate Of Spread) της πυρκαγιάς είναι η παρακάτω:

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \varphi_w + \varphi_s)}{\rho_b \varepsilon \, Q_{ig}}$$

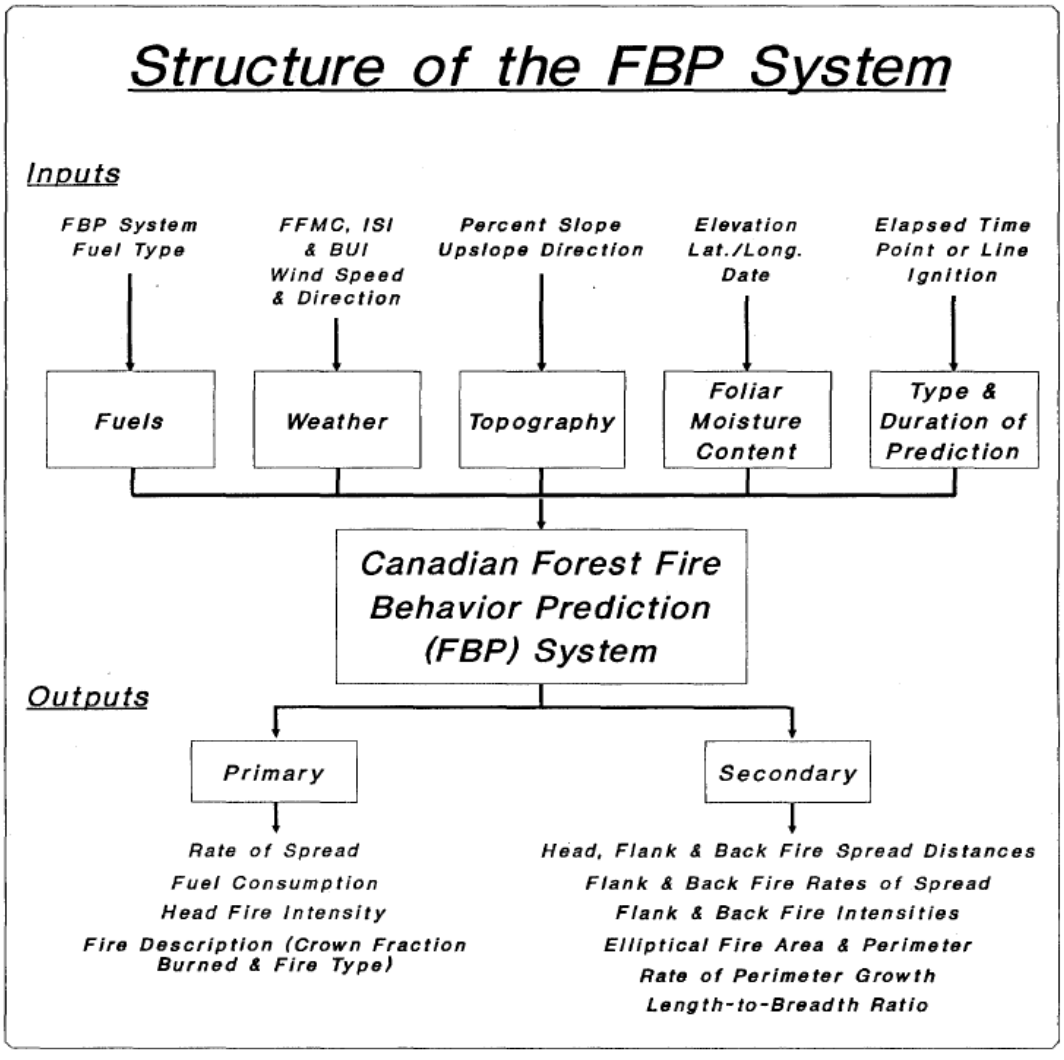
όπου I_R είναι η ένταση της αντίδρασης, ξ ο λόγος ροής διάδοσης, φ_w η συνιστώσα για τον άνεμο, φ_s ο συντελεστής για την πλαγιά, ρ_b η πυκνότητα όγκου του καυσίμου, ε ο αριθμός αποτελεσματικής θέρμανσης και Qig η θερμοκρασία ανάφλεξης.

Η συλλογή επαρκών δεδομένων σχετικά με την εξάπλωση των δασικών πυρκαγιών δεν είναι εύκολη και σπάνια διενεργούνται επιτόπιες διαδικασίες. Για τον υπολογισμό του ρυθμού εξάπλωσης της πυρκαγιάς χρησιμοποιούνται δεδομένα, τα οποία προέρχονται από εργαστηριακές μελέτες πυρκαγιών που προκαλούνται από τον άνεμο σε διαφορετικές συστοιχίες καυσίμων. Το γεγονός λοιπόν ότι η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων απαιτεί ακριβείς μετρήσεις και δεδομένα εισόδου, τα οποία δεν είναι πάντα εύκολα διαθέσιμα, προσθέτει ακόμη μια πρόκληση στη χρήση του. Παρόλο που το μοντέλο παραμένει ένα πολύτιμο εργαλείο για την κατανόηση των βασικών μηχανισμών διάδοσης των

πυρκαγιών, είναι απαραίτητη η βελτίωση και ο εκσυγχρονισμός του με σύγχρονες τεχνολογίες και πολυδιάστατες προσεγγίσεις, όπως η ενσωμάτωση δυναμικών μεταβλητών για την αναβάθμιση της ακρίβειάς του (Cheney, et al., 1998).

Ένα άλλο πολύ σημαντικό μοντέλο είναι το καναδικό σύστημα πρόβλεψης συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών (Forest Fire Behavior System - FBP), καθώς παρέχει μια συστηματική μέθοδο αξιολόγησης της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Το σύστημα FBP έχει 14 κύριες εισόδους που μπορούν να χωριστούν σε 5 γενικές κατηγορίες: καύσιμα, καιρός, τοπογραφία, περιεκτικότητα σε υγρασία φυλλώματος, τύπος και διάρκεια πρόβλεψης. Αυτές οι είσοδοι χρησιμοποιούνται για τη μαθηματική ανάπτυξη 4 κύριων και 11 δευτερευουσών εξόδων. Οι κύριες έξοδοι βασίζονται γενικά σε μια εξίσωση έντασης πυρκαγιάς και οι δευτερεύουσες έξοδοι υπολογίζονται, χρησιμοποιώντας ένα απλό ελλειπτικό μοντέλο ανάπτυξης πυρκαγιάς (Hirsch, 1996).

Σχεδιάγραμμα 1: Δομή του συστήματος FBP (Forest Fire Behavior System)



Η ανάπτυξη του καναδικού συστήματος πρόβλεψης συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών (FBP), είχε ως κίνητρο την ανάγκη να προβλεφθεί με ακρίβεια ο ρυθμός εξάπλωσης, η ένταση, η έκταση και η περιμετρική ανάπτυξη των πυρκαγιών σε άγρια γη και να παρέχει τις πληροφορίες που χρειάζονται για την υποστήριξη μιας μεγάλης ποικιλίας αποφάσεων διαχείρισης πυρκαγιών. Το σύστημα FBP, περιλαμβάνει μια σειρά μαθηματικών εξισώσεων που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της φωτιάς με τον άνεμο, την υγρασία του καυσίμου και τις τοπογραφικές συνθήκες για 16 τύπους καυσίμων αναφοράς (βλάστηση). Αυτό το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου καύσης, μιας πυρκαγιάς που εξαπλώνεται από ένα μόνο σημείο ή γραμμή, υποθέτοντας ότι τα καύσιμα είναι ομοιόμορφα και συνεχή, ότι η τοπογραφία είναι απλή και ομοιογενής και ότι ο άνεμος είναι σταθερός και μονής κατεύθυνσης. Αν και το σύστημα FBP αποτελεί σημαντικό θεμέλιο, η πρόβλεψη της συμπεριφοράς σε πολλά σημεία κατά μήκος της περιμέτρου μιας μεγάλης πυρκαγιάς που καίει σε ένα τοπίο που αποτελείται από πολύπλοκα καύσιμα και τοπογραφία και η πρόβλεψη της τελικής εξάπλωσης της φωτιάς σε περιόδους πολλών ωρών ή ημερών, είναι τρομερές υπολογιστικές εργασίες πέρα από το πεδίο εφαρμογής του συστήματος FBP (Tymstra, et al., 2010).

Το FBP βασίστηκε σε δεδομένα συμπεριφοράς της πυρκαγιάς που συλλέχτηκαν από έργα πειραματικής καύσης και τεκμηρίωση πυρκαγιών. Δεδομένα αυτού του τύπου είναι δύσκολο να βρεθούν και συγκεντρώθηκαν με την συνεχή προσπάθεια και συνεργασία όλων των οργανισμών διαχείρισης των δασικών πυρκαγιών. Δομικά αποτελείται από τέσσερα συμπεριφορικά υποσυστήματα σαν κύριες εξόδους: ρυθμού μετάδοσης, κατανάλωσης καυσίμου, έντασης κεφαλής φωτιάς και περιγραφής φωτιάς (επιφανειακή ή στέμματος). Τα δευτερεύοντα συστήματα εξόδου αποτελούνται από την απόσταση της κεφαλής της φωτιάς, την ελλειπτική περίμετρο και περιοχή της φωτιάς, τις ταχύτητες εξάπλωσης και τις εντάσεις πυρκαγιάς στα πλάγια και πίσω (Van Wagner, et al., 1992).

Ένα άλλο μοντέλο χρησιμοποιεί την θεωρία των κυτταρικών αυτομάτων (Cellural Automata) για την προσομοίωση της εξέλιξης μιας πυρκαγιάς. Τα κυτταρικά αυτόματα είναι μοντέλα φυσικών συστημάτων, όπου ο χώρος και ο χρόνος είναι διακριτοί και οι αλληλεπιδράσεις είναι μόνο τοπικές. Παρά τη δομική τους απλότητα, παρουσιάζουν πολύπλοκη δυναμική συμπεριφορά και μπορούν να περιγράψουν πολλά φυσικά

συστήματα και διαδικασίες. Ένα κυτταρικό αυτόματο αποτελείται από ένα κανονικό ομοιόμορφο n-διάστατο πλέγμα (ή συστοιχία). Σε κάθε θέση του πλέγματος (κελί) ένα φυσικό μέγεθος λαμβάνει τιμές. Αυτό το φυσικό μέγεθος είναι η συνολική κατάσταση του κυτταρικού αυτόματου και η τιμή αυτού του μεγέθους σε κάθε κελί είναι η τοπική κατάσταση αυτού του κελιού. Κάθε κύτταρο περιορίζεται μόνο στην αλληλεπίδραση με γειτονικά κύτταρα, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να έχει άμεση επικοινωνία με απομακρυσμένα κύτταρα. Ως γειτονιά ενός κελιού θεωρείται το ίδιο το κελί και ορισμένα ή όλα τα αμέσως γειτονικά κελιά. Η κατάσταση σε κάθε κύτταρο ενημερώνεται ταυτόχρονα σε διακριτά χρονικά βήματα, με βάση τις καταστάσεις στη γειτονιά του κατά το προηγούμενο χρονικό βήμα. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κατάστασης του επόμενου κελιού αναφέρεται ως τοπικός κανόνας κυτταρικού αυτόματου. Συνήθως ο ίδιος τοπικός κανόνας εφαρμόζεται σε όλα τα κύτταρα του κυτταρικού αυτόματου.

Τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την προσομοίωση πυρκαγιάς, είτε δεν είναι εντελώς ακριβή είτε απαιτούν τεράστια ποσά μνήμης και υπολογιστικού χρόνου. Επιπλέον, κανένα από αυτά τα μοντέλα δεν μπορεί να ενσωματώσει όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την εξάπλωση της δασικής πυρκαγιάς. Οι παράγοντες αυτοί είναι: οι καιρικές συνθήκες, και ιδίως η κατεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου, η πολύπλοκη τοπογραφία του τοπίου και η ύπαρξη περιοχών με διαφορετικούς ρυθμούς εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Είναι πολύ δύσκολο να περιγραφεί η δράση όλων αυτών των παραγόντων με τη χρήση μερικών διαφορικών εξισώσεων. Μια τέτοια προσπάθεια θα οδηγήσει πιθανώς σε ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων που θα είναι πολύ δύσκολο να αντιμετωπιστεί. Τα κυτταρικά αυτόματα, που εισήχθησαν για πρώτη φορά από τον von Neumann το 1966, αποτελούν εναλλακτική λύση για τις διαφορικές εξισώσεις και έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στη μοντελοποίηση φυσικών συστημάτων και διαδικασιών. Έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί εκτενώς ως μοντέλα για πολύπλοκα συστήματα και έχουν εφαρμοστεί σε διάφορα φυσικά προβλήματα, όπου εμπλέκονται τοπικές αλληλεπιδράσεις. Λόγω της διακριτής φύσης τους και της καταλληλότητάς τους για εφαρμογή σε ψηφιακούς υπολογιστές, φαίνεται να είναι κατάλληλα για τη μοντελοποίηση της εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών (Karafyllidis & Thanailakis, 1997).

4.2 Φυσικά μοντέλα

Μια από τις πρώτες απόπειρες μοντελοποίησης της πυρκαγιάς έγινε από τον Fons το 1946. Για τη δημιουργία του μοντέλου θεώρησε μια εξιδανικευμένη επιφάνεια από σημεία που ισαπέχουν το ένα από το άλλο. Ο Fons υπολόγισε τον χρόνο που μεσολαβεί ανάμεσα στην ανάφλεξη του νιοστού και του νιοστού συν ένα σημείου λαμβάνοντας υπόψη τη μεταφορά ενέργειας με αγωγιμότητα, συναγωγή και (κατά προσέγγιση) ακτινοβολία. Ο ρυθμός μετάδοσης της φωτιάς μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον χρόνο αυτό. Η θερμοκρασία ανάφλεξης 550°F/288°C συνιστάται για όλα τα ελαφρά δασικά καύσιμα και χρησιμοποιείται στις εξισώσεις του. Το ενδιαφέρον του Fons εστιάζεται στις φυσικές ομοιογενείς περιοχές που δεν είναι τόσο κανονικές όσο η εξιδανικευμένη περιοχή. Εξισώσεις για ετερογενείς περιοχές καυσίμων προέκυψαν επίσης- με τον ίδιο περίπου τρόπο που αντιμετωπίζονται οι παράλληλες αντιστάσεις. Στο μοντέλο Fons, η λογαριθμική εξάρτηση από τη θερμοκρασία, δεν επιδέχεται πειστικό έλεγχο, καθώς οι θερμοκρασίες φλόγας και ανάφλεξης δεν είναι ούτε ευαίσθητα ούτε ισχυρά πειραματικά μεγέθη (Weber, 1991).

Η βασική εξίσωση για το ROS που κατέληξε ο Fons είναι η ακόλουθη:

$$R = \frac{(f_c + f_r)\sigma s}{\rho c_p \ln\left(\frac{T_f - T_\infty}{T_f - T_i}\right)}$$

όπου οι παράμετροι f_c και f_r είναι η εκτιμώμενη αγωγιμότητα του φιλμ για εξαναγκασμένη συναγωγή και ακτινοβολία, αντίστοιχα, T_∞ είναι η αρχική θερμοκρασία του καυσίμου, T_i η θερμοκρασία την i-οστή στιγμή από την έναρξη της πυρκαγιάς, s η απόσταση μεταξύ των διακριτών στοιχείων που σχετίζεται με μετρήσιμα καύσιμα και μεταβλητές της κλίνης καυσίμου, χρησιμοποιώντας γεωμετρικά στοιχεία, και ρc_p οι μέσες τιμές που ισχύουν για καύσιμο υγρό ξύλο.

Ένα μοντέλο εξάπλωσης της πυρκαγιάς πρότεινε και ο Emmons το 1964, στο οποίο η πυρκαγιά παράγει μια ροή ενέργειας οριζόντια σε άκαυστο καύσιμο και στο οποίο η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία μέσω του στρώματος καυσίμου είναι υπεύθυνη για την αύξηση της θερμοκρασίας του άκαυστου καυσίμου μέχρι την ανάφλεξη. Ο Emmons φαίνεται να είναι ο πρώτος ερευνητής που χρησιμοποίησε ένα εκθετικό, για να χαρακτηρίσει την εξασθένιση της ακτινοβολίας από ένα στρώμα καυσίμου. Η εξίσωση

$q(x) = q_0\, e^{-\alpha x}$ περιγράφει αυτή την εκθετική εξάρτηση της ροής ενέργειας q(x) οριζόντια στο άκαυστο καύσιμο και στην οποία η μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας στην κλίνη καυσίμου είναι υπεύθυνη για την αύξηση της θερμοκρασίας του άκαυστου καυσίμου μέχρι την ανάφλεξη. Ενσωματώνοντας τη ζώνη καύσης σε ένα πλαίσιο αναφοράς που κινείται με τη σταθερά διαδιδόμενη πυρκαγιά, προκύπτει μια μη γραμμική εξίσωση για τον ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Προσπάθησε να εφαρμόσει τη λύση της διατύπωσής του σε πρακτικά προβλήματα πυρκαγιάς, όπως το μέγεθος μιας πυρκαγιάς, όταν ξεσπάει. Από το μοντέλο μπορούν να βρεθούν κριτήρια που θα μπορούσαν να παρέχουν πρακτικές συμβουλές στις υπηρεσίες πυρόσβεσης. Δυστυχώς, ούτε ο Emmons ούτε οποιοσδήποτε άλλος ερευνητής έχει επαληθεύσει πειραματικά αυτά τα κριτήρια, προκειμένου να ελέγξει τη δυνατότητά τους να εφαρμοστούν σε πραγματικές καταστάσεις πυρκαγιάς (Weber, 1991).

Στο μοντέλο του Albini η εξάπλωση της πυρκαγιάς σε καύσιμα στην άγρια φύση μοντελοποιείται ως η σταθερή, διαμήκης διάδοση μιας ισοθερμικής επιφάνειας σε θερμοκρασία ανάφλεξης με τη διαδικασία μεταφοράς ακτινοβολίας μέσω ενός ομοιόμορφου στρώματος τυχαία κατανεμημένων, θερμικά λεπτών, ραδιομετρικά μαύρων σωματιδίων καυσίμου. Η ισόθερμη ανάφλεξης θεωρείται ότι είναι ένας τέλειος διάχυτος ακτινοβολητής, όπως και το εξιδανικευμένο επίπεδο φύλλο φλόγας που βρίσκεται πάνω από το στρώμα καυσίμου. Ο αλγόριθμος βρίσκει το πεδίο θερμοκρασίας παντού στο στρώμα καυσίμου, το σχήμα της ισόθερμης ανάφλεξης και τον ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Ο ρυθμός εξάπλωσης της πυρκαγιάς, πολλαπλασιασμένος με τη θερμότητα που απαιτείται για την ανάφλεξη ενός μοναδιαίου όγκου της κλίνης καυσίμου, διαιρεμένος με την ημισφαιρική πυκνότητα ροής ισχύος από την ισόθερμη ανάφλεξης, είναι μια ιδιοτιμή αυτού του προβλήματος. Η προσέγγιση του μοναδιαίου συντελεστή εκπομπής για τα σωματίδια του καυσίμου αποδεικνύεται ότι είναι ισχυρή στη μονοδιάστατη οριακή περίπτωση μιας κλίνης καυσίμου απείρου βάθους. Αυτή η οριακή περίπτωση επιλύεται με διαφορετικό αλγόριθμο που εκμεταλλεύεται την αξονική συμμετρία του πεδίου έντασης ακτινοβολίας και επιτρέπει τη ρητή χρήση της συνάρτησης σκέδασης για τυχαία προσανατολισμένα, κυρτά, ραδιομετρικά γκρίζα, διάχυτα σωματίδια σκέδασης (Albini, 1985).

Στο μοντέλο του Thomas, όπως και σε πολλά άλλα μοντέλα που αναπτύχθηκαν μεταξύ 1960 και 1990, η προσέγγισή στην περιγραφή του φυσικού συστήματος είναι σχεδόν πανομοιότυπη με το μοντέλο του Fons, αλλά διαφέρει στον τρόπο εφαρμογής των θεωρητικών αρχών. Τα περισσότερα από αυτά τα μοντέλα κατασκευάστηκαν σύμφωνα με την υπόθεση της μονοδιάστατης, σταθερής εξάπλωσης της γραμμής πυρκαγιάς, η οποία αναπαρίσταται από μια διεπιφάνεια καύσης και ένα επίπεδο, ορθογώνιο, κεκλιμένο και ισοθερμικό μέτωπο πυρκαγιάς που προχωρεί σε μια ομοιογενή στρώση καυσίμου. Αυτή η κλίνη καυσίμου χαρακτηρίζεται από την περιεκτικότητά της σε υγρασία, τον λόγο συσσώρευσης και τον λόγο επιφάνειας προς όγκο των σωματιδίων που την αποτελούν, τα οποία θεωρήθηκαν ομοιόμορφα κατανεμημένα προς όλες τις κατευθύνσεις. Ειδικά στο μοντέλο του Thomas θεωρήθηκε μια βαθμίδα θερμοκρασίας στο εσωτερικό των σωματιδίων (Pastor, et al., 2003).

Ο Thomas καταλήγει σε τελική λύση που εκφράζεται από την λύση της εξίσωσης:

$$Ax^{-1} + Bx^{-\frac{1}{3}}(1 - e^{-x}) = 1$$

όπου το x σχετίζεται άμεσα με τον ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς R και οι σταθερές A και B σχετίζονται με τις ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας και τις ιδιότητες απορρόφησης θερμότητας της πυρκαγιάς και του στρώματος καυσίμου.

Ο Van Wagner στον Καναδά πρότεινε ένα μοντέλο που περιέχει ορισμένες θεωρητικές εικασίες σχετικές με την πιθανή επίδραση θέρμανσης της ακτινοβολίας φλόγας μπροστά από δασικές πυρκαγιές. Οι μεταβλητές φλόγας που χρησιμοποιούνται είναι ο ρυθμός μετάδοσης, το μήκος, η γωνία κλίσης και η ένταση ακτινοβολίας. Λαμβάνοντας μια απλοποιημένη περίπτωση, προκύπτει μια έκφραση για τη συνολική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα στοιχείο καυσίμου πριν από την ανάφλεξη. Αυτή η ακτινοβολία ισοδυναμεί με την ενέργεια που απαιτείται, για να φτάσει το καύσιμο στη θερμοκρασία ανάφλεξης. Παράλληλα, προκύπτει μια έκφραση για την αναλογία του μήκους της φλόγας προς την ταχύτητα μετάδοσης. Με τη χρήση δημοσιευμένων τύπων που συνδέουν το μήκος της φλόγας με μια κλασματική ισχύ της ενέργειας εξόδου της φωτιάς ανά μονάδα μήκους του μετώπου, μπορεί στη συνέχεια να εκτιμηθεί ο ρυθμός μετάδοσης. Η τελική έκφραση συνδέει τον ρυθμό μετάδοσης, την περιεκτικότητα σε υγρασία καυσίμου και τη γωνία φλόγας με τρόπο που αντιστοιχεί περίπου στην παρατηρούμενη

συμπεριφορά επιφανειακών πυρκαγιών μέτριας έντασης. Το νερό θεωρείται ως «παγωμένη υγρασία», με την υπόθεση ότι απομακρύνεται σε μια διαδικασία δύο σταδίων. Πρώτον, όλο το νερό θερμαίνεται μέχρι το σημείο βρασμού και δεύτερον, όλο το νερό εξατμίζεται στο σημείο βρασμού του. Αυτό δίνει μια καλή εκτίμηση της συνολικής θερμότητας που απαιτείται για την ξήρανση του καυσίμου (Van Wagner, 1967).

Στη Ρωσία ο Grishin εκπόνησε ένα φιλόδοξο και καινοτόμο ερευνητικό πρόγραμμα, με στόχο την ανάπτυξη εντελώς θεωρητικών μοντέλων που θα μπορούσαν να προβλέψουν όλα τα είδη συμπεριφοράς πυρκαγιών σε άγρια εδάφη, συμπεριλαμβανομένων των επιφανειακών πυρκαγιών. Προτείνει ένα μαθηματικό μοντέλο για μια δασική πυρκαγιά που οδηγείται από τον άνεμο, το οποίο αντιπροσωπεύει τις βασικές φυσικοχημικές διαδικασίες θέρμανσης, ξήρανσης, πυρόλυσης και καύσης. Αναγνωρίζει αποτελέσματα πειραματικών μελετών και στο γενικό μαθηματικό μοντέλο, χρησιμοποιεί θερμοφυσικές, οπτικές και αντιδραστικές ιδιότητες ενός μέσου στη ζώνη δασικής πυρκαγιάς. Παράλληλα, προβάλλονται δισδιάστατες και αξονικές ροές στο στρώμα της ατμόσφαιρας κοντά στο έδαφος κατά τη διάρκεια της καύσης. Επίσης, μελετά τις συνθήκες που περιορίζουν την εξάπλωση των δασικών πυρκαγιών και προτείνει, με βάση αυτά που περιγράφει το μοντέλο, νέες μεθόδους αντιμετώπισης τους (Grishin, 1997).

Στην Αυστραλία από μια ομάδα επιστημόνων προτάθηκε ένα φυσικό μοντέλο που περιγράφει την ομοιόμορφη διάδοση ενός επίπεδου μετώπου πυρκαγιάς μέσα σε ένα τυχαία στοιβαγμένο οριζόντιο στρώμα καυσίμου από θερμικά λεπτά κυτταρινούχα νήματα. Το μοντέλο υποθέτει ότι δεν υπάρχει περιβαλλοντικός άνεμος, και λαμβάνονται εκφράσεις για το ρυθμό εξάπλωσης του μετώπου φλόγας προς τα εμπρός και την κατανομή της επιφανειακής θερμοκρασίας του άκαυστου καυσίμου μπροστά από τη φωτιά. Το μοντέλο δοκιμάστηκε σε εργαστηριακή πυρκαγιά. Εάν συμπεριληφθούν μόνο οι εισροές ακτινοβολίας, ο προβλεπόμενος ρυθμός εξάπλωσης είναι δεκατρείς φορές μεγαλύτερος από τη μετρούμενη τιμή. Η συμπερίληψη της ψύξης με συναγωγή οδηγεί σε συμφωνία του ρυθμού εξάπλωσης. Το προβλεπόμενο προφίλ θερμοκρασίας άκαυστου καυσίμου συγκρίνεται στη συνέχεια αρκετά καλά με τις παρατηρούμενες τιμές. Η μοντελοποίηση της εξάπλωσης της επιφανειακής πυρκαγιάς είναι ένα από τα σημαντικότερα θέματα που απασχολούν το μοντέλο αυτό. Χρησιμοποιεί μια σειρά

εξισώσεων που συνδέουν περιβαλλοντικές παραμέτρους με μεταβλητές συμπεριφοράς της πυρκαγιάς, όπως έχουν προκύψει από παρατηρήσεις αρκετών ετών. Οι εκφράσεις για τον ρυθμό εξάπλωσης, την ένταση της πυρκαγιάς και την κατανάλωση καυσίμου προκύπτουν από τα φυσικά χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης και του τοπίου, καθώς και από τις καιρικές συνθήκες (de Mestre, et al., 1989).

Στη Γαλλία οι Santoni και Balbi πρότειναν ένα δισδιάστατο μη σταθερό μοντέλο εξάπλωσης της φωτιάς σε ένα στρώμα καυσίμου, το οποίο λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις της κλίσης. Πρόκειται για μια πρωτότυπη μέθοδο ικανή να συνδέσει το αέριο μέσο και την κλίνη καυσίμου. Το θερμικό ισοζύγιο που παράγεται από τη φαινομενολογική προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή του μονοδιάστατου φυτικού μέσου διατηρήθηκε σταθερό και συνδυάστηκε με ένα μοντέλο φλόγας διάχυσης. Για το αέριο μέσο σε δύο διαστάσεις, το σύστημα των κυβερνητικών εξισώσεων αποτελείται από το μοντέλο ορμής και κλάσματος μίγματος Navier Stokes. Το μοντέλο φύλλου φλόγας χρησιμοποιείται για την περιγραφή της χημικής αντίδρασης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τον προσδιορισμό του σχήματος της φλόγας και την έκφραση της θερμότητας που μεταφέρεται προς την κατεύθυνση του άκαυτου στρώματος με βάση την υπολογισμένη γωνία κλίσης και τη θερμοκρασία της φλόγας. Η μελέτη αναφέρεται σε μια δισδιάστατη προσέγγιση για να περιοριστεί ο χρόνος υπολογισμού. Ωστόσο, η επέκταση σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο δεν θα παρουσίαζε εγγενείς δυσκολίες.

Στόχος της ερευνητικής ομάδας ήταν η δημιουργία ενός προσομοιωτή που θα μπορεί να περιγράφει την εξάπλωση μιας δασικής πυρκαγιάς, ώστε να βοηθά τους πυροσβέστες που αντιμετωπίζουν μια πυρκαγιά να λαμβάνουν τις κατάλληλες αποφάσεις. Πράγματι, το κύριο πρόβλημα στον συντονισμό των προσπαθειών δασοπυρόσβεσης είναι ο καθορισμός της καταλληλότερης στρατηγικής κατά την αντιμετώπιση πολλαπλών πυρκαγιών που δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν ταυτόχρονα. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί γρήγορα η κατά προσέγγιση εξέλιξη κάθε μιας από τις εμπλεκόμενες εστίες. Για τον σκοπό αυτό, ο προσομοιωτής πρέπει να χαρακτηρίζεται από σύντομο χρόνο υπολογισμού. Αυτό απαιτεί ένα απλό μοντέλο ικανό να προβλέψει τα βασικά χαρακτηριστικά μιας πυρκαγιάς και μια αριθμητική μέθοδο επίλυσης που να συνάδει με το προαναφερθέν κριτήριο της ταχύτητας. Για να ενισχυθεί η επικύρωση του μοντέλου

εξάπλωσης της πυρκαγιάς, είναι αναγκαία διάφορα μελλοντικά πειράματα, όπως πειράματα ανάφλεξης γραμμής με άνεμο και πειράματα με μεγαλύτερο μήκος στρώματος καύσιμης ύλης. Αυτά θα βοηθούσαν στην ακριβέστερη αναπαράσταση του αναμενόμενου κυρτού σχήματος του μετώπου της πυρκαγιάς. (Santoni & Balbi, 1998).

Πίνακας 1: Χώρες προέλευσης φυσικών μοντέλων προσομοίωσης πυρκαγιάς

Φυσικό Μοντέλο	Χώρα προέλευσης
Fons	ΗΠΑ
Emmons	ΗΠΑ
Albini	ΗΠΑ
Thomas	Ηνωμένο Βασίλειο
Van Wagner	Καναδάς
Grishin	Ρωσία
de Mestre	Αυστραλία
Santoni & Balbi	Γαλλία

4.3 Μοντέλα προσομοίωσης με χρήση πολλαπλών κλιμάκων

Τα μοντέλα προσομοίωσης πυρκαγιάς με χρήση πολλαπλών κλιμάκων ενσωματώνουν, τόσο φυσικά όσο και εμπειρικά δεδομένα για την αποτελεσματική προσομοίωση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Τα μοντέλα αυτά εφαρμόζουν μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν την εξάπλωση της πυρκαγιάς με βάση φυσικές αρχές, όπως η αρχή του Huygens για τη διάδοση των κυμάτων. Συνήθως χρησιμοποιούν εμπειρικά δεδομένα από προηγούμενες μελέτες και παρατηρήσεις, για να ενημερώνουν τις προσομοιώσεις τους. Οι βασικές παράμετροι για την εξάπλωση της πυρκαγιάς που δημιουργούνται περιέχουν πληροφορίες, οι οποίες προέρχονται τόσο από φυσικές αρχές όσο και από εμπειρικές παρατηρήσεις. Σαν βασικό στόχο έχουν την κατανόηση των πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων που μπορούν να εμφανιστούν σε σενάρια του πραγματικού κόσμου και τα οποία προσομοιώνονται με τη χρήση φυσικών μοντέλων που μένει όμως να επαληθευθούν και σε πραγματικές συνθήκες (Finney, 1998).

Η επαλήθευση των μοντέλων αυτών είναι σημαντική και συνήθως γίνεται με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξάγονται από το μοντέλο με δεδομένα πυρκαγιών του πραγματικού κόσμου και με άλλα μοντέλα προσομοίωσης. Αυτή η διαδικασία επαλήθευσης διασφαλίζει ότι οι προβλέψεις του μοντέλου που βασίζονται σε εμπειρικά στοιχεία, βελτιώνουν την ακρίβεια του μοντέλου, αφού στην ουσία επικυρώνεται η σωστή πρόβλεψή του, αυξάνοντας έτσι την εμπιστοσύνη στις ικανότητές του για την υποστήριξη αποφάσεων. Προκύπτει έτσι η ανάγκη για συνεχή έρευνα για την τελειοποίηση των παραμέτρων εισόδου και την ενίσχυση της εμπειρικής επικύρωσης. Με την ενσωμάτωση λεπτομερέστερων και σχετικών εμπειρικών δεδομένων, στοχεύουν στη βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεών του σχετικά με τη συμπεριφορά της φωτιάς σε διάφορα πλαίσια (Tymstra, et al., 2010).

4.4 Μοντέλα βασισμένα σε GIS δεδομένα

Τα μοντέλα προσομοίωσης πυρκαγιάς αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) για την ενσωμάτωση χωρικών δεδομένων, όπως το υψόμετρο, η κλίση, η όψη και οι τύποι καύσιμης ύλης. Αυτά τα χωρικά δεδομένα είναι ζωτικής σημασίας για την ακριβή προσομοίωση του τρόπου εξάπλωσης της πυρκαγιάς σε διαφορετικά εδάφη και τύπους βλάστησης. Η προσομοίωση απαιτεί διάφορες παραμέτρους εισόδου, συμπεριλαμβανομένων μετεωρολογικών δεδομένων (θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου, βροχόπτωση) και δεδομένων γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, όπως η κάλυψη θόλου, το μοντέλο καύσιμης ύλης κ.ά.. Οι εισροές αυτές βοηθούν στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς υπό συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες (Shruti & Kumar Singh, 2017).

Τα συστήματα αυτά μπορούν να περιλαμβάνουν διάφορους τύπους πληροφοριών εκτός από τους παραπάνω, όπως εικόνες Landsat-TM και τύπους εδάφους. Η ολοκληρωμένη συλλογή δεδομένων οδηγεί στη δημιουργία μιας ισχυρής βάσης δεδομένων που μπορεί να ενημερώνει για τις αποφάσεις διαχείρισης πυρκαγιών. Επίσης, μπορούν να μοντελοποιηθούν βιοφυσικές διαβαθμίσεις, οι οποίες βοηθούν στην κατανόηση των οικολογικών χαρακτηριστικών των διαφόρων τοπίων. Αυτή η μοντελοποίηση είναι χρήσιμη για την πρόβλεψη του τρόπου με τον οποίο αυτά τα τοπία μπορούν να ανταποκριθούν στη φωτιά και σε άλλες διαταραχές. Με τη χρήση των GIS μπορεί να γίνει περιοδική ενημέρωση των στρωμάτων καύσιμης ύλης και βλάστησης ως απάντηση,

τόσο στις ανθρωπογενείς όσο και στις φυσικές διαταραχές, διασφαλίζοντας ότι τα δεδομένα παραμένουν επίκαιρα και συναφή με τις τρέχουσες ανάγκες διαχείρισης των πυρκαγιών (Ryan & Opperman, 2013).

4.5 Υβριδικά μοντέλα

Τα μοντέλα συμπεριφοράς και χαρακτηρισμού πυρκαγιάς αυτού του τύπου ενσωματώνουν τόσο φυσικά όσο και εμπειρικά μοντέλα, για να ενισχύσουν τις προγνωστικές τους ικανότητες. Ο συνδυασμός των μοντέλων έχει σαν στόχο τα μοντέλα να παρέχουν μια φυσική βάση για την κατανόηση της δυναμικής της πυρκαγιάς, συμπεριλαμβανομένου του τρόπου με τον οποίο η φωτιά εξαπλώνεται μέσα από διαφορετικούς τύπους βλάστησης και υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Σε κάθε περίπτωση, καλό είναι να λαμβάνονται υπόψη οι δυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ της φωτιάς και του περιβάλλοντός της. Συνήθως, τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν εμπειρικά δεδομένα, για να βελτιώσουν τις προβλέψεις τους, όπως δεδομένα σχετικά με την ένταση της πυρκαγιάς, τον τύπο βλάστησης, τον τύπο καυσίμου, το ύψος της φλόγας και άλλα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς που μπορούν να συγκεντρωθούν από προηγούμενα συμβάντα πυρκαγιάς. Με την ανάλυση ιστορικών δεδομένων μπορούν να βελτιώσουν την ακρίβειά τους στην πρόβλεψη των αποτελεσμάτων διαφορετικών σεναρίων διαχείρισης πυρκαγιών.

Πολλές φορές πέρα από τα βασικά μοντέλα συμπεριφοράς πυρκαγιάς, ενσωματώνουν και διάφορα άλλα μοντέλα που αφορούν συγκεκριμένα φαινόμενα που σχετίζονται με τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση επιτρέπει να προσομοιώνονται αποτελεσματικότερα πολύπλοκα σενάρια πυρκαγιάς, συνδυάζοντας τη θεωρητική γνώση με παρατηρήσεις του πραγματικού κόσμου. Παράλληλα θα επιτρέψουν την ενσωμάτωση αναδυόμενων τεχνολογιών, όπως η τηλεπισκόπηση και η προηγμένη ανάλυση δεδομένων, όταν αναπτυχθούν αρκετά, για να ενισχύσουν τις προγνωστικές δυνατότητες του μοντέλου. Αυτή η ενσωμάτωση θα βοηθήσει ώστε τα δεδομένα εισόδου, που είναι κρίσιμα για τη σωστή λειτουργία του μοντέλου, να είναι χωρικά και χρονικά ακριβή ώστε να ανταποκρίνονται στην απαιτούμενη ακρίβεια εξόδου.

Συνοψίζοντας θα μπορούσαμε να πούμε ότι συνδυάζουν αποτελεσματικά φυσικά και εμπειρικά μοντέλα, αξιοποιώντας καθιερωμένες θεωρίες συμπεριφοράς πυρκαγιάς, τις οποίες τροποποιούν για δυναμικές συνθήκες, με την ενσωμάτωση εμπειρικών δεδομένων,

και ενσωματώνοντας πρόσθετα μοντέλα, ώστε να παρέχουν ολοκληρωμένα εργαλεία για τη διαχείριση του κινδύνου πυρκαγιάς (Tolhurst, et al., 2008).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα μοντέλα προσομοίωσης πυρκαγιάς και κατατάσσονται στον αντίστοιχο τύπο.

Πίνακας 2: Μοντέλα προσομοίωσης πυρκαγιάς

Τύπος	Μοντέλα
Εμπειρικά και ημι-εμπειρικά	Rothermel, FBP (Forest Fire Behavior System), Cellural Automata
Φυσικά	Fons, Emmons, Albini, Thomas, Van Wagner, Grishin, de Mestre, Santoni & Balbi
Προσομοίωσης με χρήση πολλαπλών κλιμάκων	Finney, Tymstra
Βασισμένα σε GIS δεδομένα	Shruti &Kumar Singh, Ryan & Opperman
Υβριδικά	Bushfire

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

5.1 Prometheus

Το σύστημα Prometheus προέρχεται από την Καναδική Δασική Υπηρεσία και αναπτύχθηκε ειδικά για χρήση από υπηρεσίες διαχείρισης πυρκαγιών και ερευνητές πυρκαγιών σε ολόκληρο τον Καναδά. Πρόκειται για ένα ντετερμινιστικό μοντέλο προσομοίωσης της ανάπτυξης πυρκαγιάς που ενσωματώνει διάφορα χωρικά δεδομένα εισόδου, συμπεριλαμβανομένης της τοπογραφίας, των τύπων καύσιμης ύλης και των καιρικών συνθηκών, για την ακριβή πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Το μοντέλο χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνικές όπως η αρχή της διάδοσης των κυμάτων του Huygens και έχει σχεδιαστεί, για να βοηθήσει τους διαχειριστές πυρκαγιών να κατανοήσουν τις πιθανές συνέπειες των αποφάσεών τους σχετικά με τη διαχείριση των πυρκαγιών. Επιπλέον, το Prometheus αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου πλαισίου που περιλαμβάνει εφαρμογές, όπως η Pandora και το Pegasus, οι οποίες διευκολύνουν τις λειτουργίες δέσμης και την απομακρυσμένη πρόσβαση για το προσωπικό διαχείρισης πυρκαγιών.

Το σύστημα Prometheus λειτουργεί μέσω μιας δομημένης προσέγγισης που ενσωματώνει διάφορα συστατικά μέρη για την αποτελεσματική προσομοίωση της ανάπτυξης της πυρκαγιάς. Τα κυριότερα από αυτά τα μέρη που καθορίζουν και τον τρόπο λειτουργίας του είναι:

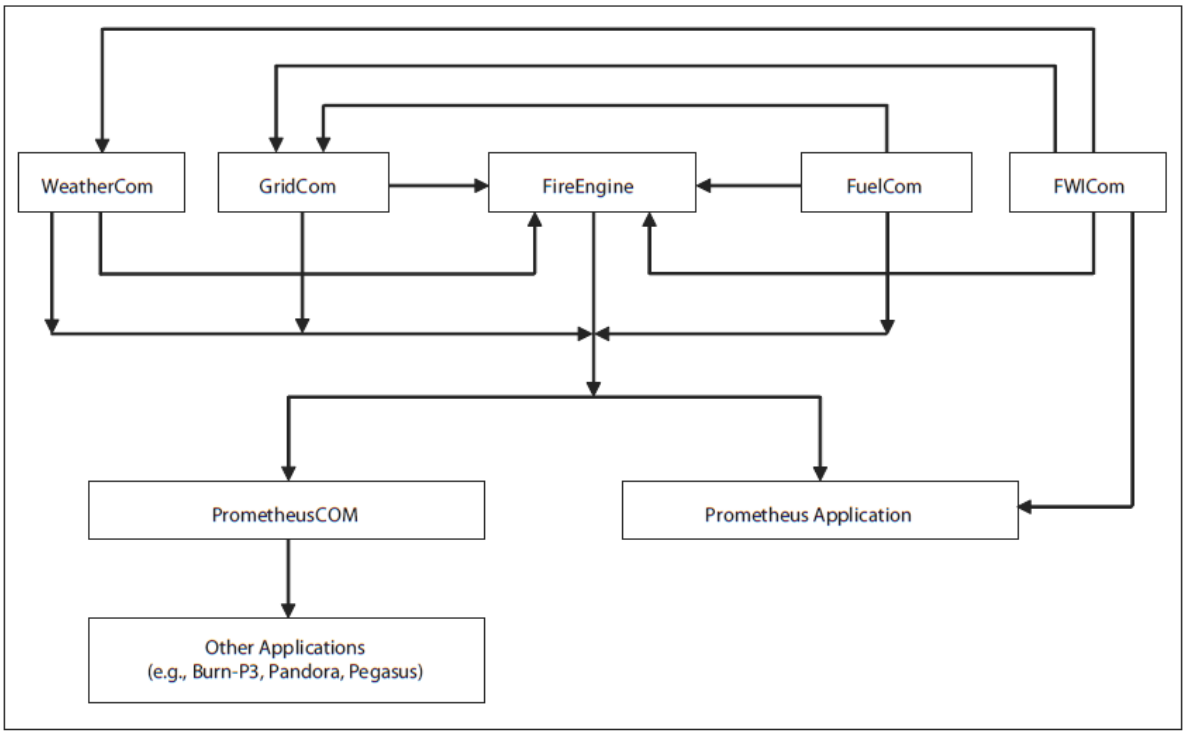
- **Αρχιτεκτονική βασισμένη σε συστατικά μέρη**: Το μοντέλο βασίζεται σε μια αρχιτεκτονική λογισμικού, βασισμένη σε υποστοιχεία, γνωστή ως COM (Component Object Model), η οποία επιτρέπει την αρθρωτή ανάπτυξη και την επαναχρησιμοποίηση στοιχείων. Αυτή η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει διάφορες ενότητες που διαχειρίζονται διάφορες πτυχές της προσομοίωσης πυρκαγιάς, όπως η καύσιμη ύλη, η τοπογραφία, ο καιρός και η συμπεριφορά της πυρκαγιάς.
- **Εισαγωγή δεδομένων**: Το Prometheus απαιτεί χωρικά δεδομένα εισόδου, τα οποία περιλαμβάνουν τοπογραφικά χαρακτηριστικά (όπως κλίση, όψη και υψόμετρο),

τύπους καυσίμων και καιρικές συνθήκες. Τα δεδομένα αυτά είναι ζωτικής σημασίας για την ακριβή προσομοίωση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς.

- **Προσομοίωση ανάπτυξης πυρκαγιάς**: Το μοντέλο εφαρμόζει την αρχή του Huygens για τη διάδοση των κυμάτων, για να προβλέψει τον ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Η αρχή αυτή βοηθά στον υπολογισμό του τρόπου με τον οποίο η φωτιά κινείται σε διαφορετικά εδάφη και μέσα από διάφορους τύπους καύσιμης ύλης, επιτρέποντας λεπτομερείς προβλέψεις της περιμέτρου της φωτιάς σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.
- **Έξοδος συμπεριφοράς πυρκαγιάς**: Καθώς εκτελείται η προσομοίωση, το Prometheus παράγει εξόδους που περιλαμβάνουν λεπτομερείς περιμέτρους πυρκαγιάς και αντίστοιχες μετρικές συμπεριφοράς πυρκαγιάς. Κάθε ενεργή κορυφή κατά μήκος της περιμέτρου πυρκαγιάς συνδέεται με συγκεκριμένα δεδομένα συμπεριφοράς της πυρκαγιάς, τα οποία μπορούν να εξαχθούν για χρήση σε γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS).
- **Αρθρωτή λειτουργικότητα**: Το μοντέλο αποτελείται από πολλαπλές ενότητες, όπως το FuelCom για δεδομένα καυσίμων, το WeatherCom για δεδομένα καιρού και το FireEngine για υπολογισμούς ανάπτυξης πυρκαγιάς. Αυτή η αρθρωτή δομή επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση και επεξεργασία δεδομένων κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων.
- **Διεπαφή χρήστη και ενσωμάτωση**: Η ενότητα PrometheusCOM παρέχει μια διεπαφή προγραμματισμού υψηλότερου επιπέδου, διευκολύνοντας τις υπηρεσίες να αναπτύξουν τις δικές τους διεπαφές χρήστη ή να ενσωματώσουν το Prometheus με άλλες εφαρμογές, ενισχύοντας τη χρηστικότητά του σε σενάρια διαχείρισης πυρκαγιών.

Συνολικά, το μοντέλο Prometheus συνδυάζει προηγμένες υπολογιστικές τεχνικές με ολοκληρωμένες εισροές δεδομένων για την παροχή ακριβών προβλέψεων της ανάπτυξης πυρκαγιάς, βοηθώντας στην αποτελεσματική διαχείριση πυρκαγιών και τη λήψη αποφάσεων.

Σχεδιάγραμμα 2: Η αρχιτεκτονική του Prometheus Common Object Model (COM).



Το σύστημα Prometheus, αν και χρήσιμο για την προσομοίωση της ανάπτυξης της πυρκαγιάς, έχει αρκετούς περιορισμούς που οι χρήστες πρέπει να γνωρίζουν:

- **Σφάλμα μοντέλου**: Το μοντέλο μπορεί να μην παράγει πάντα εξόδους που ευθυγραμμίζονται με την παρατηρούμενη ανάπτυξη πυρκαγιάς. Σημαντικές αποκλίσεις στην έκταση και το σχήμα μπορεί να προκύψουν λόγω εγγενών σφαλμάτων του μοντέλου, τα οποία μπορεί να επηρεάσουν την αξιοπιστία των προσομοιώσεων.
- **Σφάλμα χρήστη**: Οι χρήστες ενδέχεται να εισάγουν λάθος δεδομένα, παρερμηνεύοντας τις παραδοχές και τους περιορισμούς του μοντέλου. Για παράδειγμα, το Prometheus υποθέτει ότι ολόκληρη η περίμετρος της πυρκαγιάς, είτε καίγεται ενεργά είτε όχι, παραμελώντας άλλες καταστάσεις, όπως η πυρκαγιά που σιγοκαίει. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβείς προσομοιώσεις, εάν οι χρήστες δεν αναγνωρίζουν αυτούς τους περιορισμούς.
- **Σφάλμα δεδομένων**: Η ακρίβεια του μοντέλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων εισόδου. Εάν χρησιμοποιηθούν λανθασμένα δεδομένα,

ρυθμίσεις ή παράμετροι, οι έξοδοι ενδέχεται να είναι άκυρες. Αυτό περιλαμβάνει τη χρήση μη τυποποιημένων τύπων καυσίμων, οι οποίοι μπορούν να αλλοιώσουν σημαντικά τα αποτελέσματα.

- **Υποθέσεις σταθερών συνθηκών:** Το μοντέλο λειτουργεί με την παραδοχή σταθερών καιρικών συνθηκών, οι οποίες ενδέχεται να μην αντικατοπτρίζουν τα σενάρια του πραγματικού κόσμου, όπου ο καιρός μπορεί να αλλάξει γρήγορα. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των προβλέψεων εξάπλωσης της πυρκαγιάς.
- **Έλλειψη εμπειρικής υποστήριξης για τις προσαρμογές**: Οι χρήστες μπορούν να τροποποιήσουν τις προεπιλεγμένες παραμέτρους εισόδου (όπως το ύψος βάσης κόμης και το φορτίο καυσίμου κόμης), αλλά συχνά υπάρχει έλλειψη εμπειρικών δεδομένων για την υποστήριξη αυτών των αλλαγών. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω ανακρίβειες στις προβλέψεις του μοντέλου.
- **Θέματα γενικευσιμότητας**: Το μοντέλο μπορεί να μην είναι εφαρμόσιμο σε όλα τα σενάρια, ιδίως σε τοπία με ποικίλους τύπους καυσίμων. Η πολυπλοκότητα της ακριβούς μοντελοποίησης διαφόρων τύπων καυσίμων μπορεί να περιορίσει την αποτελεσματικότητα του μοντέλου σε ορισμένα περιβάλλοντα.
- **Διασφάλιση ποιότητας**: Τα μοντέλα που δεν έχουν επικυρωθεί ή δοκιμαστεί για τη διασφάλιση της ποιότητας θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή. Οι χρήστες δεν πρέπει να υποθέτουν ότι όλα τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι σωστά, καθώς αυτό μπορεί να οδηγήσει σε κακή λήψη αποφάσεων στη διαχείριση πυρκαγιών.

Αυτοί οι περιορισμοί υπογραμμίζουν τη σημασία της κατανόησης των περιορισμών του μοντέλου Prometheus, για να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική εφαρμογή του σε σενάρια διαχείρισης πυρκαγιών.

Λόγω των παραπάνω περιορισμών και για τη βελτίωση του μοντέλου χρειάζεται επικύρωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου σε σχέση με γεγονότα πυρκαγιάς στον πραγματικό κόσμο. Αυτό θα βοηθήσει στην αξιολόγηση της ακρίβειας του μοντέλου και στη βελτίωση των προβλέψεών του με βάση εμπειρικά δεδομένα. Άλλη μια παράμετρος που επιδέχεται βελτίωση αποτελούν τα δεδομένα εισόδου. Υπάρχει ανάγκη να συγκεντρωθούν περισσότερα εμπειρικά δεδομένα για να υποστηριχθούν οι προσαρμογές

των παραμέτρων εισόδου, όπως το ύψος βάσης κόμης και το φορτίο καύσιμης ύλης της κόμης. Αυτό θα βελτίωνε την αξιοπιστία και τη δυνατότητα εφαρμογής του μοντέλου σε διάφορα σενάρια πυρκαγιάς Επίσης, η ενσωμάτωση δεδομένων καιρού σε πραγματικό χρόνο στο μοντέλο θα μπορούσε να βελτιώσει τις προγνωστικές του ικανότητες. Δεδομένου ότι το τρέχον μοντέλο υποθέτει σταθερές καιρικές συνθήκες, η προσαρμογή του, ώστε να λαμβάνει υπόψη τις μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες, θα το καθιστούσε πιο εφαρμόσιμο σε πραγματικές καταστάσεις: Παράλληλα, η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εξετάσει την ανάπτυξη πιο ολοκληρωμένων ταξινομήσεων τύπων καυσίμων. Αυτό θα αντιμετώπιζε τους περιορισμούς του τρέχοντος πλέγματος τύπων καυσίμων και θα βελτίωνε την ακρίβεια του μοντέλου σε διαφορετικά τοπία. Τέλος, η διερεύνηση άλλων προσεγγίσεων μοντελοποίησης ή η ενσωμάτωση διαφορετικών τεχνικών προσομοίωσης θα μπορούσε να προσφέρει πληροφορίες για τη βελτίωση του μοντέλου Prometheus. Με την κατάλληλη προσαρμογή θα μπορούσε να οδηγήσει στην ανάπτυξη υβριδικών μοντέλων που αξιοποιούν τα πλεονεκτήματα διαφόρων μεθοδολογιών (Tymstra, et al., 2010).

5.2 Farsite

Το FARSITE ή Fire Area Simulator, είναι ένα μοντέλο προσομοίωσης της ανάπτυξης πυρκαγιάς που δημιουργήθηκε από την Υπηρεσία Δασών των Ηνωμένων Πολιτειών (U.S. Forest Service) και χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της εξάπλωσης των πυρκαγιών, την υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων κατά τη διάρκεια πυρκαγιών, καθώς και για προληπτικό σχεδιασμό. Ενσωματώνει διάφορα υφιστάμενα μοντέλα που σχετίζονται με διαφορετικούς τύπους συμπεριφοράς πυρκαγιάς, συμπεριλαμβανομένης της επιφανειακής πυρκαγιάς, της πυρκαγιάς κόμης, της επιτάχυνσης πυρκαγιάς από σημειακή πηγή, της κηλίδωσης και της υγρασίας της καύσιμης ύλης. Η ενσωμάτωση αυτή επιτρέπει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την κατανόηση της δυναμικής της πυρκαγιάς. Η απόδοση του μοντέλου αξιολογείται υπό απλουστευμένες συνθήκες δοκιμής πράγμα που υποδηλώνει ότι το μοντέλο έχει δοκιμαστεί σε ελεγχόμενα σενάρια, ώστε να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα και η αξιοπιστία του στην προσομοίωση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Η τεκμηρίωση του τρόπου κατασκευής του FARSITE και της απόδοσης των επιμέρους μοντέλων συμπεριφοράς πυρκαγιάς προορίζεται να είναι χρήσιμη, τόσο για τους ερευνητές όσο και για τους επαγγελματίες διαχείρισης

πυρκαγιών. Αυτό δείχνει ότι το μοντέλο δεν είναι μόνο ένα θεωρητικό εργαλείο, αλλά έχει επίσης πρακτικές εφαρμογές στη διαχείριση και την έρευνα για τις πυρκαγιές στον πραγματικό κόσμο.

Χρησιμοποιεί μια τεχνική διανυσματικής διάδοσης για την επέκταση της περιμέτρου της πυρκαγιάς, η οποία ελέγχει τη χωρική και χρονική ανάλυση της ανάπτυξης της πυρκαγιάς στο τοπίο. Η τεχνική αυτή επιτρέπει μια πιο ακριβή αναπαράσταση του τρόπου εξάπλωσης της πυρκαγιάς στο χώρο και στο χρόνο. Οι κορυφές των πολυγώνων που παράγονται από το μοντέλο περιέχουν κρίσιμες πληροφορίες σχετικές με τον ρυθμό εξάπλωσης και την ένταση της πυρκαγιάς. Τα δεδομένα αυτά, στη συνέχεια, παρεμβάλλονται για τη δημιουργία χαρτών ράστερ που αναπαριστούν οπτικά τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς, διευκολύνοντας την ανάλυση και την κατανόηση της δυναμικής της εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Η συμπεριφορά της πυρκαγιάς σε κάθε κορυφή θεωρείται ανεξάρτητη από άλλες, πράγμα που σημαίνει ότι το μοντέλο επικεντρώνεται στις αυστηρές χωρικές συνέπειες της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων τμημάτων της πυρκαγιάς. Το μοντέλο μπορεί να παράγει πολύπλοκα πρότυπα ανάπτυξης και συμπεριφοράς της πυρκαγιάς λόγω των χωρικών και χρονικών εξαρτήσεων που ενυπάρχουν στην προσομοίωση. Αυτή η πολυπλοκότητα αντικατοπτρίζει τη δυναμική της εξάπλωσης της πυρκαγιάς στον πραγματικό κόσμο, η οποία μπορεί να επηρεάζεται από διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

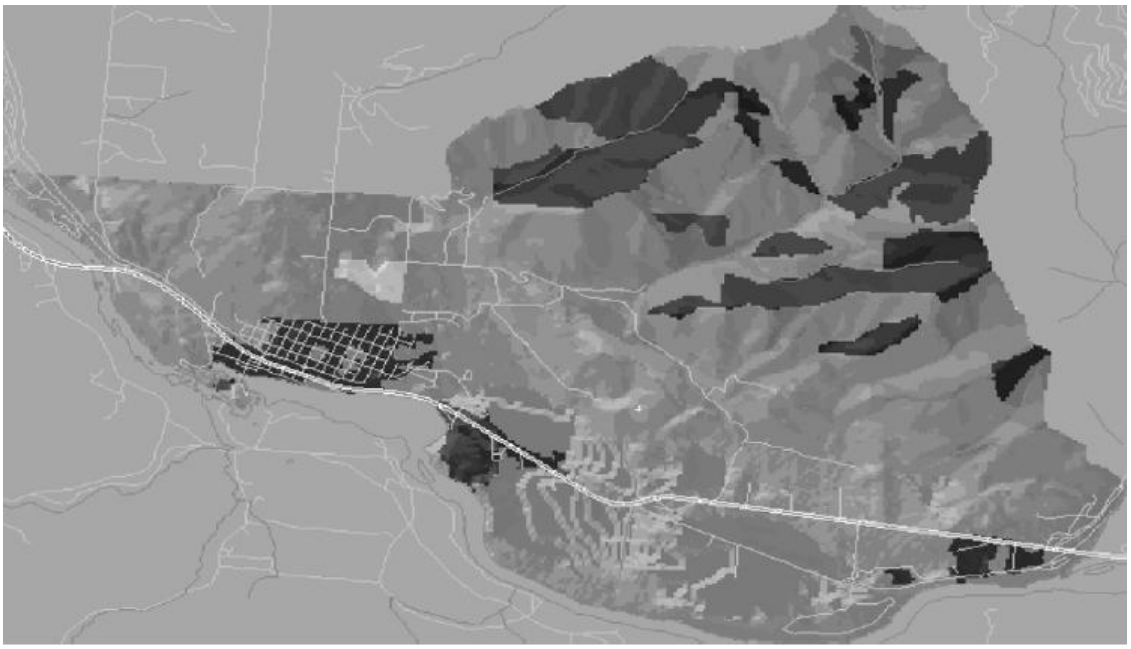
Ο πυρήνας της λειτουργικότητας του FARSITE έγκειται στην τεχνική διανυσματικής διάδοσης. Η μέθοδος αυτή ελέγχει τη χωρική και χρονική ανάλυση της ανάπτυξης της πυρκαγιάς, επιτρέποντας στο μοντέλο να παράγει διανυσματικές περιμέτρους πυρκαγιάς (πολύγωνα) σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα. Οι κορυφές αυτών των πολυγώνων παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες σχετικές με τον ρυθμό εξάπλωσης και την ένταση της πυρκαγιάς. Το μοντέλο υπολογίζει τις θέσεις της περιμέτρου της πυρκαγιάς με βάση την αρχή του Huygens για τη διάδοση των κυμάτων. Η αρχή αυτή επιτρέπει την προσομοίωση της ανάπτυξης της πυρκαγιάς ως κύματος, όπου η πυρκαγιά εξαπλώνεται προς τα έξω από το σημείο ανάφλεξης. Χρησιμοποιείται μια διαφορική εξίσωση για τη διάδοση των περιμέτρων πυρκαγιάς χρησιμοποιώντας ένα ελλειπτικό σχήμα πυρκαγιάς. Το μοντέλο χρησιμοποιεί τις κορυφές του πολυγώνου της περιμέτρου της πυρκαγιάς ως

σημεία διάδοσης, γεγονός που βοηθά στην ακριβή μοντελοποίηση του τρόπου εξάπλωσης της πυρκαγιάς στο τοπίο.

Το FARSITE χρησιμοποιεί, επίσης, κυψελοειδή μοντέλα για την προσομοίωση της ανάπτυξης της πυρκαγιάς. Υπολογίζει τον χρόνο που χρειάζεται η φωτιά, για να ταξιδέψει μεταξύ γειτονικών κελιών σε ένα πλέγμα, γεγονός που βοηθά στην κατανόηση του τρόπου εξάπλωσης της φωτιάς με πιο δομημένο τρόπο. Το μοντέλο μπορεί να προσαρμοστεί για γεωμετρικές στρεβλώσεις, λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλά γειτονικά κελιά, βελτιώνοντας έτσι την ακρίβεια. Για τη σωστή λειτουργία του απαιτούνται δεδομένα εισόδου, όπως η ταχύτητα του ανέμου, οι τύποι καύσιμης ύλης και η τοπογραφία, τα οποία συνήθως αναλύονται χωρικά σε περίπου 30 μέτρα. Ωστόσο, το μοντέλο αναγνωρίζει ότι η κλίμακα αυτή μπορεί να είναι πιο χονδροειδής από τις πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των προβλέψεων της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Ως εκ τούτου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υποκειμενικοί συντελεστές προσαρμογής του ρυθμού εξάπλωσης για τη βαθμονόμηση του μοντέλου με την πραγματική ανάπτυξη της πυρκαγιάς. Το FARSITE λειτουργεί υπό ορισμένες παραδοχές, όπως η ανεξαρτησία της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς σε κάθε κορυφή. Ενώ αυτό απλοποιεί τους υπολογισμούς, μπορεί να μην αποτυπώνει πλήρως την πολυπλοκότητα των αλληλεπιδράσεων των πυρκαγιών στον πραγματικό κόσμο. Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου μπορεί να μειωθεί κάτω από ετερογενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως ποικίλες ταχύτητες ανέμου και επίπεδα υγρασίας της καύσιμης ύλης.

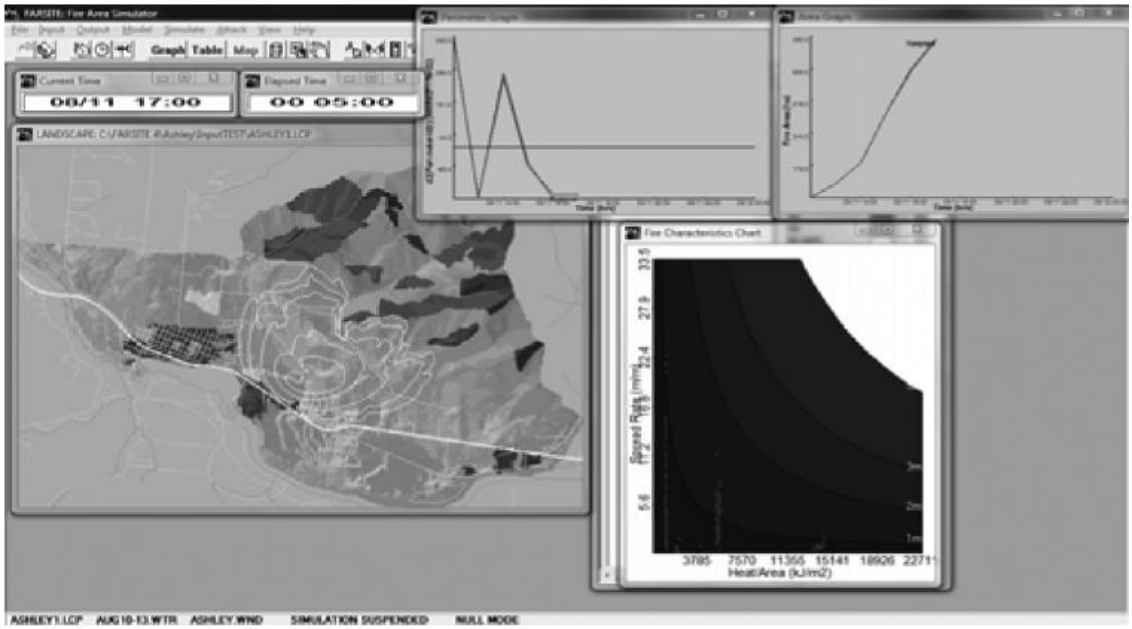
Ένας σημαντικός περιορισμός είναι ότι τείνει να υπερπροβλέπει τα ποσοστά εξάπλωσης της πυρκαγιάς σε όλα τα μοντέλα καύσιμης ύλης. Αυτή η ασυμφωνία υποδηλώνει πιθανά ζητήματα στον τρόπο με τον οποίο το μοντέλο συσχετίζει την ταχύτητα του ανέμου με τις διαστάσεις εξάπλωσης της πυρκαγιάς, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ανακρίβειες στις προσομοιώσεις. Επίσης η απόδοση του μοντέλου μπορεί να τεθεί σε κίνδυνο από ανακριβή δεδομένα εισόδου σχετικά με την υγρασία της καύσιμης ύλης, τις περιγραφές της καύσιμης ύλης και τις καιρικές συνθήκες. Αυτές οι ανακρίβειες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τους υπολογισμούς των ρυθμών εξάπλωσης της πυρκαγιάς, ιδίως σε πολύπλοκα τοπία: Το μοντέλο υποθέτει ότι τα σχήματα πυρκαγιάς σε συνεχή καύσιμα είναι ελλειπτικά. Ωστόσο, η υπόθεση αυτή μπορεί να μην ισχύει σε πραγματικές

συνθήκες, ιδίως σε περιοχές με ασυνεχή καύσιμα, με αποτέλεσμα να μην αποτυπώνονται επαρκώς τα ακανόνιστα σχήματα που μπορούν να πάρουν οι πυρκαγιές υπό τέτοιες συνθήκες. Άλλο ένα κρίσιμο σημείο είναι ότι οι προσομοιώσεις ακραίων συμπεριφορών πυρκαγιάς, όπως οι πυρκαγιές κόμης και οι κηλίδες, δεν μπόρεσαν να επαληθευτούν με εμπειρικά δεδομένα. Αυτός ο περιορισμός προκύπτει από την έλλειψη διαθέσιμων

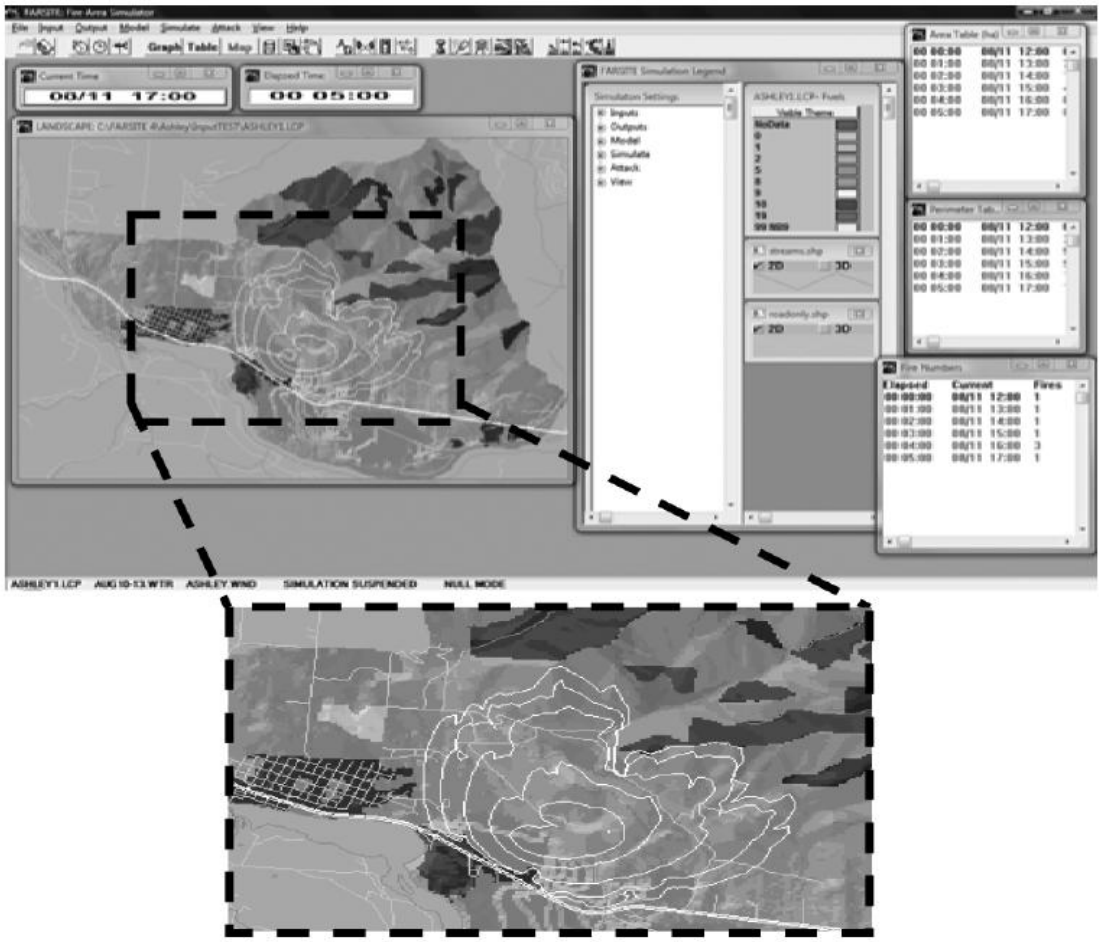


Εικόνα 6: Παράδειγμα τοπίου (Papadopoulos & Pavlidou, 2011)

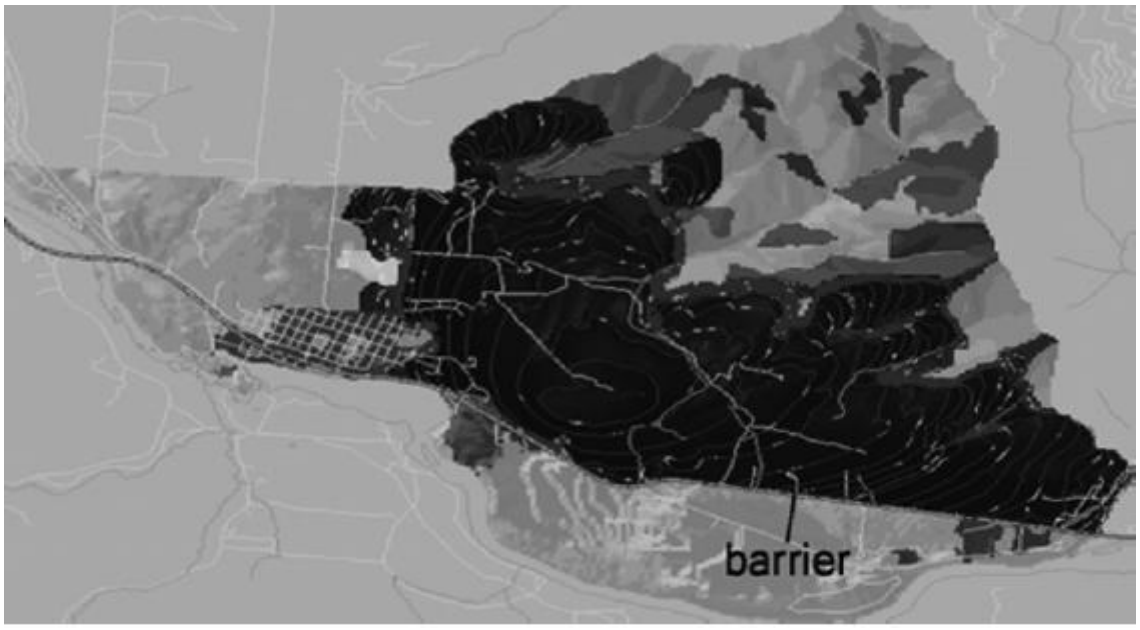
δεδομένων για αυτούς τους τύπους πυρκαγιών υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες που μοντελοποιήθηκαν (πυρκαγιές σημειακής πηγής και σταθερά περιβάλλοντα). Τέλος υπάρχει ανάγκη για συνεχή επικύρωση του μοντέλου, καθώς το FARSITE υποθέτει ότι η συμπεριφορά της πυρκαγιάς σε κάθε κορυφή είναι ανεξάρτητη από άλλες. Ενώ αυτό απλοποιεί τη διαδικασία μοντελοποίησης, μπορεί να μην αντικατοπτρίζει με ακρίβεια την πολυπλοκότητα των αλληλεπιδράσεων της φωτιάς σε πραγματικά σενάρια, οδηγώντας ενδεχομένως σε υπεραπλουστευμένες προβλέψεις (Finney, 1998).



Εικόνα 7: Προσομοίωση FARSITE όπως εκτελείται - αποτελέσματα γραφικών παραστάσεων (Papadopoulos & Pavlidou, 2011)



Εικόνα 8: Προσομοίωση FARSITE καθώς εκτελείται - πίνακας αποτελεσμάτων (Papadopoulos & Pavlidou, 2011)



Εικόνα 9: Τέλος της προσομοίωσης FARSITE - απεικόνιση της τελικής καταστροφής του τοπίου. (Papadopoulos & Pavlidou, 2011)

5.3 Phoenix Rapidfire

Η ανάγκη για ένα ανεξάρτητο και ολοκληρωμένο σύστημα εκτίμησης κινδύνου για όλες τις φυσικές καταστροφές στην Αυστραλία αναγνωρίστηκε από το Συμβούλιο των Κυβερνήσεων της Αυστραλίας (Council of Australian Governments - COAG). Το αυστραλιανό/νεοζηλανδικό πρότυπο για τη διαχείριση κινδύνων παρέχει ένα πλαίσιο για αυτή τη συνεπή και ολοκληρωμένη προσέγγιση. Ωστόσο, όταν πρόκειται να εφαρμοστεί σε κάποιο τύπο καταστροφής, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι μοναδικές πτυχές καθενός από αυτούς τους τύπους. Το μοντέλο διαχείρισης κινδύνου για τις πυρκαγιές (Bushfire Risk Management Model) που αναπτύσσεται από το Bushfire CRC είναι μια εφαρμογή αυτού του πλαισίου. Συνδέει άμεσα τις επιπτώσεις των διαφόρων στρατηγικών διαχείρισης καταστροφών με τις αλλαγές στα χαρακτηριστικά των πυρκαγιών σε όλο το τοπίο χρησιμοποιώντας το PHOENIX. Στη συνέχεια, ανάλογα με τη φύση των καταστροφών υπολογίζονται οι επιπτώσεις στις διάφορες αξίες και στα περιουσιακά στοιχεία στο τοπίο. Το μοντέλο αυτό προορίζεται για χρήση από πυροσβεστικές υπηρεσίες, διαχειριστές γης, πολεοδομικούς και χωροταξικούς σχεδιαστές και φορείς χάραξης πολιτικής.

Το PHOENIX είναι ένα δυναμικό μοντέλο συμπεριφοράς και χαρακτηρισμού πυρκαγιάς. Σε αντίθεση με πολλά τυποποιημένα μοντέλα συμπεριφοράς πυρκαγιάς, το PHOENIX εκτελείται σε περιβάλλον όπου μπορεί να ανταποκριθεί στις αλλαγές των συνθηκών της πυρκαγιάς εκτός από τις αλλαγές στην καύσιμη ύλη και τις καιρικές και τοπογραφικές συνθήκες, καθώς η πυρκαγιά αναπτύσσεται και κινείται στο τοπίο. Δύο συγκεκριμένα παραδείγματα αυτού του δυναμικού χαρακτήρα είναι τα εξής: Πρώτον το πώς οι σημειακές πυρκαγιές μπροστά από το κύριο μέτωπο της πυρκαγιάς αυξάνουν τον ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς και δεύτερον το πώς διαφορετικά στρώματα της καύσιμης ύλης συμπεριλαμβάνονται ή αποκλείονται στους υπολογισμούς συμπεριφοράς της πυρκαγιάς, καθώς η πυρκαγιά αλλάζει σε ένταση γύρω από την περίμετρό της και με την πάροδο του χρόνου.

Τα μοντέλα συμπεριφοράς της πυρκαγιάς χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του σημειακού ρυθμού εξάπλωσης, του ύψους της φλόγας και της έντασης της πυροσβεστικής γραμμής. Για να μεταφραστεί ο τρόπος με τον οποίο η συμπεριφορά της φωτιάς σε κάθε σημείο γύρω από την περίμετρο της φωτιάς κινείται στη συνέχεια στο

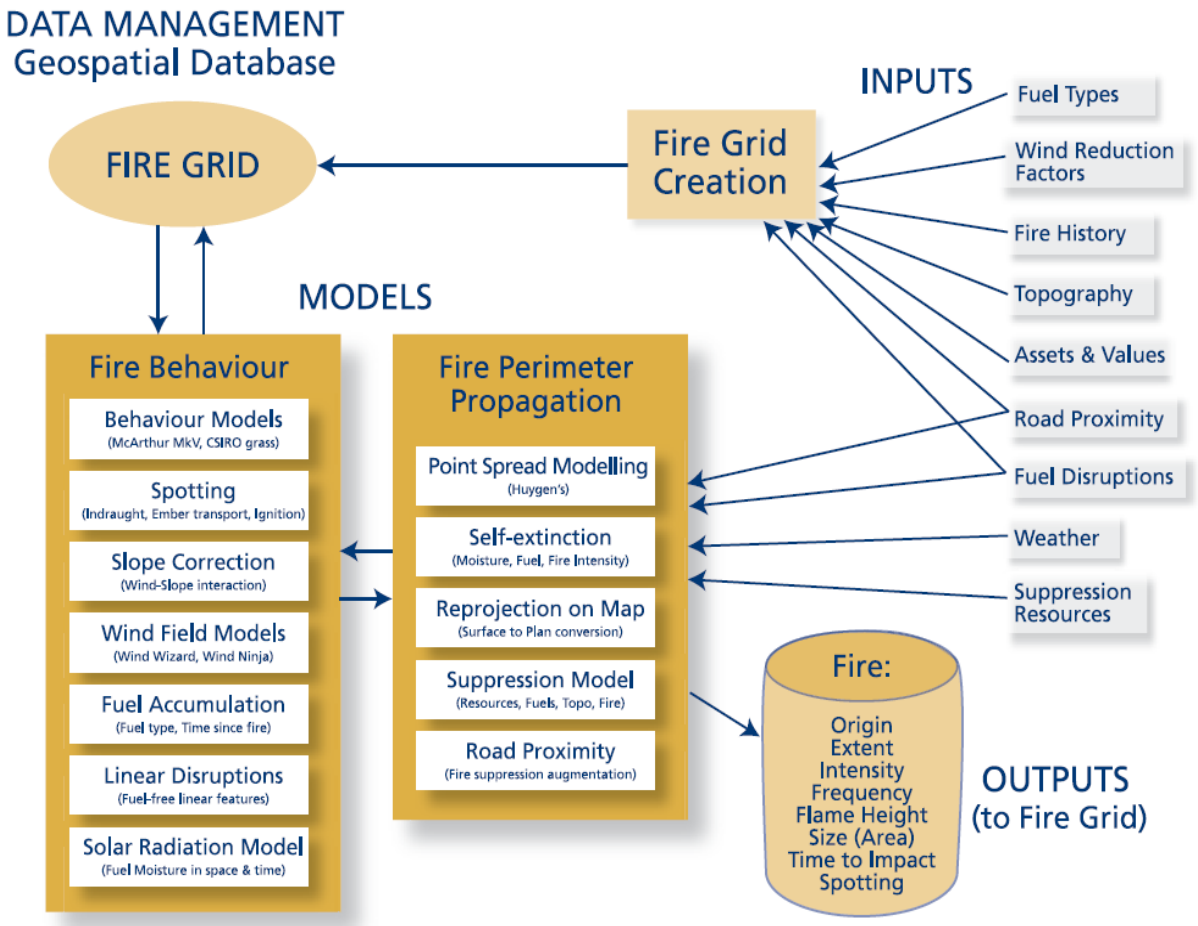
τοπίο, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος εξάπλωσης. Τα μοντέλα που εμπλέκονται στην τροποποίηση των εισροών ή των εκροών από τα μοντέλα συμπεριφοράς πυρκαγιάς ασχολούνται με την επίδραση των επιφανειακών πυρκαγιών στο μέτωπο της πυρκαγιάς, τη μεταφορά και την κατανομή της στάχτης, την ανάφλεξη επιφανειακών πυρκαγιών, τις αλληλεπιδράσεις ανέμου-κλίσης, τη γραμμική διαταραχή της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς, τους ρυθμούς συσσώρευσης καυσίμων, την ηλιακή ακτινοβολία και τα μοντέλα υγρασίας καυσίμων. Μια δεύτερη σειρά μοντέλων χρησιμοποιείται για την περιγραφή της εξάπλωσης της πυρκαγιάς στο τοπίο δεδομένων των γενικών συνθηκών συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν την ανάπτυξη της περιμέτρου του Huygens, την αυτοεκκαθάριση των σημείων, την επαναπροβολή της επιφάνειας στο σχέδιο και τη μοντελοποίηση της καταστολής της πυρκαγιάς. Το χρονικό διάστημα μεταξύ των υπολογισμών εξάπλωσης της περιμέτρου κυμαίνεται από ένα λεπτό, για πυρκαγιές που κινούνται γρήγορα, έως 15 λεπτά για πυρκαγιές που κινούνται αργά (Tolhurst, et al., 2008).

Το PHOENIX RapidFire είναι ένα εξελιγμένο μοντέλο που έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει τη συμπεριφορά των πυρκαγιών θάμνων, εστιάζοντας ιδιαίτερα στη διαδικασία εντοπισμού σημείων. Αρχικά, όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη διάδοσης της πυρκαγιάς και η ποσότητα του διαθέσιμου καύσιμου υλικού, τόσο περισσότερη καρβουνοστάχτη μπορεί να σηκώσει στον αέρα, αυξάνοντας την πιθανότητα σημειακής διάδοσης. Αυτή η πτυχή επηρεάζεται από την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου, παράγοντες που καθορίζουν πόσο μακριά και προς ποια κατεύθυνση θα ταξιδέψει η καρβουνοστάχτη. Επίσης, εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα καύσιμης ύλης στο έδαφος και την περιεκτικότητά τους σε υγρασία, η οποία επηρεάζει το κατά πόσον η καρβουνοστάχτη μπορεί να δημιουργήσει νέες εστίας πυρκαγιάς. Λόγω της έλλειψης αξιόπιστων δεδομένων σχετικών με τη μεταφορά καρβουνοστάχτης και την εκδήλωση σημειακών πυρκαγιών, το μοντέλο βαθμονομήθηκε εμπειρικά χρησιμοποιώντας δεδομένα από τις πυρκαγιές του Μαύρου Σαββάτου στη Βικτώρια. Η προσέγγιση αυτή βοηθά στην τελειοποίηση του μοντέλου, παρά τους περιορισμούς που υπάρχουν στην αποτύπωση όλων των πτυχών της διαδικασίας του εντοπισμού σημείων για την διάδοση της πυρκαγιάς. Το μοντέλο δεν προσπαθεί να προσομοιώσει κάθε πιθανή ανάφλεξη πυρκαγιάς λόγω υπολογιστικών περιορισμών. Αντίθετα, εστιάζει σε εκείνες τις αναφλέξεις που συμβαίνουν σε απόσταση περίπου 200 μέτρων από το μέτωπο της

πυρκαγιάς, όπου μπορούν να εξελιχθούν σε σημαντικές νέες πυρκαγιές. Οι σημειακές πυρκαγιές μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς, διπλασιάζοντας ή τριπλασιάζοντας δυνητικά τον ρυθμό εξάπλωσης. Το μοντέλο λαμβάνει ρητά υπόψη του σημεία σε μεσαίες έως μεγάλες αποστάσεις (1 έως 30 χιλιόμετρα) με βάση διάφορους παράγοντες, όπως το υλικό του φλοιού, την ισχύ της διάδοσης, τις συνθήκες του ανέμου και τα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης.

Ένας από τους βασικούς περιορισμούς του μοντέλου είναι ότι βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε εμπειρικά δεδομένα από συγκεκριμένα γεγονότα, όπως οι πυρκαγιές του Μαύρου Σαββάτου στη Βικτώρια. Αυτό σημαίνει ότι, ενώ μπορεί να αποδίδει καλά υπό παρόμοιες συνθήκες, μπορεί όμως να μην προβλέπει με ακρίβεια τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς σε διαφορετικά πλαίσια ή περιβάλλοντα, λόγω της έλλειψης άμεσης ποσοτικοποίησης των διαφόρων παραγόντων που εμπλέκονται στην διαδικασία εξάπλωσης. Υπάρχουν πτυχές της διαδικασίας εξάπλωσης που μπορεί να μην

Σχεδιάγραμμα 3: Σχηματικό διάγραμμα του PHOENIX που δείχνει τις εισόδους, τις εξόδους και την αποθήκευση δεδομένων.



αποτυπώνονται πλήρως από το PHOENIX. Για παράδειγμα, το μοντέλο δεν προσομοιώνει κάθε πιθανή σημειακή ανάφλεξη λόγω υπολογιστικών περιορισμών, εστιάζοντας σε εκείνες που είναι αρκετά σημαντικές, ώστε να επηρεάσουν την εξέλιξη της πυρκαγιάς. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε υποεκτίμηση του αριθμού των αναφλέξεων σε μεγάλες πυρκαγιές, όπου μπορεί να εκδηλωθούν εκατομμύρια σημειακές πυρκαγιές. Επίσης, το μοντέλο υποθέτει ότι τα σημεία μικρής απόστασης (αποστάσεις μικρότερες από 200 m) αποτελούν μέρος του ρυθμού εξάπλωσης της φλεγόμενης ζώνης και δεν τις μοντελοποιεί ξεχωριστά. Αυτό θα μπορούσε να παραβλέψει τις αποχρώσεις του τρόπου με τον οποίο τα σημεία μικρής απόστασης μπορούν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Οι φυσικές πυρκαγιές θάμνων έχουν συχνά ακανόνιστα σχήματα και συμπεριφορές, γεγονός που μπορεί να περιπλέξει τη διαδικασία μοντελοποίησης. Το μοντέλο PHOENIX προσπαθεί να συγκεντρώσει τμήματα θερμότητας, για να λάβει υπόψη του αυτή τη μεταβλητότητα, αλλά η αποτελεσματικότητα αυτής της προσέγγισης μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τις συγκεκριμένες συνθήκες πυρκαγιάς. Η απουσία αξιόπιστων δεδομένων σχετικών με τη μεταφορά καρβουνοστάχτης και την εκδήλωση σημειακών πυρκαγιών, περιορίζει την ικανότητα του μοντέλου να προβλέπει με ακρίβεια τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς σε όλα τα σενάρια. Αυτή η εξάρτηση από εμπειρικά δεδομένα μπορεί να οδηγήσει σε κενά στην κατανόηση της πλήρους δυναμικής της εξάπλωσης της πυρκαγιάς (Chong, et al., 2013).

5.4 Behave

Το σύστημα προσομοίωσης πυρκαγιάς BEHAVE αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Δασών των Ηνωμένων Πολιτειών (US Forest Service) τη δεκαετία του 1980. Σχεδιάστηκε, για να υποστηρίξει την πρόβλεψη και τη διαχείριση της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες, όπως η βλάστηση, οι κλιματολογικές συνθήκες και το τοπογραφικό ανάγλυφο, δίνοντας μεγάλη σημασία στην κατανόηση των μηχανισμών εξάπλωσης της πυρκαγιάς.

Η αποτελεσματική θερμοκρασία ανάφλεξης εισάγεται ως μια κρίσιμη παράμετρος που καθορίζει πόσο καύσιμο θερμαίνεται σε θερμοκρασία ανάφλεξης τη στιγμή που αρχίζει η καύση. Η πυκνότητα όγκου αναδεικνύεται ως σημαντικός παράγοντας για τον ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Ορίζεται ως το ξηρό βάρος του καυσίμου ανά κυβικό πόδι στρώματος καυσίμου. Η αύξησή της τείνει να μειώνει τον ρυθμό εξάπλωσης επειδή

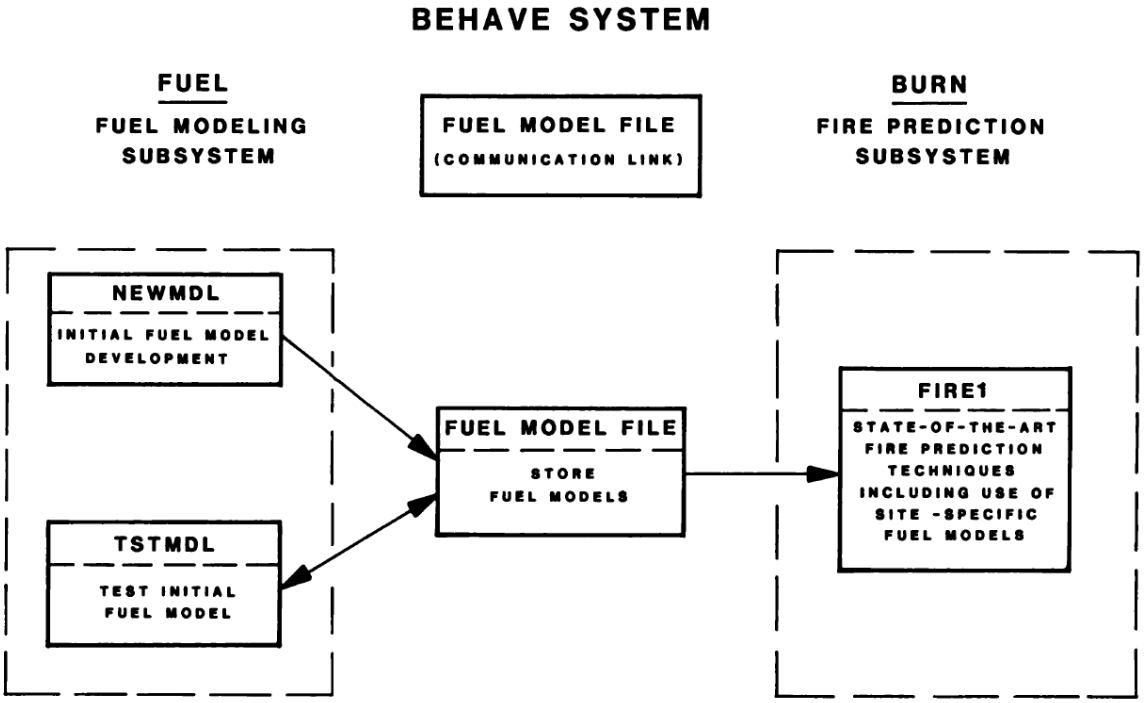
αυξάνει τη συνολική απορρόφηση θερμότητας, δηλαδή την ποσότητα θερμότητας που απαιτείται, για να φθάσει το καύσιμο σε θερμοκρασία ανάφλεξης. Επίσης, το μέγεθος των σωματιδίων του καυσίμου επηρεάζει το πόσο γρήγορα μπορούν να φτάσουν σε θερμοκρασία ανάφλεξης. Τα μικρότερα σωματίδια θερμαίνονται πιο ομοιόμορφα και γρήγορα σε σύγκριση με τα μεγαλύτερα, τα οποία μπορεί να έχουν ψυχρότερα κέντρα ακόμη και όταν αναφλέγεται το εξωτερικό κέλυφος. Ταυτόχρονα, περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως η κλίση της πλαγιάς και ο άνεμος, παίζουν επίσης ρόλο στην εξάπλωση της πυρκαγιάς. Ωστόσο, οι παράγοντες αυτοί έχουν μικρότερο αντίκτυπο σε σύγκριση με την καύσιμη ύλη.

Το σύστημα BEHAVE είναι ένα ολοκληρωμένο εργαλείο σχεδιασμένο για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των πυρκαγιών σε άγρια περιοχή και τη διαχείριση μοντέλων καυσίμων. Αποτελείται από μια σειρά διαδραστικών υπολογιστικών προγραμμάτων που επιτρέπουν στους χρήστες να κατασκευάσουν μοντέλα καύσιμης ύλης με βάση τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς σε συγκεκριμένες τοποθεσίες. Αυτή η διαδραστικότητα επιτρέπει στους χρήστες να προσαρμόζουν τα μοντέλα σε συγκεκριμένες συνθήκες, ενισχύοντας την ακρίβεια των προβλέψεων πυρκαγιάς. Το σύστημα χωρίζεται σε διάφορα υποσυστήματα, καθένα από τα οποία εξυπηρετεί έναν ξεχωριστό σκοπό:

FUEL Subsystem (Υποσύστημα ΚΑΥΣΙΜΟΥ): Αυτό το στοιχείο επιτρέπει στους διαχειριστές πυρκαγιών να συναρμολογούν και να δοκιμάζουν τα μοντέλα καύσιμης ύλης, πριν χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά. Εξασφαλίζει ότι τα μοντέλα είναι αποτελεσματικά και αξιόπιστα για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των πυρκαγιών.

BURN Subsystem (Υποσύστημα ΚΑΥΣΗΣ): Αυτό το υποσύστημα χρησιμοποιεί τα μοντέλα καύσιμης ύλης που αναπτύχθηκαν στο υποσύστημα FUEL μαζί με προηγμένες τεχνικές πρόβλεψης πυρκαγιάς. Είναι σχεδιασμένο για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς σε διάφορα επιχειρησιακά πλαίσια, όπως ο σχεδιασμός και η εκπαίδευση.

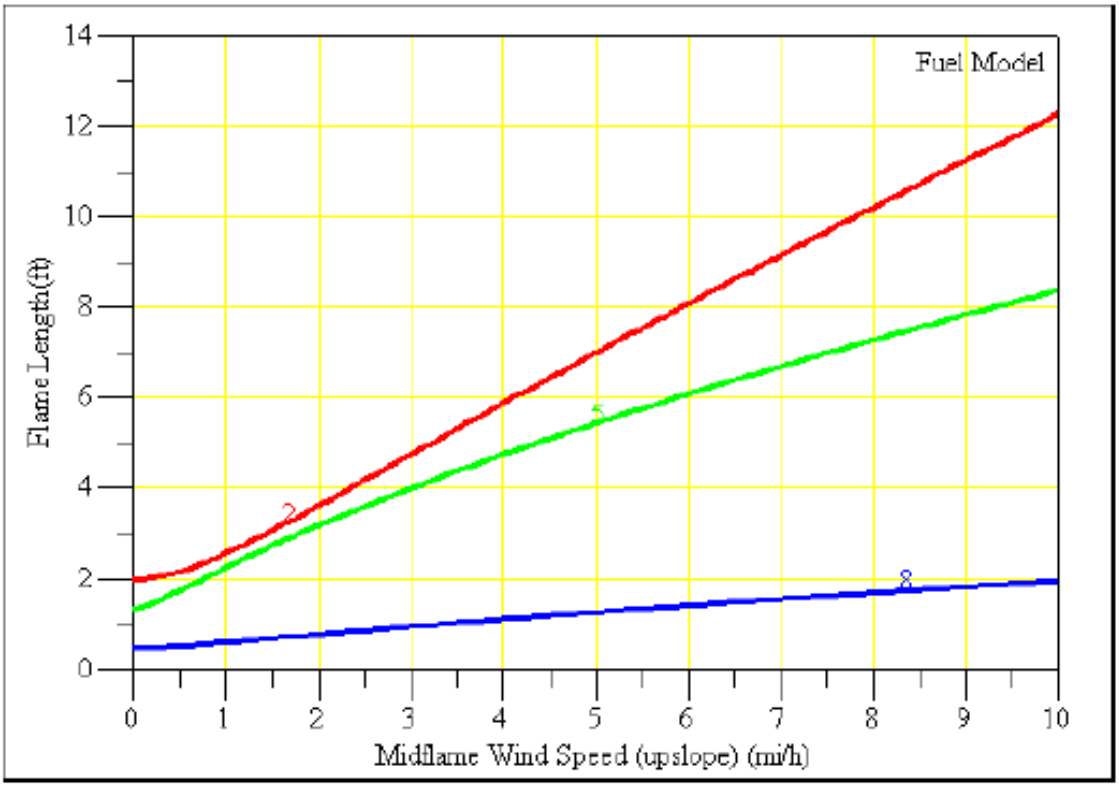
Σχεδιάγραμμα 4: Γενική δομή του συστήματος BEHAVE . Το σύστημα BEHAVE χρησιμοποιεί ένα «αρχείο μοντέλου καυσίμου για να παρέχει στο υποσύστημα πρόβλεψης πυρκαγιάς πρόσβαση σε μοντέλα καυσίμου που κατασκευάζονται στο υποσύστημα μοντελοποίησης καυσίμου.



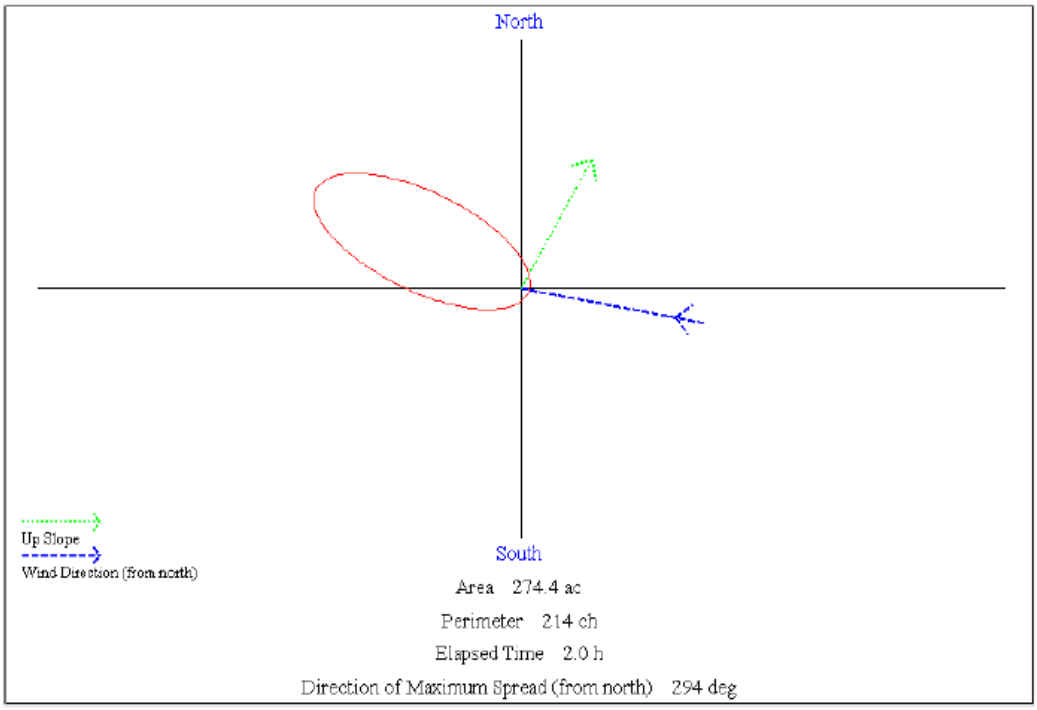
Το BEHAVE χρησιμοποιεί ένα «αρχείο μοντέλου καυσίμου» που παρέχει πρόσβαση στο υποσύστημα πρόβλεψης πυρκαγιάς των μοντέλων καυσίμου που έχουν δημιουργηθεί στο υποσύστημα FUEL. Αυτή η ενσωμάτωση είναι ζωτικής σημασίας για την ακριβή πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Το σύστημα επιτρέπει τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς υπό διάφορες συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων διαφορετικών καυσίμων, καιρικών συνθηκών και τοπογραφικών καταστάσεων. Αυτή η ευελιξία είναι απαραίτητη για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν το δυναμικό πυρκαγιάς. Αν και έχει σχεδιαστεί κυρίως για επιχειρησιακούς χρήστες, όπως ειδικούς σε θέματα καυσίμων και συμπεριφοράς πυρκαγιάς, το BEHAVE χρησιμεύει, επίσης, ως μέσο εκπαίδευσης. Βοηθά τους χρήστες να μάθουν για τις σχέσεις μεταξύ των καυσίμων, των περιβαλλοντικών παραμέτρων και της πρόβλεψης της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς

Ένας από τους βασικούς περιορισμούς του μοντέλου που εντοπίστηκε αφορά στην πολυπλοκότητα των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μοντέλων καύσιμης ύλης και των περιβαλλοντικών παραμέτρων με τα μοντέλα πυρκαγιάς. Αυτή η πολυπλοκότητα

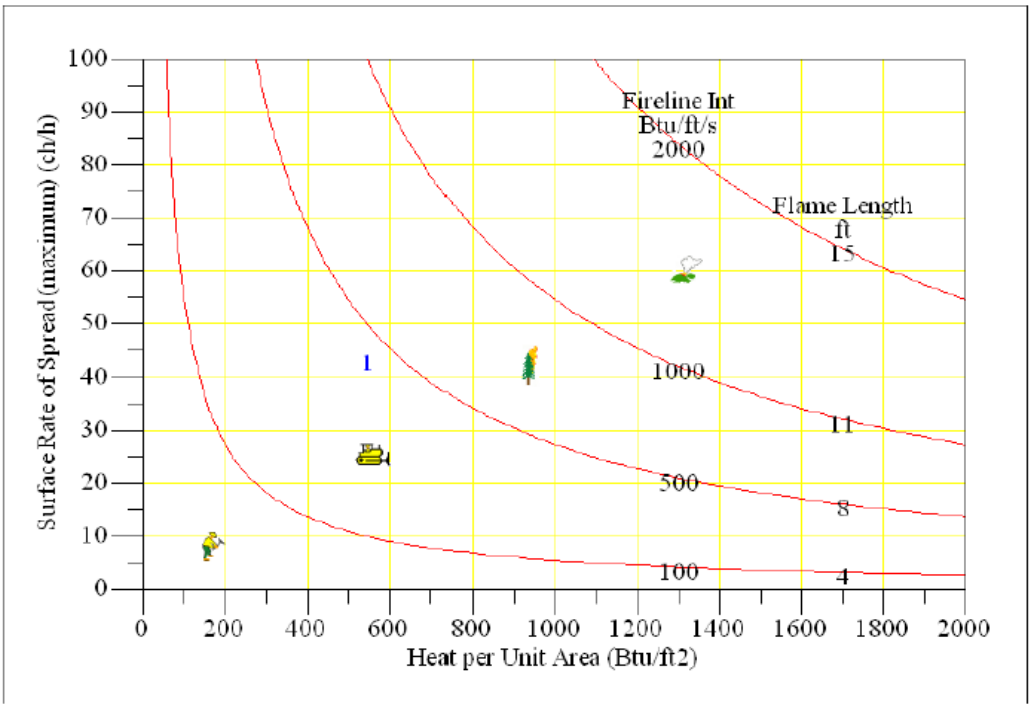
σημαίνει ότι απλοί κανόνες δεν μπορούν να αντικαταστήσουν μια θεμελιώδη κατανόηση της διαδικασίας μοντελοποίησης της καύσιμης ύλης. Οι χρήστες πρέπει να ασχοληθούν σε βάθος με τα μοντέλα, ώστε να εξασφαλίσουν ακριβείς προβλέψεις Επίσης, συχνά παρατηρείται αναντιστοιχία μεταξύ των παραδοχών που γίνονται στα μοντέλα και των πραγματικών συνθηκών που παρατηρούνται στο πεδίο. Αυτή η ασυμφωνία μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές διαφορές μεταξύ της προβλεπόμενης και της παρατηρούμενης συμπεριφοράς της πυρκαγιάς, αναδεικνύοντας τους περιορισμούς των μοντέλων στην ακριβή πρόβλεψη σεναρίων του πραγματικού κόσμου Ακόμα και η μοντελοποίηση της καύσιμης ύλης δεν είναι μια εντελώς αυστηρή διαδικασία, με αποτέλεσμα τα μοντέλα να μην αποδίδουν πάντα αξιόπιστα αποτελέσματα χωρίς προσεκτική εξέταση και προσαρμογή. Όταν γίνονται προσαρμογές στα μοντέλα καυσίμων, ιδίως ως απόκριση σε συνθήκες υψηλής υγρασίας, είναι ζωτικής σημασίας να επανεκτιμηθεί η απόκριση του μοντέλου και σε συνθήκες χαμηλής υγρασίας. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία μπορεί να είναι χρονοβόρα και να μην εγγυάται πάντα βελτιωμένη ακρίβεια (Burgan & Rothermel, 1984).



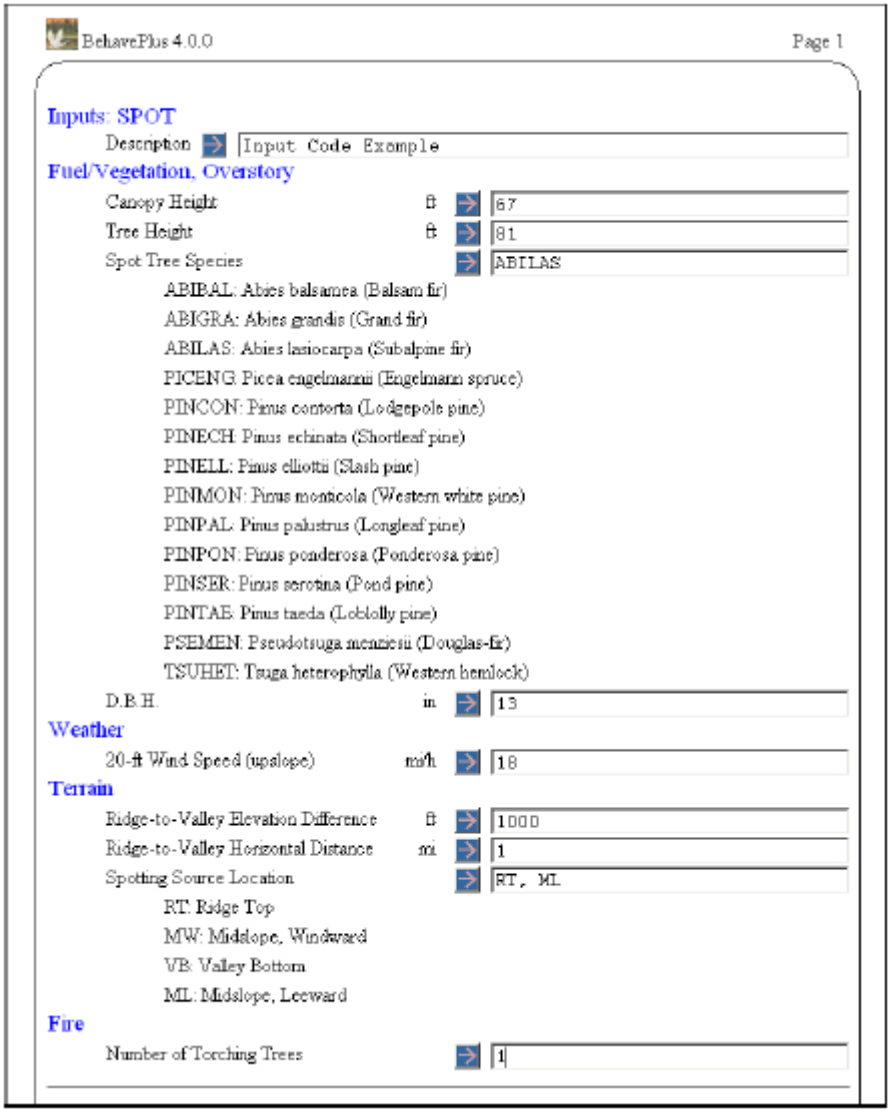
Εικόνα 10: Αποτελέσματα εξόδου από το BEHAVE -Διάγραμμα μήκους φλόγας σε συνάρτηση της έντασης του ανέμου (Andrews, et al., 2005)



Εικόνα 11: Αποτελέσματα εξόδου από το BEHAVE – Κατεύθυνση μέγιστης διάδοσης (Andrews, et al., 2005)



Εικόνα 12: Αποτελέσματα εξόδου από το BEHAVE – Επιφανειακός ρυθμός διάδοσης (Andrews, et al., 2005)



Εικόνα 13: Παραμετροποίηση πυρκαγιάς – είσοδοι στο σύστημα BEHAVE (Andrews, et al., 2005)

5.5 PYROCART

Το PYROCART είναι ένα σύστημα που επικεντρώνεται στην προσομοίωση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς στην περιοχή Cass Basin της Νέας Ζηλανδίας. Αποσκοπεί στην επίτευξη δύο βασικών στόχων: Αφενός να αξιολογήσει τη δυνατότητα εφαρμογής του μοντέλου εξάπλωσης της πυρκαγιάς που αναπτύχθηκε από τον Rothermel σε οικοσυστήματα της Νέας Ζηλανδίας και αφετέρου να εκτιμηθεί ο ρόλος των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS) στην πρόβλεψη της εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Το μοντέλο PYROCART ενσωματώνει το μοντέλο εξάπλωσης πυρκαγιάς Rothermel με την τεχνολογία GIS. Επικυρώθηκε με βάση ένα ανεξέλεγκτο συμβάν

πυρκαγιάς που έλαβε χώρα τον Μάιο του 1995, το οποίο έπληξε 580 εκτάρια διαφορετικών τύπων βλάστησης, συμπεριλαμβανομένων θαμνώνων και δασών και επέδειξε συνολική ακρίβεια πρόβλεψης 80%. Διαπιστώθηκε ότι ο τύπος καύσιμης ύλης και η κλίση ήταν οι κύριοι παράγοντες που επηρέαζαν την εξάπλωση της πυρκαγιάς. Ωστόσο, το μοντέλο έτεινε να υπερπροβλέπει τα ποσοστά εξάπλωσης της πυρκαγιάς σε υψηλές ταχύτητες ανέμου προς ορισμένες κατευθύνσεις. Οι προβλεπόμενες και οι πραγματικές καμένες εκτάσεις είχαν παρόμοιο συνολικό σχήμα, υποδεικνύοντας ένα λογικό επίπεδο ακρίβειας στις προβλέψεις του μοντέλου.

Το μοντέλο PYROCART είναι πολλά υποσχόμενο ως εργαλείο για τη διαχείριση της γης, ιδίως για τον έλεγχο υποθέσεων που σχετίζονται με στρατηγικές διαχείρισης της γης. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας των δεδομένων εισόδου και των απαιτούμενων τεχνικών παραμετροποίησης, ενδέχεται να μην είναι κατάλληλο για τη διαχείριση πυρκαγιών σε πραγματικό χρόνο. Ίσως θα μπορούσε να περιλαμβάνει την ενσωμάτωση ενός διαδοχικού μοντέλου με το τρέχον πλαίσιο για τη διερεύνηση του τρόπου, με τον οποίο οι χωρικά αποσπασματικές διαταραχές, όπως η πυρκαγιά, επηρεάζουν τα μωσαϊκά βλάστησης με την πάροδο του χρόνου. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει στην ανάπτυξη πιο εξελιγμένων συστημάτων πληροφόρησης για την πυρκαγιά και τη βλάστηση για καλύτερες πρακτικές διαχείρισης.

Η βασική εξίσωση που χρησιμοποιεί το σύστημα και υπολογίζει το ROS (Rate Of Spread) είναι η παρακάτω:

$$R = \frac{F\ (1 - e)}{1 - e\cos\left(\theta - \omega + 180\right)}$$

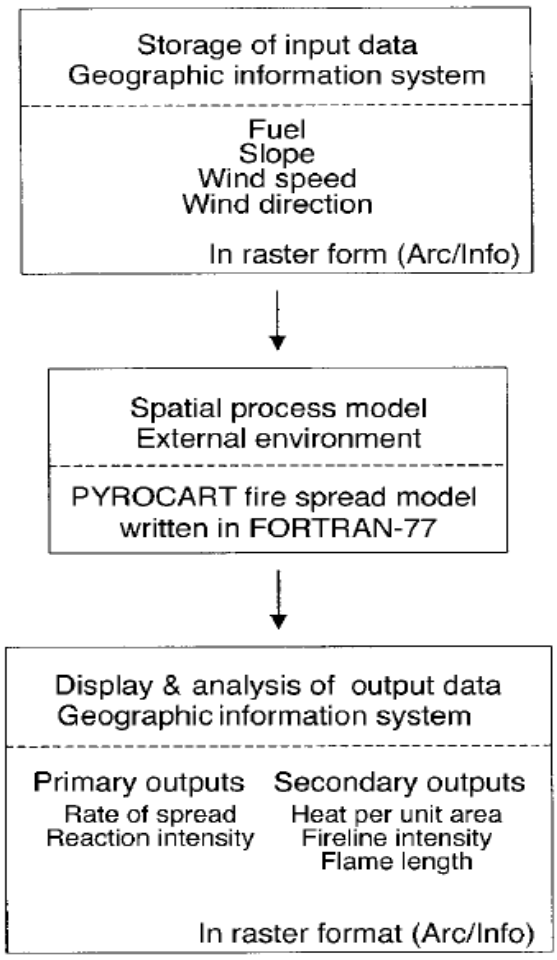
όπου R ο ρυθμός εξάπλωση, F ο ρυθμός εξάπλωσης προς τα εμπρός, e η εκκεντρότητα της έλλειψης εξάπλωσης και ω είναι η κατεύθυνση από την οποία φυσάει ο άνεμος.

Το PYROCART όπως αναφέρθηκε και παραπάνω συνδυάζει το μοντέλο εξάπλωσης πυρκαγιάς Rothermel με την τεχνολογία του Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (GIS). Το μοντέλο Rothermel είναι ευρέως αναγνωρισμένο για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς με βάση διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες, ενώ τα συστήματα GIS παρέχουν χωρικά δεδομένα που ενισχύουν τις δυνατότητες πρόβλεψης του μοντέλου Το μοντέλο απαιτεί σύνθετα δεδομένα εισόδου, συμπεριλαμβανομένων πληροφοριών σχετικών με τους τύπους βλάστησης, τα χαρακτηριστικά της καύσιμης

ύλης, τις γωνίες κλίσης και τις συνθήκες ανέμου. Τα δεδομένα αυτά είναι απαραίτητα για

την ακριβή προσομοίωση της εξάπλωσης της πυρκαγιάς σε διάφορα τοπία. Η επιτυχία των προβλέψεών του, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαδικασία παραμετροποίησης, η οποία περιλαμβάνει την προσαρμογή του μοντέλου, ώστε να ληφθούν υπόψη συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτό περιλαμβάνει τη χρήση διορθωτικών παραγόντων για την εξάπλωση της πυρκαγιάς σε κατωφέρεια, καθώς τα παραδοσιακά μοντέλα ενδέχεται να μην αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια τη δυναμική της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς σε πλαγιές. Ενώ το PYROCART παρουσιάζει δυνατότητες ως εργαλείο διαχείρισης γης για τη δοκιμή υποθέσεων που σχετίζονται με τη συμπεριφορά των πυρκαγιών και τις στρατηγικές διαχείρισης γης, η πολυπλοκότητά του το καθιστά λιγότερο κατάλληλο για τη διαχείριση πυρκαγιών σε πραγματικό χρόνο. Προορίζεται κυρίως για σκοπούς έρευνας και σχεδιασμού (Perry, et al., 1999).

Σχεδιάγραμμα 5: Η δομή του μοντέλου προσομοίωσης PYROCART



5.6 Flamap

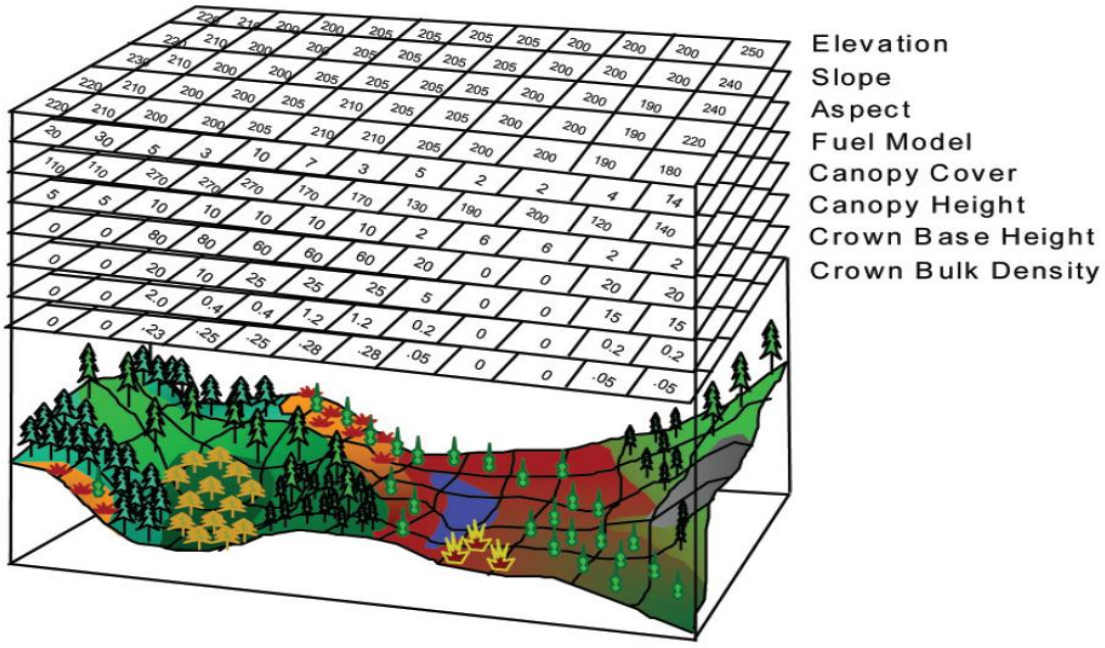
Το πρόγραμμα FlamMap, έχει σχεδιαστεί για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των πυρκαγιών σε επίπεδο τοπίου με τη χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS). Ενσωματώνει διάφορα μοντέλα για τον υπολογισμό κρίσιμων μετρικών της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς, συμπεριλαμβανομένων του ρυθμού εξάπλωσης της πυρκαγιάς, του σχήματος της πυρκαγιάς, της απόστασης της σημειακής πυρκαγιάς και του ρυθμού εξάπλωσης της πυρκαγιάς κόμης. Λειτουργεί με την υπόθεση ότι οι υπολογισμοί της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς είναι ανεξάρτητοι για κάθε κελί σε ένα τοπίο με πλέγμα, επιτρέποντας λεπτομερή χωρική ανάλυση. Δίνει έμφαση στη σημασία των παραμέτρων εισόδου, όπως η υγρασία της καύσιμης ύλης, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου, οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για τις ακριβείς προβλέψεις της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση της επεξεργασίας της καύσιμης ύλης, η οποία αποσκοπεί στον εντοπισμό θέσεων που μπορούν να επιβραδύνουν αποτελεσματικά την ανάπτυξη μεγάλων πυρκαγιών. Επιπλέον, το FlamMap μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επαλήθευση χωρικών δεδομένων, συγκρίνοντας την υπολογισμένη συμπεριφορά της πυρκαγιάς με τα αναμενόμενα αποτελέσματα με βάση το συγκεκριμένο περιβάλλον πυρκαγιάς

Το FlamMap εκτελεί υπολογισμούς συμπεριφοράς πυρκαγιάς ανεξάρτητα για κάθε κελί σε ένα τοπίο με πλέγμα. Αυτό σημαίνει ότι η συμπεριφορά της πυρκαγιάς σε μια περιοχή δεν επηρεάζει άμεσα τη συμπεριφορά σε παρακείμενες περιοχές, επιτρέποντας μια λεπτομερή χωρική ανάλυση της εξάπλωσης και της έντασης της πυρκαγιάς. Το πρόγραμμα απαιτεί συγκεκριμένες παραμέτρους εισόδου, συμπεριλαμβανομένης της υγρασίας της καύσιμης ύλης, της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου. Αυτές οι παράμετροι θεωρούνται σταθερές με την πάροδο του χρόνου κατά τη διάρκεια των υπολογισμών, γεγονός που βοηθά στη δημιουργία ενός σταθερού μοντέλου για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Περιλαμβάνει διάφορα μοντέλα που υπολογίζουν βασικές μετρικές, όπως ο ρυθμός εξάπλωσης της πυρκαγιάς, το σχήμα της πυρκαγιάς, η απόσταση της σημειακής πυρκαγιάς και ο ρυθμός εξάπλωσης της πυρκαγιάς κόμης. Αυτή η ολοκληρωμένη δυνατότητα μοντελοποίησης επιτρέπει στους χρήστες να αξιολογούν τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς υπό διαφορετικά σενάρια και συνθήκες.

Για πιο σύνθετα εδάφη, το FlamMap μπορεί να χρησιμοποιήσει χωρικά πλέγματα πεδίων ανέμου, τα οποία δημιουργούνται εκτός του προγράμματος. Αυτή η λειτουργία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την εξέταση του τρόπου με τον οποίο η τοπογραφία τροποποιεί τα πρότυπα ανέμου και, κατά συνέπεια, την εξάπλωση της πυρκαγιάς. Επίσης, χρησιμοποιεί μια μέθοδο που ονομάζεται Ελάχιστος Χρόνος Ταξιδιού (Minimum Travel Time - MTT) για τον υπολογισμό της ανάπτυξης της πυρκαγιάς. Αυτή η μέθοδος προσδιορίζει τις διαδρομές με τον ελάχιστο χρόνο ταξιδιού μεταξύ των κόμβων του δικτύου, παράγοντας αποτελέσματα που αντικατοπτρίζουν την κατεύθυνση της κίνησης της πυρκαγιάς και τις περιοχές που επηρεάζονται από την πυρκαγιά. Το FlamMap μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί για την επαλήθευση των χωρικών δεδομένων, συγκρίνοντας την υπολογισμένη συμπεριφορά της πυρκαγιάς με τα αναμενόμενα αποτελέσματα με βάση το συγκεκριμένο περιβάλλον πυρκαγιάς. Αυτό βοηθά στη διασφάλιση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των προβλέψεων της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Συνοπτικά, μπορούμε να πούμε ότι το FlamMap είναι ένα εξελιγμένο εργαλείο που ενσωματώνει διάφορα μοντέλα και παραμέτρους εισόδου για την προσομοίωση και την ανάλυση της συμπεριφοράς των πυρκαγιών σε διάφορα τοπία, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για τη διαχείριση των πυρκαγιών και την έρευνα.

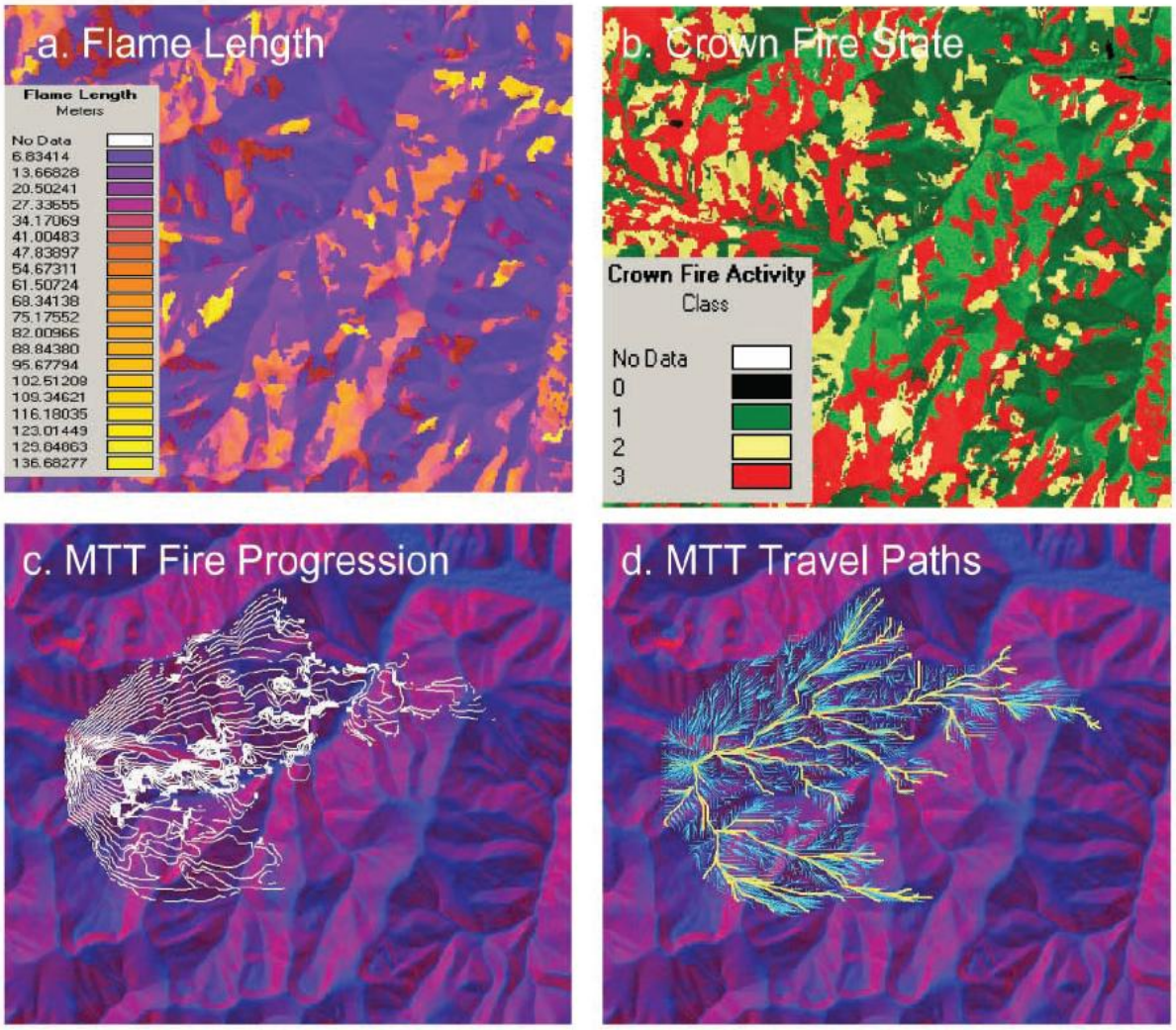
Ένας από τους κύριους περιορισμούς του FlamMap είναι ότι υποθέτει ότι η υγρασία της καύσιμης ύλης, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου είναι σταθερές με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η απλούστευση μπορεί να μην αντικατοπτρίζει με ακρίβεια τις συνθήκες του πραγματικού κόσμου, όπου οι παράγοντες αυτοί μπορούν να αλλάξουν γρήγορα, οδηγώντας ενδεχομένως σε αποκλίσεις στις προβλέψεις της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Επίσης, οι υπολογισμοί της συμπεριφοράς πυρκαγιάς εκτελούνται ανεξάρτητα για κάθε κελί στο τοπίο. Ενώ αυτό επιτρέπει λεπτομερή ανάλυση, μπορεί να παραβλέψει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ γειτονικών κελιών, οι οποίες μπορεί να είναι σημαντικές για την κατανόηση της εξάπλωσης και της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς σε πολύπλοκα τοπία. Παράλληλα, η ακρίβεια των προβλέψεων του FlamMap εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα και την ακρίβεια των δεδομένων εισόδου, όπως τα μοντέλα καύσιμης ύλης και οι συνθήκες υγρασίας. Εάν τα δεδομένα εισόδου είναι ανακριβή ή ξεπερασμένα, οι υπολογισμοί συμπεριφοράς πυρκαγιάς που προκύπτουν μπορεί να μην είναι αξιόπιστοι.

Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί συχνά για τις αναλύσεις του ακραίες καιρικές συνθήκες και συνθήκες υγρασίας της καύσιμης ύλης που σχετίζονται με ιστορικά γεγονότα μεγάλων πυρκαγιών. Αυτή η εξάρτηση από ιστορικά δεδομένα μπορεί να μην λαμβάνει υπόψη τις μελλοντικές αλλαγές στο κλίμα ή στις πρακτικές διαχείρισης γης, περιορίζοντας ενδεχομένως τη δυνατότητα εφαρμογής του σε εξελισσόμενα περιβάλλοντα πυρκαγιών. Παρόλο που το FlamMap έχει εισαγάγει νέες δυνατότητες για την ανάλυση των επιδράσεων της επεξεργασίας της καύσιμης ύλης στην κίνηση της πυρκαγιάς, τα χαρακτηριστικά αυτά είναι ακόμη σχετικά νέα και μπορεί να μην έχουν επικυρωθεί εκτενώς σε διάφορα σενάρια του πραγματικού κόσμου. Αν και το FlamMap μπορεί να χρησιμοποιήσει χωρικά πεδία ανέμου για σύνθετα εδάφη, η παραγωγή αυτών των πεδίων γίνεται εκτός του προγράμματος. Αυτό μπορεί να εισάγει πρόσθετη πολυπλοκότητα και πιθανές ανακρίβειες, εάν τα δεδομένα ανέμου δεν αναπαρίστανται με ακρίβεια. Συνοπτικά, ενώ το FlamMap είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς, οι περιορισμοί του περιλαμβάνουν υποθέσεις σχετικά με σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες, εξάρτηση από την ποιότητα των δεδομένων εισόδου και πιθανές παραλείψεις στις χωρικές αλληλεπιδράσεις, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων του και την εφαρμογή τους



Εικόνα 14: Τα θέματα δεδομένων εισόδου που απαιτούνται για την εκτέλεση του FlamMap περιέχονται σε ένα αρχείο «Landscape» που κατασκευάζεται από αρχεία ASCII Grid τα οποία είναι πανομοιότυπης ανάλυσης, συν-καταχωρημένα και ίσης έκτασης. (Finney, 2006)

σε στρατηγικές διαχείρισης πυρκαγιών (Finney, 2006).



Εικόνα 15: Παραδείγματα αποτελεσμάτων από το FlamMap για (a) τον ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς, (b) τη δραστηριότητα της πυρκαγιάς κόμης (0=καμία, 1=επιφανειακή πυρκαγιά, 2=καύση δέντρων ή παθητική πυρκαγιά κόμης και 3=ενεργή πυρκαγιά κόμης), (c) την εξέλιξη της πυρκαγιάς (λευκές περιμέτρους) που προσομοιώθηκε με τη μέθοδο του ελάχιστου χρόνου ταξιδιού (MTT) και (d) τις διαδρομές της πυρκαγιάς που προέκυψαν από την MTT (οι έντονες κίτρινες γραμμές διακρίνουν τις κύριες διαδρομές από όλες τις διαδρομές με γαλάζιο χρώμα). (Finney, 2006)

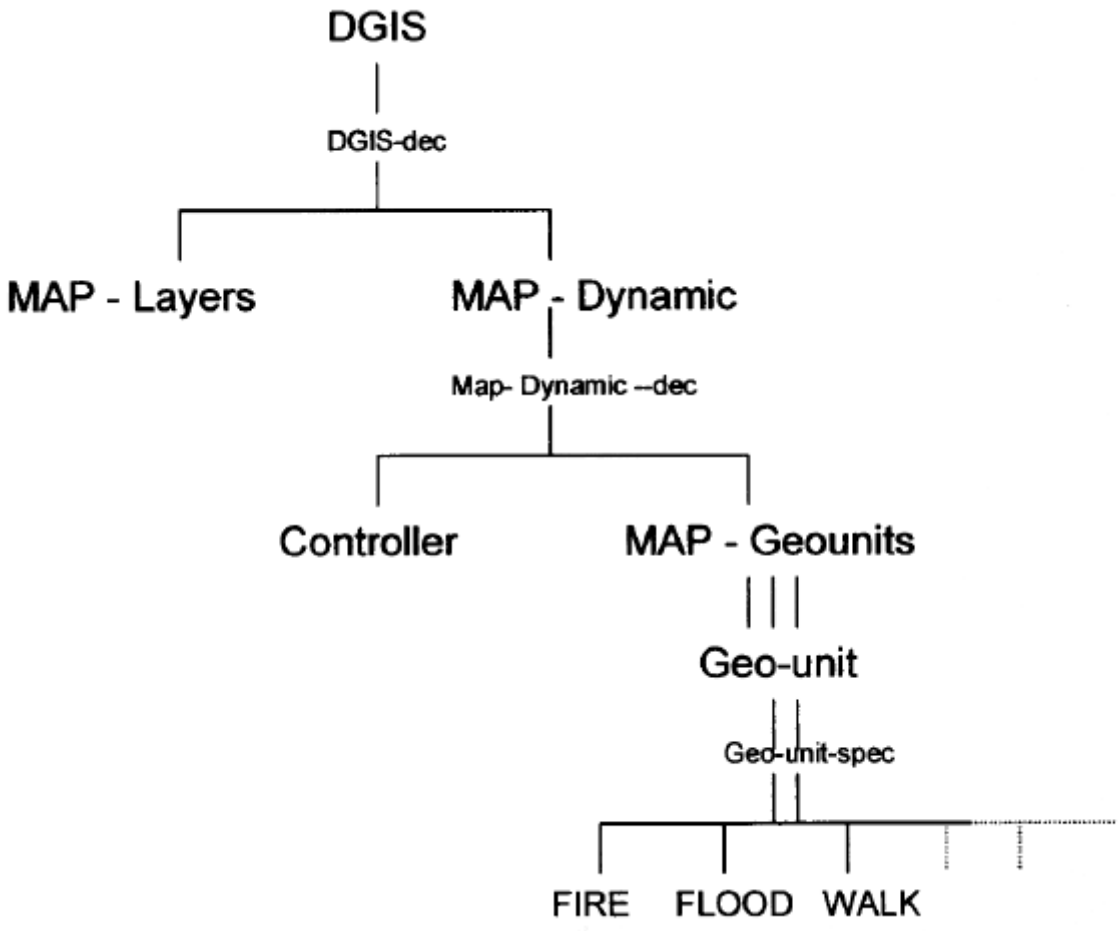
5.7 Geofogo

Το σύστημα αυτό είχε ως αρχικό στόχο την ανάπτυξη ενός Δυναμικού Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (DGIS – Dynamic Geographical Information System) για την προσομοίωση χωροχρονικών φαινομένων. Έχει σχεδιαστεί για να είναι ένα δυναμικό raster GIS που ενσωματώνει διάφορες μεθοδολογίες, συμπεριλαμβανομένης της μοντελοποίησης και της προσομοίωσης, των προδιαγραφών συστημάτων διακριτών γεγονότων και των τεχνικών προσομοίωσης που βασίζονται στη γνώση. Γενικά το DGIS ορίζεται ως ενδομορφικό σύστημα, επιτρέποντας στους χρήστες να το μετατρέψουν σε διαφορετικά περιβάλλοντα ειδικών εφαρμογών με βάση επιλεγμένα μοντέλα. Υποστηρίζει πολύπλοκες χωρικές προσομοιώσεις, φιλοξενώντας συνεχή χρόνο, πολλαπλές αναλύσεις και ευφυείς πράκτορες. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε ένα συγκεκριμένο επιχειρησιακό παράδειγμα του DGIS για την προσομοίωση της εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών που ονομάστηκε Geofogo. Το Geofogo αναπτύχθηκε με τη χρήση Object Pascal και έχει σχεδιαστεί, για να προβλέπει την πιθανή συμπεριφορά της πυρκαγιάς με βάση δεδομένα καιρού που εισάγονται σε μορφή πίνακα. Το σύστημα επιτρέπει τη δυναμική μετατροπή στατικών θέσεων σε χωρικούς επεξεργαστές, επιτρέποντας προσομοιώσεις συνεχούς χρόνου χωρίς προκαθορισμένα χρονικά βήματα. Αυτή η ευελιξία είναι ζωτικής σημασίας για την ακριβή μοντελοποίηση φαινομένων, όπως οι δασικές πυρκαγιές, όπου οι συνθήκες μπορούν να αλλάξουν γρήγορα.

Η ονομασία «dec» προέρχεται από το «decomposition» και η ονομασία «spec» προέρχεται από το «specialization». Το μοντέλο DGIS αποτελείται από δύο οντότητες, την MAP-Dynamic και την MAP-Layers. Η MAP-Layers είναι η ενότητα που περιλαμβάνει τη βάση χωρικών δεδομένων ως σύνολο επιπέδων χαρακτηριστικών. Το MAP-Dynamic είναι ένα δυναμικό δίκτυο δομών με δύο στοιχεία, τον ελεγκτή και τα MAP-Geounits. Ο ελεγκτής είναι ένα εκτελεστικό όργανο και το MAP-Geounits είναι το σύνολο Geo-units με απροσδιόριστο αριθμό στοιχείων που αντιπροσωπεύονται από τις τρεις κάθετες γραμμές. Τα MAP-Layers και MAP-Dynamic είναι δύο αναπαραστάσεις της ίδιας χωρικής πραγματικότητας. Οι Geo-units δημιουργούνται και εξαλείφονται μόνο, όταν πραγματοποιούνται προσομοιώσεις, καθεμία με ταυτότητα που εξαρτάται από την τοποθεσία που αντιπροσωπεύει και ενσωματώνει μια περίπτωση ενός συγκεκριμένου

μοντέλου. Η επιλογή των μοντέλων δίνεται από αυτά που υπάρχουν στη βάση μοντέλων (FIRE, FLOOD, WALK...).

Σχεδιάγραμμα 6: Ένα πρωτότυπο του Dynamic GIS

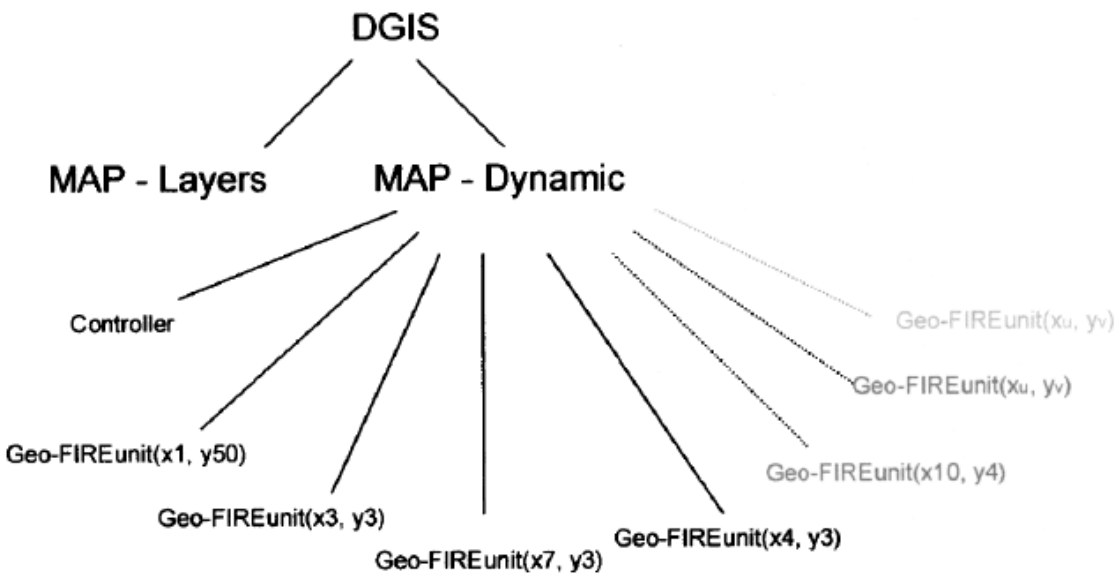


Ως εκ τούτου το Geofogo είναι ένα δυναμικό γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (DGIS) ειδικά σχεδιασμένο για την προσομοίωση της εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών και την πρόβλεψη της πιθανής συμπεριφοράς πυρκαγιών. Ενσωματώνει διάφορες εισόδους δεδομένων για την αποτελεσματική μοντελοποίηση σύνθετων χωρικών φαινομένων. Το σύστημα λειτουργεί, εφαρμόζοντας το μοντέλο πυρκαγιάς του Rothermel υπό ελεγχόμενες συνθήκες, οι οποίες περιλαμβάνουν συγκεκριμένες παραμέτρους για την καύσιμη ύλη, τον καιρό και την τοπογραφία. Αυτή η ελεγχόμενη ρύθμιση επιτρέπει ακριβείς συγκρίσεις μεταξύ πραγματικών συμβάντων πυρκαγιάς και προσομοιωμένων αποτελεσμάτων. Για την ενίσχυση της ακρίβειας των προσομοιώσεων, το Geofogo βασίζεται σε δεδομένα που συλλέγονται κατά τη διάρκεια των περιόδων πυρκαγιάς. Οι ομάδες πεδίου συγκεντρώνουν πληροφορίες σχετικές με τα συμβάντα πυρκαγιάς, οι

οποίες στη συνέχεια ψηφιοποιούνται για χρήση στο σύστημα. Συνολικά 15 παρακολουθούμενες πυρκαγιές παρείχαν επαρκή δεδομένα για ουσιαστικές συγκρίσεις μεταξύ της πραγματικής και της προσομοιωμένης συμπεριφοράς πυρκαγιάς.

Διαθέτει μια γραφική διεπαφή χρήστη που αναπτύχθηκε με τη χρήση Object Pascal, η οποία διευκολύνει την αλληλεπίδραση του χρήστη και την οπτικοποίηση των προσομοιώσεων εξάπλωσης πυρκαγιάς. Η διεπαφή εμφανίζει συνεχή κίνηση των μετώπων πυρκαγιάς και ένα ρολόι που παρακολουθεί τον χρόνο σε σημαντικά γεγονότα, όπως η ανάφλεξη νέων πυρήνων πυρκαγιάς. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για τη διαχείριση σύνθετων χωρικών φαινομένων, συμπεριλαμβανομένων των επιδράσεων του ανέμου στην εξάπλωση της πυρκαγιάς. Το Geofogo έχει εφαρμοστεί επιχειρησιακά για την προσομοίωση δασικών πυρκαγιών, αποδεικνύοντας την ικανότητά του να χειρίζεται μεγάλα σύνολα χωρικών δεδομένων και να εκτελεί υπολογισμούς αποτελεσματικά, ακόμη και σε υπολογιστές με όχι τεράστια υπολογιστική ισχύ. Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει δεδομένα καιρού με χρονοσήμανση για να ενισχύσει τον ρεαλισμό των προσομοιώσεων, εφαρμόζοντας τα δεδομένα αυτά σε ολόκληρη την περιοχή της

Σχεδιάγραμμα 7: Το γενικό μοντέλο DGIS μετασχηματίζεται σε ένα ειδικό δέντρο σύνθεσης, όπου οι Geo-units προσδιορίζονται ως μονάδες Geo-FIRE, δημιουργώντας έτσι ένα από τα πιθανά περιβάλλοντα μοντελοποίησης το οποίο ονομάσαμε Geofogo. Οι διακεκομμένες ανοιχτές γκρι γραμμές αντιπροσωπεύουν την αβεβαιότητα του αριθμού των ενεργών Geo-FIRE σε κάθε στιγμή.



πυρκαγιάς σε κατάλληλες χρονικές στιγμές.

Βέβαια υπάρχουν πολλαπλές πιθανές πηγές σφάλματος στις προσομοιώσεις, συμπεριλαμβανομένων ζητημάτων που σχετίζονται με τη συλλογή δεδομένων, την αναπαράσταση ψηφιακών χαρτών, τη μοντελοποίηση της εξάπλωσης της πυρκαγιάς και την ίδια τη διαδικασία προσομοίωσης. Η απομόνωση των σφαλμάτων που σχετίζονται ειδικά με τη διαδικασία προσομοίωσης δεν είναι εφικτή, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Επίσης, δεν χρησιμοποιήθηκαν όλες οι διαθέσιμες δομές της προτεινόμενης προσέγγισης στο παράδειγμα προσομοίωσης πυρκαγιάς τους. Για παράδειγμα, χρησιμοποιήθηκε ένα πλέγμα σταθερών διαστάσεων για την αναπαράσταση του χώρου και χρησιμοποιήθηκε μόνο ένας τύπος ατομικού μοντέλου. Αυτή η περιορισμένη εφαρμογή των διαθέσιμων δομών μπορεί να περιορίσει την ικανότητα του συστήματος να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητές του για πιο σύνθετα σενάρια. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι δεν είναι ρεαλιστικό να αναμένεται ακριβής αντιστοιχία μεταξύ πραγματικών και προσομοιωμένων πυρκαγιών λόγω της εγγενούς μεταβλητότητας στη συμπεριφορά των πυρκαγιών και των περιορισμών των χρησιμοποιούμενων μοντέλων. Αυτή η ασυμφωνία μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα παράλειψης στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, όπως φάνηκε σε ορισμένες περιπτώσεις όπου οι προσομοιώσεις δεν ευθυγραμμίστηκαν καλά με τα πραγματικά συμβάντα πυρκαγιάς. Τέλος, παρουσιάζονται περιορισμοί στην ακριβή προσομοίωση σεναρίων με φαινόμενα στροβίλου, τα οποία μπορούν να μεταβάλλουν την κατεύθυνση του ανέμου και να επηρεάσουν τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις όπου τα μετεωρολογικά δεδομένα συλλέγονται από απόσταση, οδηγώντας σε αποκλίσεις στην ακρίβεια της προσομοίωσης (De Vasconelos, et al., 2002).

5.8 LANDFIRE

Το LANDFIRE ξεκίνησε ως απάντηση στην αυξανόμενη εμφάνιση μεγα-πυρκαγιών, οι οποίες είναι πυρκαγιές μεγάλης κλίμακας που έχουν σημαντικές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και τις ανθρώπινες κοινότητες. Στόχος του είναι να παρέχει συνεπή, ολοκληρωμένα γεωχωρικά δεδομένα για τη βλάστηση, την καύσιμη ύλη και το έδαφος για την υποστήριξη των αποφάσεων διαχείρισης των πυρκαγιών. Το LANDFIRE προσφέρει στρώματα γεωχωρικών δεδομένων για όλες τις άγριες εκτάσεις ανεξαρτήτως

τύπου. Τα δεδομένα αυτά είναι ζωτικής σημασίας για τους διαχειριστές που χρειάζονται αξιόπιστες πληροφορίες για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς και των επιπτώσεων των πυρκαγιών, οι οποίες μπορούν να καθοδηγήσουν τις πολιτικές και τις διαχειριστικές τους αποφάσεις. Τα βασικά στρώματα δεδομένων δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια ενός πενταετούς προγράμματος έρευνας και ανάπτυξης που ολοκληρώθηκε το 2009. Υπάρχουν διαδικασίες για την περιοδική ενημέρωση των στρωμάτων καύσιμης ύλης και βλάστησης γεγονός που διασφαλίζει ότι τα δεδομένα παραμένουν επίκαιρα και αντικατοπτρίζουν τις αλλαγές που οφείλονται τόσο στις ανθρώπινες δραστηριότητες όσο και στις φυσικές διαταραχές. Το LANDFIRE έχει καθιερωθεί ως η κύρια πηγή δεδομένων για δραστηριότητες μοντελοποίησης που ευθυγραμμίζονται με τους στόχους της Εθνικής Συνεκτικής Στρατηγικής Διαχείρισης Άγριων Πυρκαγιών των Ηνωμένων Πολιτειών (National Cohesive Wildland Fire Management Strategy). Αυτή η θεσμοθέτηση υπογραμμίζει τη σημασία του έργου στις εθνικές προσπάθειες διαχείρισης των πυρκαγιών και τη συνεχή ανάγκη για επικαιροποιήσεις και βελτιώσεις ως απάντηση στις μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Το LANDFIRE λειτουργεί ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα που έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει τη διαχείριση των πυρκαγιών στην άγρια φύση μέσω της ενσωμάτωσης διαφόρων πηγών δεδομένων και τεχνικών μοντελοποίησης. Ξεκινά με την απόκτηση και διόρθωση των υφιστάμενων επιπέδων δεδομένων του Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS). Αυτό περιλαμβάνει μια ποικιλία δεδομένων, όπως εικόνες Landsat-TM, εδάφη και μετεωρολογικές πληροφορίες. Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν 57 επίπεδα δεδομένων Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών για τη δημιουργία ενός ισχυρού συνόλου δεδομένων για ανάλυση. Το έργο περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση 22 βιοφυσικών διαβαθμίσεων που βοηθούν στην κατανόηση των οικολογικών χαρακτηριστικών διαφορετικών τοπίων. Αυτή η μοντελοποίηση είναι ζωτικής σημασίας για την πρόβλεψη του τρόπου με τον οποίο αυτά τα τοπία μπορούν να ανταποκριθούν στη φωτιά και σε άλλες διαταραχές

Το LANDFIRE δημιουργεί 13 στρώματα καύσιμης ύλης άγριας γης που είναι απαραίτητα για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των πυρκαγιών. Τα στρώματα αυτά παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τους τύπους και τις συνθήκες της βλάστησης που μπορούν να επηρεάσουν τη δυναμική της πυρκαγιάς. Μια σημαντική

πτυχή του είναι η κατάρτιση μιας βάσης δεδομένων αναφοράς πεδίου, η οποία περιλαμβάνει πάνω από 800.000 καταγραφές βλάστησης από διάφορες υπηρεσίες και συνεργάτες. Αυτή η εκτεταμένη βάση δεδομένων διασφαλίζει ότι τα δεδομένα είναι συνεπή και αξιόπιστα σε όλη την επικράτεια των Ηνωμένων Πολιτειών. Επίσης, αναπτύσσει μοντέλα δυναμικής βλάστησης (Vegetation Dynamics Models - VDM) για τις πολιτείες και τη μετάβαση. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των αλλαγών του τοπίου με την πάροδο του χρόνου, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις φυσικές διεργασίες όσο και τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Αυτό βοηθά στην αξιολόγηση πιθανών αλλαγών στη συμπεριφορά και τις επιπτώσεις των πυρκαγιών.

Τα δεδομένα που παράγονται από το LANDFIRE διατίθενται δημόσια στο διαδίκτυο, επιτρέποντας σε οποιονδήποτε χρήστη GIS να κατεβάσει έως και 24 επίπεδα δεδομένων. Αυτή η προσβασιμότητα είναι ζωτικής σημασίας για τους διαχειριστές πυρκαγιών και τους ερευνητές που πρέπει να διεξάγουν αναλύσεις του τοπίου και να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με τη διαχείριση των πυρκαγιών. Για να διατηρηθεί η συνάφεια των δεδομένων, το LANDFIRE έχει καθιερώσει διαδικασίες για περιοδικές ενημερώσεις. Αυτές οι ενημερώσεις αντικατοπτρίζουν τις αλλαγές που οφείλονται σε διαχειριστικές δραστηριότητες, φυσικές διαταραχές και άλλους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τη βλάστηση και τις συνθήκες καύσιμης ύλης.

Ενώ το πρόγραμμα LANDFIRE παρέχει πολύτιμα δεδομένα και πληροφορίες για τη διαχείριση των πυρκαγιών σε άγρια περιοχή, υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί. Η λεπτομερής περιγραφή των δεδομένων και των διαδικασιών του υπερβαίνει το πεδίο εφαρμογής του, γεγονός που μπορεί να περιορίσει την κατανόηση των περιπλοκών των δεδομένων για ορισμένους χρήστες. Αν και τα δεδομένα είναι διαθέσιμα για τις συνορεύουσες Ηνωμένες Πολιτείες, η διαθεσιμότητα και οι διαδικασίες συλλογής δεδομένων διαφέρουν για την Αλάσκα και τη Χαβάη. Αυτή η ασυνέπεια μπορεί να επηρεάσει τη δυνατότητα εφαρμογής των δεδομένων LANDFIRE σε αυτές τις περιοχές, περιορίζοντας ενδεχομένως τη χρησιμότητά τους για ολοκληρωμένες εθνικές στρατηγικές διαχείρισης πυρκαγιών. Επίσης, τα δεδομένα, αν και ισχυρά, μπορεί να μην αποτυπώνουν πλήρως την ταχέως μεταβαλλόμενη δυναμική της συμπεριφοράς των πυρκαγιών και των περιβαλλοντικών συνθηκών, ιδίως στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής και των ακραίων καιρικών φαινομένων.

Η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται από την ποιότητα και τη συνέπεια των υφιστάμενων δεδομένων βλάστησης και καύσιμης ύλης. Τυχόν ανακρίβειες ή κενά στα αρχικά σύνολα δεδομένων μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένες αναλύσεις και λήψη αποφάσεων. Επίσης το LANDFIRE χρησιμοποιεί διάφορα μοντέλα για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς και των επιπτώσεων της πυρκαγιάς, τα οποία βασίζονται σε υποθέσεις που μπορεί να μην ισχύουν πάντα σε πραγματικές συνθήκες. Η εξάρτηση από μοντέλα μπορεί να εισάγει αβεβαιότητα, ιδίως σε πρωτοφανείς συνθήκες πυρκαγιάς, πράγμα που εμφανίζεται σε όλα τα συστήματα αυτού του τύπου. Αν και τα δεδομένα του LANDFIRE είναι προσβάσιμα από το κοινό, η τεχνική φύση των δεδομένων και η ανάγκη για εμπειρογνωμοσύνη στα συστήματα GIS μπορεί να θέσει εμπόδια σε ορισμένους χρήστες, περιορίζοντας την αποτελεσματική χρήση των δεδομένων από μη ειδικούς. Συνοπτικά, ενώ το LANDFIRE αποτελεί σημαντική πρόοδο στα δεδομένα διαχείρισης πυρκαγιών, οι περιορισμοί του περιλαμβάνουν γεωγραφικές ασυνέπειες, εξάρτηση από την ποιότητα των υφιστάμενων δεδομένων και τις προκλήσεις που θέτει η δυναμική φύση της διαχείρισης πυρκαγιών και οι παραδοχές μοντελοποίησης.

5.9 Cell2fire

Το Cell2Fire παρουσιάζεται ως ένας νέος προσομοιωτής που έχει σχεδιαστεί ειδικά για τη μοντελοποίηση της ανάπτυξης πυρκαγιών σε δασικές εκτάσεις. Πρόκειται για ένα μοντέλο βασισμένο σε κυτταρικά αυτόματα που χωρίζει το τοπίο σε κύτταρα, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από διάφορα χαρακτηριστικά, όπως ο τύπος της καύσιμης ύλης, οι καιρικές συνθήκες, η περιεκτικότητα σε υγρασία και η τοπογραφία. Αυτή η δομή επιτρέπει τη λεπτομερή αναπαράσταση του περιβάλλοντος πυρκαγιάς. Ο προσομοιωτής είναι σε θέση να χρησιμοποιεί καθιερωμένα μοντέλα εξάπλωσης πυρκαγιάς, όπως το Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Αυτό το χαρακτηριστικό του επιτρέπει την αποτελεσματική πρόβλεψη της ανάπτυξης της πυρκαγιάς, είτε για μεμονωμένες πυρκαγιές είτε ως μέρος ευρύτερων προσομοιώσεων διαχείρισης του τοπίου.

Το Cell2Fire έχει σχεδιαστεί, για να διευκολύνει τη λήψη αποφάσεων στην επί τόπου διαχείριση πυρκαγιών. Επιτρέπει την ενσωμάτωση και την αξιολόγηση διαφόρων μοντέλων που σχετίζονται με την επεξεργασία της καύσιμης ύλης και τα σχέδια συγκομιδής. Έχει επικυρωθεί, συγκρίνοντας τις προβλέψεις του με τα πραγματικές πυρκαγιές που παράγονται από έναν επικυρωμένο προσομοιωτή (Prometheus). Αυτή η

διαδικασία επικύρωσης διασφαλίζει ότι οι προβλέψεις του μοντέλου είναι αξιόπιστες και ακριβείς. Το μοντέλο υλοποιείται ως έργο ανοικτού κώδικα, το οποίο προωθεί την προσβασιμότητα και τη συνεργασία. Αξιοποιεί τους παράλληλους υπολογισμούς για την αποτελεσματική προσομοίωση των πυρκαγιών σε μεγάλες χωρικές και χρονικές κλίμακες, επιτυγχάνοντας σημαντικές βελτιώσεις στην ταχύτητα (έως και 30 φορές ταχύτερα), ενώ παράλληλα διατηρεί υψηλή ακρίβεια (πάνω από 90%) σε σύγκριση με τους προσομοιωτές τελευταίας τεχνολογίας

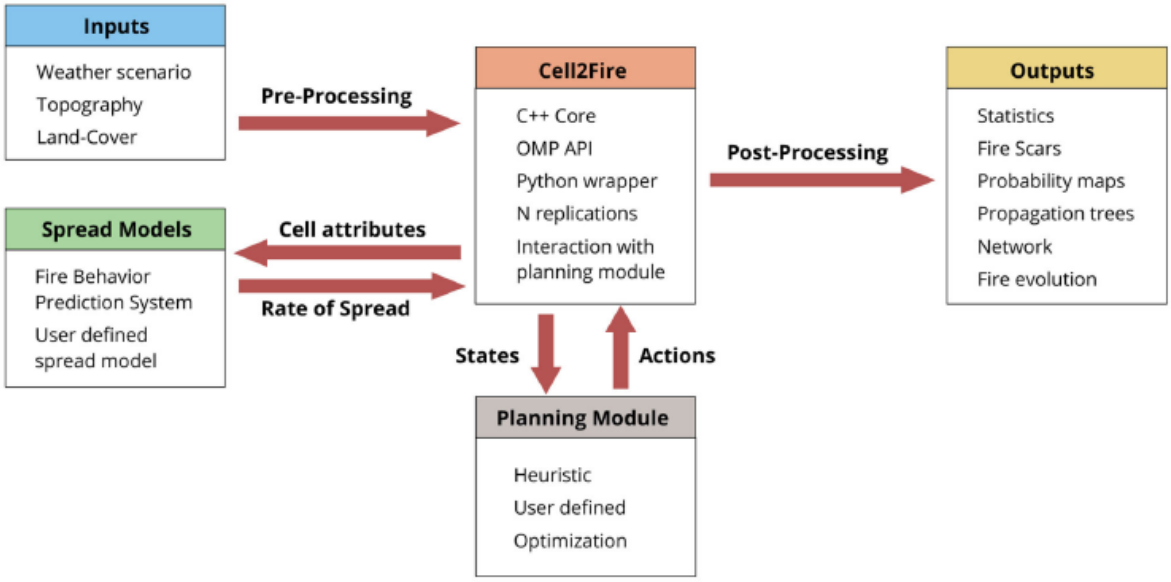
Το Cell2Fire λειτουργεί ως ένας εξελιγμένος προσομοιωτής κυτταρικών αυτομάτων που έχει σχεδιαστεί για τη μοντελοποίηση της ανάπτυξης πυρκαγιών σε άγρια περιοχή. Αρχικά, το τοπίο χωρίζεται σε ένα πλέγμα κυττάρων, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως ο τύπος της καύσιμης ύλης, οι καιρικές συνθήκες, η περιεκτικότητα σε υγρασία και η τοπογραφία. Αυτή η κατάτμηση επιτρέπει τη λεπτομερή προσομοίωση του τρόπου με τον οποίο η φωτιά αλληλεπιδρά με διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Πριν από την εκτέλεση προσομοιώσεων, τα ακατέργαστα δεδομένα που σχετίζονται με την καύσιμη ύλη, την τοπογραφία και τον καιρό της πυρκαγιάς υποβάλλονται σε προεπεξεργασία σε μορφή συμβατή με το Cell2Fire. Το βήμα αυτό διασφαλίζει ότι το μοντέλο διαθέτει τις απαραίτητες πληροφορίες για την ακριβή προσομοίωση της ανάπτυξης της πυρκαγιάς

Η διαδικασία προσομοίωσης αποτελείται από τρία κύρια βήματα:

1) Προεπεξεργασία δεδομένων: Όπως αναφέρθηκε, το αρχικό βήμα περιλαμβάνει την προετοιμασία των δεδομένων εισόδου.
2) Προσομοίωση ανάπτυξης πυρκαγιάς: Το μοντέλο προσομοιώνει την ανάπτυξη της πυρκαγιάς σε όλο το πλέγμα με βάση τις καθορισμένες μεταβλητές του περιβάλλοντος πυρκαγιάς. Ενσωματώνει στοχαστικά στοιχεία, όπως σενάρια καιρού και πιθανότητες ανάφλεξης, τα οποία μπορούν να ρυθμιστούν από τον χρήστη, ώστε να αντικατοπτρίζουν διαφορετικές συνθήκες.
3) Παραγωγή εξόδου: Μετά την προσομοίωση, το Cell2Fire παράγει αποτελέσματα που παρέχουν πληροφορίες για τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς, όπως ο ρυθμός εξάπλωσης, η καμένη έκταση και οι περιοχές που είναι πιο ευάλωτες σε μελλοντικές πυρκαγιές.

Το Cell2Fire μπορεί να χρησιμοποιήσει καθιερωμένα μοντέλα εξάπλωσης πυρκαγιάς, όπως το Canadian Forest Fire Behavior Prediction System, για να ενισχύσει τις προγνωστικές του ικανότητες. Η ενσωμάτωση αυτή επιτρέπει μια πιο ολοκληρωμένη

Σχεδιάγραμμα 8: Πλαίσιο προσομοίωσης και βελτιστοποίησης Cell2Fire.



κατανόηση της δυναμικής των πυρκαγιών στο τοπίο. Το μοντέλο έχει επικυρωθεί με πραγματικά δεδομένα πυρκαγιάς, συγκρίνοντας τις προβλέψεις του με τα αποτελέσματα προσομοίωσης πυρκαγιάς που παράγονται από άλλους επικυρωμένους προσομοιωτές, όπως ο Prometheus. Αυτή η διαδικασία επικύρωσης διασφαλίζει ότι το Cell2Fire παρέχει αξιόπιστα και ακριβή αποτελέσματα. Ως έργο ανοικτού κώδικα, το Cell2Fire προωθεί τη συνεργασία και την προσβασιμότητα. Έχει σχεδιαστεί για να εκτελείται αποτελεσματικά τόσο σε τυπικούς υπολογιστές όσο και σε υπολογιστικά συστήματα υψηλών επιδόσεων, αξιοποιώντας την παράλληλη εκτέλεση για την προσομοίωση μεγάλων τοπίων γρήγορα και με ακρίβεια.

Ενώ το Cell2Fire παρουσιάζει ένα ισχυρό πλαίσιο για την προσομοίωση της ανάπτυξης πυρκαγιών σε άγρια περιοχή, έχει αρκετούς περιορισμούς. Ένας σημαντικός περιορισμός είναι ότι το μοντέλο δεν ενσωματώνει πλήρως τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς κατά την επιλογή των περιοχών που αντιμετωπίζονται. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μη βέλτιστα σχέδια διαχείρισης που δεν λαμβάνουν υπόψη τη δυναμική φύση της εξάπλωσης της πυρκαγιάς και την αλληλεπίδρασή της με το τοπίο. Επίσης το μοντέλο περιλαμβάνει μια τυχαία ευρετική αντιμετώπιση για σκοπούς σύγκρισης, η

οποία μπορεί να μην αντικατοπτρίζει πρακτικές στρατηγικές διαχείρισης. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε λιγότερο αποτελεσματικά σχέδια διαχείρισης, καθώς δεν δίνει προτεραιότητα στις περιοχές με βάση την ευαισθησία τους σε πυρκαγιές ή άλλους κρίσιμους παράγοντες. Ως εκ τούτου, ενώ το μοντέλο επιτρέπει περιορισμούς που καθορίζονται από τον χρήστη, η ευελιξία μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικά πολύπλοκα σχέδια διαχείρισης που είναι δύσκολο να εφαρμοστούν στην πράξη. Οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων ενδέχεται να δυσκολεύονται να εξισορροπήσουν αποτελεσματικά πολλαπλούς περιορισμούς, γεγονός που θα μπορούσε να εμποδίσει τη χρηστικότητα του μοντέλου σε σενάρια του πραγματικού κόσμου.

Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα των ενεργειών καταστολής πυρκαγιών δεν μοντελοποιούνται στο Cell2Fire. Η παράλειψη αυτή περιορίζει τη δυνατότητα εφαρμογής του μοντέλου σε σενάρια όπου χρησιμοποιούνται ενεργές στρατηγικές διαχείρισης πυρκαγιών, με αποτέλεσμα να αλλοιώνονται ενδεχομένως τα αποτελέσματα σε πραγματικές εφαρμογές. Μολονότι το μοντέλο μπορεί να μειώσει τον μέσο ρυθμό εξάπλωσης (ROS – Rate Of Spread), έχει περιορισμούς ως προς την επίδρασή του στις μέγιστες τιμές ROS. Για παράδειγμα, ορισμένα σχέδια διαχείρισης μειώνουν το μέγιστο ROS μόνο κατά ένα μικρό ποσοστό, το οποίο μπορεί να μην είναι επαρκές για τον μετριασμό της ακραίας συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Τέλος, το μοντέλο μπορεί να εμφανίσει κακή παράλληλη απόδοση σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, ιδίως όταν ορισμένοι συνδυασμοί τύπων καυσίμων και κατανομών δασών οδηγούν σε λιγότερες ταυτόχρονες καύσεις. Αυτό μπορεί να επηρεάσει την αποδοτικότητα των προσομοιώσεων και τους συνολικούς χρόνους εκτέλεσης (Pais, et al., 2021).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Παρά τις πολυάριθμες δημοσιεύσεις στη βιβλιογραφία και τα μοντέλα που έχουν προταθεί, δεν υπάρχει μέχρι στιγμής ένα ενιαίο ολοκληρωμένο μοντέλο συμπεριφοράς των πυρκαγιών σε άγρια περιοχή. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη γνώσης του ακριβή τρόπου διάδοσης της πυρκαγιάς, αλλά και των φυσικών και χημικών διεργασιών που την επηρεάζουν. Αν σε αυτά προσθέσουμε την τοπογραφία, τους περιβαλλοντικούς παράγοντες και τις αλληλεπιδράσεις τους, μπορούμε να κατανοήσουμε ότι η πολυπλοκότητα του όλου εγχειρήματος καθίσταται τεράστια. Παρ' όλα αυτά τα μοντέλα που έχουν προταθεί μετά από συγκρίσεις με πραγματικά γεγονότα φωτιάς παρουσιάζουν αποτελέσματα αρκετά κοντά με την πραγματικότητα.

Δεν μπορούμε με ακρίβεια να πούμε ποιος από τους πέντε τύπους μοντέλων (Εμπειρικά και ημι-εμπειρικά, Φυσικά μοντέλα, Μοντέλα προσομοίωσης με χρήση πολλαπλών κλιμάκων, Μοντέλα βασισμένα σε GIS δεδομένα και Υβριδικά μοντέλα) είναι αποτελεσματικότερος. Πέρα από κάποιες ομοιότητες παρουσιάζουν και σημαντικές διαφορές, οι οποίες καθιστούν το κάθε μοντέλο κατάλληλο για διαφορετικές συνθήκες. Είναι προφανές ότι το κάθε μοντέλο έχει πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα που αναδεικνύονται από την εγγενή συμπεριφορά του αλλά και από τις συνθήκες της πυρκαγιάς.

Τα εμπειρικά και ημι-εμπειρικά μοντέλα κάνουν μια εκτίμηση της πιθανής κατεύθυνσης διάδοσης της πυρκαγιάς, συνήθως με βάση την κατεύθυνση του ανέμου που φυσάει στην περιοχή. Αυτό επιτυγχάνεται με υπολογισμούς που ουσιαστικά δημιουργούν ένα σχέδιο πάνω σε ένα πλέγμα που είναι ο χάρτης της περιοχής που έχει ξεσπάσει η πυρκαγιά. Βασίζονται σε παρατηρήσεις που έχουν γίνει σε πραγματικές πυρκαγιές, αλλά και σε δεδομένα που έχουν προκύψει από πειράματα σε εργαστήριο. Σαν έξοδο παράγουν τον συντελεστή ROS (Rate Of Spread) της πυρκαγιάς, την γεωμετρία της περιμέτρου της φωτιάς, οπότε και την περιοχή που έχει καεί ή υποστεί ζημιά. Συνήθως είναι μονοδιάστατα μοντέλα, γεγονός που καθιστά την υλοποίησή τους σχετικά εύκολη. Εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τα δεδομένα εισόδου, αλλά και από τις απλουστεύσεις και στρογγυλοποιήσεις που έχουν γίνει για την υλοποίησή τους.

Τα φυσικά μοντέλα βασίζονται στην θεωρία φυσικών και χημικών φαινομένων και διαδικασιών. Στηρίζονται σε διαφορικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της εξάπλωσης της πυρκαγιάς, γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα των υπολογισμών. Βασική έξοδο αποτελεί ο συντελεστή ROS, ενώ μπορούν να υπολογιστούν και στοιχεία, όπως η παραγόμενη έκλυση θερμότητας, τόσο στην ατμόσφαιρα όσο και στην τριγύρω άκαυτη περιοχή. Είναι αρκετά αναλυτικά στην περιγραφή της καύσης, με αποτέλεσμα να αναπαριστούν αρκετά καλά την εξάπλωση της πυρκαγιάς. Βασικό μειονέκτημα είναι ότι ενώ συμπεριφέρονται πολύ καλά σε πυρκαγιές μικρής κλίμακας, εμφανίζουν περιορισμούς σε πυρκαγιές μεγάλης κλίμακας. Επίσης, παρουσιάζουν υψηλές ανάγκες σε υπολογιστική ισχύ.

Τα μοντέλα προσομοίωσης με χρήση πολλαπλών κλιμάκων ενσωματώνουν διάφορα υφιστάμενα μοντέλα συμπεριφοράς πυρκαγιάς, όπως για παράδειγμα εκείνων για τις πυρκαγιές επιφάνειας και κόμης, χρησιμοποιώντας τεχνικές διανυσματικής διάδοσης που λαμβάνουν υπόψη, τόσο τους χωρικούς όσο και τους χρονικούς παράγοντες στην ανάπτυξη της πυρκαγιάς. Παράγουν λεπτομερή αποτελέσματα, όπως διανυσματικές περιμέτρους πυρκαγιάς και χάρτες ράστερ που υποδεικνύουν τον ρυθμό εξάπλωσης και την ένταση της πυρκαγιάς σε συγκεκριμένα διαστήματα. Βασικό πλεονέκτημα των μοντέλων αυτών είναι η ικανότητά τους να προσομοιώνουν πολύπλοκες δυναμικές πυρκαγιών υπό διαφορετικές συνθήκες, καθιστώντας τα πολύτιμο πόρο για τη διαχείριση και την έρευνα σχετικά με τις πυρκαγιές. Ωστόσο, υπάρχουν και περιορισμοί, όπως για παράδειγμα η ύπαρξη παραδοχών οι οποίες σπάνια συμβαίνουν σε πραγματικές συνθήκες και μπορούν να αλλοιώσουν την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος. Επιπλέον, τα μοντέλα αυτά εξαρτώνται από τα δεδομένα εισόδου, γεγονός που μπορεί να καταστήσει δύσκολη την εφαρμογή τους σε περιβάλλοντα για τα οποία δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία αλλά και σε πολύπλοκες δυναμικές καταστάσεις.

Τα υβριδικά μοντέλα αποτελούν μια καινοτόμο προσέγγιση στη μελέτη της εξάπλωσης των πυρκαγιών, καθώς συνδυάζουν εμπειρικά και φυσικά στοιχεία, για να παρέχουν πιο ακριβείς και ευέλικτες προβλέψεις. Αυτά τα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί, για να αντιμετωπίσουν τις αδυναμίες των παραδοσιακών προσεγγίσεων, ωστόσο συνοδεύονται από πλεονεκτήματα αλλά και ορισμένους περιορισμούς. Καταφέρνουν να συνδυάσουν την ακρίβεια των φυσικών μοντέλων με την απλότητα και την πρακτικότητα των

εμπειρικών μοντέλων, γεγονός που επιτρέπει τη λήψη πιο ολοκληρωμένων προβλέψεων που λαμβάνουν υπόψη, τόσο τις παρατηρήσεις πεδίου όσο και τις φυσικές διεργασίες της καύσης. Μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικά περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων των δασικών εκτάσεων, των αστικών περιοχών ή των περιοχών που βρίσκονται στα όρια δάσους-πόλης. Συνδυάζουν δεδομένα από GIS, μετεωρολογικούς σταθμούς, δορυφόρους και παρατηρήσεις πεδίου, παρέχοντας έτσι μια πολυδιάστατη εικόνα της εξάπλωσης πυρκαγιών. Λόγω της ενσωμάτωσης φυσικών διεργασιών και πραγματικών δεδομένων, έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν πιο ακριβείς προβλέψεις σε σύγκριση με τα παραδοσιακά εμπειρικά μοντέλα. Από την άλλη, η πολυπλοκότητά τους τα καθιστά ιδιαίτερα απαιτητικά από πλευράς υπολογιστικών πόρων. Η χρήση τους σε πραγματικό χρόνο μπορεί να είναι περιορισμένη σε περιοχές με περιορισμένη τεχνολογική υποδομή. Επίσης, η ακρίβεια των προβλέψεων εξαρτάται από την ποιότητα και την ακρίβεια των δεδομένων εισόδου (τοπογραφία, καύσιμη ύλη, καιρός κ.λπ.). Η έλλειψη επικαιροποιημένων δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα. Απαιτούν εξειδικευμένη γνώση και εμπειρία για τη σωστή χρήση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων τους, γεγονός που τα καθιστά λιγότερο προσιτά σε μη εξειδικευμένους χρήστες. Παράλληλα, είναι δύσκολη η σύγκριση και η επικύρωση των αποτελεσμάτων τους με δεδομένα από πραγματικές πυρκαγιές, ιδίως σε σενάρια όπου οι συνθήκες μεταβάλλονται ραγδαία. Η ανάπτυξη και η συντήρηση υβριδικών μοντέλων είναι χρονοβόρα και δαπανηρή, ιδιαίτερα όταν απαιτείται προσαρμογή τους σε τοπικές συνθήκες. Παρ' όλα αυτά, αντιπροσωπεύουν την αιχμή της τεχνολογίας στην προσομοίωση εξάπλωσης πυρκαγιών. Για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων τους, απαιτείται επένδυση σε τεχνολογικές υποδομές, καθώς και εκπαίδευση των χρηστών που τα εφαρμόζουν.

Η χρήση συστημάτων GIS σε μοντέλα προσομοίωσης πυρκαγιάς επιτρέπει τη συλλογή, ανάλυση και οπτικοποίηση γεωγραφικών δεδομένων, τα οποία είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της εξάπλωσης πυρκαγιών σε μεγάλες περιοχές. Τα GIS-based μοντέλα παρέχουν λεπτομερή ανάλυση της τοπογραφίας, της βλάστησης, της διαθεσιμότητας καύσιμης ύλης και άλλων παραγόντων, διευκολύνοντας την κατανόηση της εξάπλωσης της πυρκαγιάς, ενώ παράλληλα επιτρέπουν τη δημιουργία χαρτών που οπτικοποιούν την εξάπλωση, βοηθώντας στη λήψη αποφάσεων. Ενσωματώνουν δεδομένα από δορυφόρους, εναέριες φωτογραφίες, μετεωρολογικούς σταθμούς και

τοπικές παρατηρήσεις γεγονός που τα καθιστά πολύ ευέλικτα και ικανά να προσαρμοστούν σε διαφορετικά σενάρια. Χρησιμοποιούνται ευρέως από φορείς διαχείρισης καταστροφών για την πρόβλεψη μετώπων πυρκαγιάς και τη βελτιστοποίηση των στρατηγικών καταστολής, καθώς παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για τον καθορισμό προτεραιοτήτων, όπως οι περιοχές που χρειάζονται άμεση εκκένωση ή προστασία. Βασικό προσόν τους είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν, τόσο σε τοπικό επίπεδο για τη διαχείριση μεμονωμένων πυρκαγιών, όσο και σε περιφερειακό ή εθνικό επίπεδο για την παρακολούθηση μεγαλύτερων καταστροφών.

Από την άλλη, η αποτελεσματικότητα των GIS-based μοντέλων εξαρτάται από την ακρίβεια και την επικαιρότητα των γεωγραφικών δεδομένων. Η έλλειψη ενημερωμένων δεδομένων μπορεί να μειώσει την αξιοπιστία τους. Απαιτούν υψηλή υπολογιστική ισχύ, ειδικά όταν αναλύουν μεγάλες περιοχές ή επεξεργάζονται δεδομένα υψηλής ανάλυσης. Σε αντίθεση με τα φυσικά ή υβριδικά μοντέλα, τα GIS-based μοντέλα συχνά δεν προσομοιώνουν τις φυσικές διεργασίες της καύσης με λεπτομέρεια, όπως η αλληλεπίδραση της φωτιάς με την ατμόσφαιρα. Η συλλογή και διαχείριση των γεωγραφικών δεδομένων μπορεί να είναι δαπανηρή, ιδίως για μεγάλες περιοχές ή εξειδικευμένες εφαρμογές. Παρότι παρέχουν ακριβή ανάλυση, η ενσωμάτωση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για την πρόβλεψη της εξάπλωσης της πυρκαγιάς μπορεί να είναι χρονοβόρα και τεχνικά απαιτητική. Η αποτελεσματική χρήση των GIS-based μοντέλων απαιτεί εξειδικευμένη γνώση τόσο της τεχνολογίας GIS όσο και της διαχείρισης πυρκαγιών, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τη χρήση τους σε οργανισμούς με κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό.

Συνοψίζοντας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι τα GIS-based μοντέλα είναι ισχυρά εργαλεία για τη διαχείριση και πρόβλεψη της εξάπλωσης πυρκαγιών, προσφέροντας μεγάλη ακρίβεια και ευελιξία στη χωρική ανάλυση. Ωστόσο, οι υψηλές απαιτήσεις σε δεδομένα, υπολογιστική ισχύ και εξειδικευμένο προσωπικό αποτελούν σημαντικούς περιορισμούς.

Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος για την προσομοίωση εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς εξαρτάται από τις ανάγκες της εφαρμογής, την τοποθεσία, τη διαθεσιμότητα δεδομένων και τους στόχους της προσομοίωσης. Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για τα διάφορα συστήματα γίνεται προφανές ότι παρουσιάζουν μεταξύ τους εγγενείς διαφορές αλλά και μειονεκτήματα, που σε κάποιες περιπτώσεις είναι κρίσιμα για τη λειτουργία τους.

Έτσι το σύστημα Prometheus, που χρησιμοποιείται κυρίως στον Καναδά για την προσομοίωση πυρκαγιών σε δασικά οικοσυστήματα και βασίζεται στο καναδικό σύστημα συμπεριφοράς πυρκαγιάς (Canadian Forest Fire Behavior Prediction System), είναι εξαιρετικό για μεγάλες δασικές εκτάσεις. Δεδομένου ότι είναι προσαρμοσμένο στις τοπικές συνθήκες του Καναδά, είναι λιγότερο ακριβές εκτός Καναδά.

Το FARSITE που αναπτύχθηκε από την USDA για την προσομοίωση πυρκαγιών, χρησιμοποιώντας μοντέλα διασποράς, περιλαμβάνει τοπικά δεδομένα καυσίμων, τοπογραφίας, ανέμου και υγρασίας και παρουσιάζει υψηλή ακρίβεια για σύνθετα τοπογραφικά περιβάλλοντα, ενσωματώνοντας τη δυνατότητα χρήσης τοπικών δεδομένων. Βασικό μειονέκτημά του είναι ότι απαιτεί εκτενή γνώση του συστήματος και αρκετά πολύπλοκη εισαγωγή δεδομένων.

Το Phoenix Rapidfire αναπτύχθηκε στην Αυστραλία για γρήγορη προσομοίωση και ανάλυση πυρκαγιών. Εστιάζει στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς της φωτιάς σε πραγματικό χρόνο και είναι εξαιρετικό για γρήγορες εκτιμήσεις και διαχείριση συμβάντων και συμβατό με περιφερειακά δεδομένα. Ωστόσο, μπορεί να μην αποδίδει καλά σε μακροπρόθεσμες εκτιμήσεις.

Το BEHAVE είναι ένα από τα παλαιότερα μοντέλα, σχεδιασμένο για απλές εκτιμήσεις συμπεριφοράς πυρκαγιάς. Είναι πολύ απλό στη χρήση και εύκολο στην εκμάθηση για βασικές εφαρμογές. Βασικό μειονέκτημά του είναι ότι παρουσιάζει περιορισμένες δυνατότητες σε περίπλοκες συνθήκες.

Το PYROCART είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιεί Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) και εστιάζει στη χαρτογράφηση και την ανάλυση πυρκαγιών. Ενσωματώνει εξαιρετικά τα δεδομένα GIS, ενώ είναι και αρκετά καλό για ανάλυση επικινδυνότητας. Δυστυχώς δεν μπορεί να παρέχει λεπτομερείς δυναμικές προσομοιώσεις.

Το FlamMap είναι εξαιρετικό στη στατική προσομοίωση πυρκαγιάς και αναλύει τις πιθανές διαδρομές πυρκαγιών με βάση δεδομένα καυσίμων και τοπογραφίας. Είναι γρήγορο στην εκτέλεση και αρκετά χρήσιμο για στρατηγικό σχεδιασμό. Βασικός περιορισμός του είναι ότι δεν υποστηρίζει δυναμική προσομοίωση.

Το Geofogo είναι μια πλατφόρμα βασισμένη σε GIS που υποστηρίζει προσομοιώσεις πυρκαγιών που σχεδιάστηκε στην Πορτογαλία. Είναι σχεδιασμένο για τοπικές συνθήκες με καλή προσαρμογή σε δεδομένα GIS. Λόγω ακριβώς του σχεδιασμού του, η χρήση του εκτός περιοχής της σχεδίασής του δεν μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική.

Το LANDFIRE είναι ένα σύστημα χαρτογράφησης και δεδομένων για τις ΗΠΑ, που παρέχει δεδομένα καυσίμων και τοπογραφίας για χρήση σε άλλα μοντέλα. Παρέχει ένα τεράστιο όγκο δεδομένων για τις ΗΠΑ, ενώ υποστηρίζει πολλές πλατφόρμες προσομοίωσης. Μειονέκτημά του είναι ότι δεν είναι αυτόνομο λογισμικό προσομοίωσης.

Το Cell2Fire χρησιμοποιεί κυτταρική αυτοματοποίηση για τη μοντελοποίηση της εξάπλωσης πυρκαγιάς. Εστιάζει σε ερευνητική χρήση. Πρόκειται για μια καινοτόμο μεθοδολογία με ερευνητική αξία. Δυστυχώς, έχει περιορισμένη χρήση σε επιχειρησιακές εφαρμογές.

Η προσομοίωση πυρκαγιών είναι κρίσιμη για τη διαχείριση δασικών πυρκαγιών, με κάθε σύστημα να προσφέρει διαφορετικά πλεονεκτήματα. Το Prometheus εξειδικεύεται στις καναδικές συνθήκες, ενώ το FARSITE είναι δημοφιλές διεθνώς για την ακρίβεια και την ευελιξία του. Το Phoenix Rapidfire, αν και ταχύτερο, εστιάζει κυρίως σε αυστραλιανές συνθήκες. Το BEHAVE είναι ιδανικό για μικρής κλίμακας αναλύσεις, ενώ το PYROCART και το Flamap ενσωματώνουν GIS και εκτιμήσεις ρίσκου αντίστοιχα. Το Geofogo προσφέρει υποστήριξη σε πραγματικό χρόνο, αλλά είναι ακόμα υπό ανάπτυξη, ενώ το LANDFIRE παρέχει δεδομένα τοπίου για τις ΗΠΑ. Τέλος, το Cell2fire είναι κατάλληλο για προσομοιώσεις μικροκλίμακας, αλλά όχι για ευρείες εφαρμογές. Η επιλογή του συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τις ανάγκες που υπάρχουν, την περιοχή εφαρμογής και τους διαθέσιμους πόρους. Σε κάθε περίπτωση, παρόλο που έχουν αναπτυχθεί αρκετά συστήματα, το καθένα εξυπηρετεί συγκεκριμένο σκοπό, με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η γενικευμένη χρήση του.

Συνοπτικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι το Phoenix Rapidfire είναι κατάλληλο για επιχειρησιακή χρήση και πραγματικό χρόνο, τα FlamMap και LANDFIRE. για στατική ανάλυση και στρατηγικό σχεδιασμό, τα FARSITE και Prometheus για γενική χρήση και επιστημονική ακρίβεια, το Cell2Fire για ερευνητική χρήση και τέλος τα PYROCART και Geofogo για GIS χαρτογράφηση.

Πίνακας 3: Σύγκριση συστημάτων προσομοίωσης πυρκαγιάς

Σύστημα	Κλίμακα	Χρήση	Περιβάλλον Προσομοίωσης	Ιδιαιτερότητες
Prometheus	Μεγάλη	Επιχειρησιακή	Καναδικό Δασικό Σύστημα	Εστιασμένο στις καναδικές συνθήκες πυρκαγιάς.
FARSITE	Μεγάλη	Στρατηγική	Δασικές και φυσικές περιοχές	Ενσωματώνει καύσιμα, καιρικά δεδομένα και τοπογραφία.
Phoenix RapidFire	Μεγάλη	Επιχειρησιακή	Αγροτικά και δασικά περιβάλλοντα	Πολύ ταχεία προσομοίωση σύνθετων καταστάσεων.
BEHAVE	Μικρή/Τοπική	Εκπαίδευση	Τοπικές περιοχές	Απλό και εύχρηστο για ταχεία αξιολόγηση.
PYROCART	Μεσαία	Έρευνα	Δασικές και αγροτικές περιοχές	Εστιάζει σε γεωγραφικές πληροφορίες.
FlamMap	Μεγάλη	Στρατηγική	Δασικές και φυσικές περιοχές	Χαρτογράφηση επικινδυνότητας βάσει στατικών δεδομένων.
Geofogo	Τοπική	Εκπαίδευση	Τοπικές και αστικές περιοχές	Δυναμική απεικόνιση φωτιάς σε μικρές κλίμακες.
LANDFIRE	Μεγάλη	Στρατηγική/Σχεδιασμός	Εθνικές και δασικές περιοχές (ΗΠΑ)	Παρέχει δεδομένα καυσίμων, βλάστησης και τοπογραφίας.
Cell2Fire	Μεσαία	Έρευνα/Μοντελοποίηση	Δασικές περιοχές	Βασίζεται σε μοντέλα κυψελοειδούς προσομοίωσης.

Στον παραπάνω πίνακα η Κλίμακα αναφέρεται στην έκταση που μπορεί να προσομοιωθεί (Τοπική, Μεσαία, Μεγάλη), η Χρήση περιγράφει το βασικό σκοπό του εργαλείου (π.χ., Στρατηγική, Επιχειρησιακή, Έρευνα), το Περιβάλλον Προσομοίωσης αναφέρεται στις περιοχές και συνθήκες στις οποίες το σύστημα αποδίδει καλύτερα, και τέλος οι Ιδιαιτερότητες αναδεικνύουν τις μοναδικές δυνατότητες ή περιορισμούς που μπορεί να έχει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Από τα παραπάνω μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε ότι όλα τα συστήματα που αναπτύχθηκαν είχαν σαν βάση κάποια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Αυτό οφείλεται σε δύο λόγους: είτε αναπτύχθηκαν, για να προσομοιώνουν πυρκαγιές σε συγκεκριμένη χώρα για τις ανάγκες της δασικής της υπηρεσίας, όπως το Prometheus στον Καναδά, το FARSITE στις ΗΠΑ και το Phoenix στην Αυστραλία, είτε τα μοντέλα στα οποία στηρίχθηκαν, ειδικά αν ήταν εμπειρικά, προέρχονται από πυρκαγιές ή πειραματικά δεδομένα από συγκεκριμένες περιοχές. Επομένως, η προσπάθεια για εφαρμογή τους σε οποιοδήποτε μέρος του κόσμου, δεν θα έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα, αν πρώτα δεν γίνει μια πλήρης καταγραφή της καύσιμης ύλης της περιοχής που θέλουμε να εξετάσουμε, και μια σωστή παραμετροποίηση των υπόλοιπων συνθηκών που χρειάζεται το σύστημα, για να λειτουργήσει.

Ένα ακόμα σημείο, που λειτουργεί ανασταλτικά στην υλοποίηση τέτοιου είδους συστημάτων, αποτελεί το γεγονός ότι δεν γνωρίζουμε ακόμα και σήμερα τον ακριβή μηχανισμό διάδοσης της πυρκαγιάς. Οι παράγοντες που χρησιμοποιούν τα εκάστοτε συστήματα σίγουρα παίζουν ρόλο, αλλά δεν γνωρίζουμε εάν υπάρχουν και άλλοι που μπορεί να επηρεάζουν την εξάπλωση της πυρκαγιάς. Παρ' όλα αυτά τα περισσότερα από αυτά αν παραμετροποιηθούν σωστά, δίνουν αποτελέσματα πολύ κοντά σε σχέση με την πραγματική εικόνα πυρκαγιών που έχουν εκδηλωθεί.

Επίσης, τα περισσότερα συστήματα κάνουν υποθέσεις, προκειμένου να απλοποιήσουν τους υπολογισμούς ή να διευκολύνουν την τυποποίηση του τρόπου διάδοσης της πυρκαγιάς. Έτσι, για παράδειγμα, θεωρούν ότι έχουμε γραμμική διάδοση της πυρκαγιάς και χρησιμοποιούν αλγορίθμους και αρχές που υποστηρίζουν αυτή την υπόθεση. Βέβαια, σε κάποια συστήματα υπάρχει η δυνατότητα να παραμετροποιηθεί ο τρόπος διάδοσης σε γραμμικό ή πυρκαγιά στέμματος. Παρ' όλα αυτά, καθότι ο ακριβής τρόπος διάδοσης της πυρκαγιάς δεν είναι γνωστός, η παραπάνω παραμετροποίηση απλά προσεγγίζει την πραγματικότητα, με την προσέγγιση αυτή σε αρκετές περιπτώσεις να είναι αρκετά ικανοποιητική σε σύγκριση με πραγματικές πυρκαγιές.

Συνοψίζοντας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι ένας μελλοντικός ερευνητικός στόχος που θα μπορούσε να εξεταστεί είναι η εύρεση του πραγματικού μηχανισμού διάδοσης της πυρκαγιάς. Εφόσον αυτό επιτευχθεί, η ανάπτυξη συστημάτων που θα προσομοιώνουν πυρκαγιές θα είναι αρκετά απλή, φτάνει βέβαια η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς να μπορεί να καλύψει επαρκώς τις ανάγκες για τους υπολογισμούς.

Επίσης, σημαντικό θα ήταν να γίνει μια προσπάθεια καταγραφής της καύσιμης ύλης, που αποτελεί παράμετρο για τα συστήματα προσομοίωσης πυρκαγιάς ανά την υφήλιο. Αυτή τη στιγμή η καταγραφή έχει γίνει μόνο για χώρες ή περιοχές, στις οποίες υπάρχει ενδιαφέρον από τις αντίστοιχες δασικές υπηρεσίες, στο πλαίσιο του στρατηγικού σχεδιασμού για την αντιμετώπιση εν εξελίξει πυρκαγιών. Η πλήρης καταγραφή θα μπορούσε να βοηθήσει, ώστε τα υπάρχοντα συστήματα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε άλλες περιοχές του κόσμου πέραν αυτών για τις οποίες έχουν αναπτυχθεί.

Τέλος, θα είχε νόημα η προσπάθεια δημιουργίας ενός συστήματος που θα λειτουργεί σε οποιοδήποτε σημείο του κόσμου και το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από τις δασικές υπηρεσίες όλων των χωρών για επιχειρησιακή και στρατηγική αντιμετώπιση εν εξελίξει μεγάλων δασικών πυρκαγιών. Στην προσπάθεια δημιουργίας ενός τέτοιου εργαλείου θα βοηθούσε σημαντικά, τόσο η αποσαφήνιση του μηχανισμού διάδοσης της πυρκαγιάς όσο και η πλήρης καταγραφή των τύπων καύσιμης ύλης σε όλο τον κόσμο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Albini, F. A., 1985. A model for fire spread in wildland fuels by-radiation. *Combustion Science and Technology*, 42(5-6), pp. 229-258.

Alexander, D., 2018. *Natural Disasters.* s.l.:Routledge.

American Geological Institute, 1987. *Glossary of geology*, Falls Church, Virginia: American Geological Institute.

Andrews, P. L., Bevins, C. D. & Seli, R. C., 2005. *BehavePlus fire modeling system, version 4.0: User's Guide*, s.l.: Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-106 Revised. Ogden, UT: Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Baranovskiy, N. V., Vyatkina, V. A. & Chernyshov, A. M., 2024. Numerical Simulation of Forest Fires and Possibilities to Estimate Aerosol Emission: Recent Advances. *Fire Safety Journal*.

Bowman, D. M. et al., 2009. Fire in the Earth System. *Science*, pp. 481-484.

Burgan, R. E. & Rothermel, R. C., 1984. *Behave: fire behavior prediction and fuel modeling system, fuel subsystem.* s.l.:US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

Burton, I. & Robert, K. W., 1964. The perception of natural hazards in resource management. *Natural Resources Journal*, Issue 3, pp. 412-441.

Chaudhary, M. T. & Piracha, A., 2021. Natural Disasters - Origins, Impacts, Management. *Encyclopedia*, 1(4), pp. 1101-1131.

Cheney, P. N., Gould, J. S. & Catchpole, W. R., 1998. Prediction of fire spread in grasslands. *International Journal of Wildland Fire*, 8(1), pp. 1-13.

Chong, D., Tolhurst, K. & Duff, T., 2013. *PHOENIX RapidFire 4.0 convection and ember dispersal model.* [online]
Available at:
http://www.bushfirecrc.com/sites/default/files/phoenix_4_convection_and_spotting.pdf
[Accessed 21 11 2024].

de Mestre, N. J., Catchpole, E. A., Anderson, D. H. & Rothermel, R. C., 1989. Uniform propagation of a planar fire front without wind. *Combustion Science and Technology*, 65(4-6), pp. 231-244.

De Vasconelos, M. J. et al., 2002. A working prototype of a dynamic geographical information system. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(1), pp. 69-91.

Dhall, A. et al., 2020. A survey on systematic approaches in managing forest fires. *Applied geography*.

Finney, A. M., 2006. *An Overview of FlamMap Fire Modeling.* Portland,OR, USDA Forest Service Proceedings RMRS.

Finney, M. A., 1998. *FARSITE, Fire Area Simulator-model development and evaluation.* s.l.:US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Finney, M. A., 2006. *An overview of FlamMap fire modeling capabilities.* Portland, OR, US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, pp. 213-220.

Furyayev, V. V., 1994. Monitoring the aftereffects of forest fires with remote sensing imagery. *Mapping Sciences and Remote Sensing*, 31(4), pp. 352-367.

Goldammer, J., Mitsopoulos, I., Mallinis, G. & Woolf, M., 2017. *Wildfire hazard and risk assessment*, Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

Grishin, A. M., 1997. *Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them.* Tomsk, Russia: Publishing house of the Tomsk state university.
Hirsch, K. G., 1996. *Canadian forest fire behavior prediction (FBP) system: user's guide.* s.l.:Canadian Forest Service, Northwest Region, Northern Forestry Center.
Jones, M. W. et al., 2020. Climate Change Increases the Risk of Wildfires. *ScienceBrief*.
Kanga, S., Sharma, L., Pandey, P. C. & Nathawat, M. S., 2014. GIS Modelling approach for forest fire risk assessment and management. *International Journal of Advancement in Remote Sensing, GIS and Geography*, 2(1), pp. 30-44.
Karafyllidis, I. & Thanailakis, A., 1997. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling*, 99(1), pp. 87-97.
Pais, C. et al., 2021. Cell2Fire: A cell-based forest fire growth model to support strategic landscape management planning. *Frontiers in Forests and Global Change*, p. 692706.
Papadopoulos, D. G. & Pavlidou, F.-N., 2011. A Comparative Review on Wildfire Simulators. *IEEE systems Journal*, 5(2), pp. 233-243.
Pastor, E., Zarate, L., Planas, E. & Arnaldos, J., 2003. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(2), pp. 139-153.
Perry, G. L., Sparrow, A. D. & Owens, I. F., 1999. A GIS-supported model for the simulation of the spatial structure of wildland fire, Cass Basin, New Zealand. *Journal of Applied Ecology*, 36(4), pp. 502-518.
Rothermel, C. R., 1972. *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels.* s.l.:Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture.
Ryan, K. C. & Opperman, T. S., 2013. LANDFIRE–A national vegetation/fuels data base for use in fuels treatment, restoration, and suppression planning. *Forest Ecology and Management*, pp. 208-216.
Sadowska, B., Grzegorz, Z. & Stepnicka, N., 2021. Forest Fires and Losses Caused by Fires - An Economic Approach. *WSEAS transactions on enviroment and development*.
Santoni, P. A. & Balbi, J. H., 1998. Modelling of two-dimensional flame spread across a sloping fuel bed. *Fire safety journal*, 31(3), pp. 201-225.
Shruti, K. & Kumar Singh, S., 2017. Forest Fire Simulation Modeling using Remote Sensing & GIS. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8(5).
Smith, K., 2013. *Environmental hazards: Assessing risk and reducing disaster.* 6th Edition s.l.:Routledge.
Sullivan, A. L., 2009. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models. *International Journal of Wildland Fire*, 18(4), pp. 349-368.
Tolhurst, K., Shields, B. & Chong, D., 2008. Phoenix: development and application of a bushfire risk management tool. *The Australian Journal of Emergency Management*, 23(4), pp. 47-54.
Turner, B. A., 1976. The development of disasters—a sequence model for the analysis of the origins of disasters. *The Sociological Review*, 24(4), pp. 753-774.
Tymstra, C. et al., 2010. *Development and structure of Prometheus: the Canadian wildland fire growth simulation model.* Edmonton, AB: Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Information Report NOR-X-417.
United Nations Disaster Relief Organization, 1982. *Natural disasters and vulnerability analysis,* Geneva: United Nations Disaster Relief Organization (UNDRO).

Van Wagner, E. C., 1967. *Calculations on forest fire spread by flame radiation.* s.l.:Queen's Printer.
Van Wagner, E. C. et al., 1992. *Development and structure of the Canadian forest fire behaviour prediction system*, Ottawa: Forestry Canada Fire Danger Group.
Weber, R. O., 1991. Modelling fire spread through fuel beds. *Progress in Energy and Combustion Science*, 17(1), pp. 67-82.
White, G. F., 2019. Directions in geography. at: *Natural hazards research.* s.l.:Routledge, pp. 193-216.
Yandouzi, M. et al., 2022. Review on forest fires detection and prediction using deep learning and drones. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, June, 100(12), pp. 4565-4576.