



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΑΣΙΚΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ/ ΜΕΓΑΠΥΡΚΑΓΙΕΣ

WILDFIRES/ MEGAFIRES

Διπλωματική Εργασία
Μελαχροινός Γεώργιος
Επιβλέπων
Καθηγητής Βασίλειος Μποντόζογλου

Βόλος, 2024

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Βασίλειο Μποντόζογλου για την ευκαιρία που μου έδωσε στην μελέτη ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος. Επίσης, είμαι ευγνώμων σε όλο το διδακτικό προσωπικό που κατά τη διάρκεια των σπουδών μου συνέβαλε στη διεύρυνση και στη εξέλιξη των ικανοτήτων μου. Έπειτα, ευχαριστώ όλους τους φίλους και γνωστούς μου που γνώρισα κατά τη διάρκεια των ακαδημαϊκών μου χρόνων. Με τη συντροφιά τους έδωσαν μια χαρούμενη πτυχή στον ακαδημαϊκό μου βίο και πολύτιμη στήριξη στις πιο δύσκολες στιγμές του. Τέλος, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου και στον αδερφό μου για την αμέτρητη κατανόηση τους και αγάπη τους σε αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Η διπλωματική εργασία έχει ως στόχο μία λεπτομερή κατανόηση του φαινομένου των δασικών πυρκαγιών. Η κατανόηση των δασικών πυρκαγιών είναι μείζονος σημασίας για την προστασία των ανθρώπων με τη διατήρηση της φύσης, της βιοποικιλότητας αλλά και τη διαχείριση προβλημάτων υγείας και οικονομικών ζημιών. Ο πρώτος βασικός τρόπος κατανόησης του φαινομένου είναι ότι χωρίζεται σε δύο βασικές πτυχές, την ανάφλεξη και τη διάδοση. Και οι δύο πτυχές έχουν ως αιτία τον άνθρωπο, τη βλάστηση, το κλίμα και τη τοπογραφία όμως η σημασία κάθε παράγοντα αλλάζει ανάλογα τη πτυχή που εφαρμόζεται. Παρατηρείτε ότι για την ανάφλεξη είναι πολύ πιο σημαντικός ο παράγοντας του ανθρώπου ενώ για τη διάδοση το αντίθετο. Ο δεύτερος βασικός τρόπος κατανόησης του φαινομένου είναι η προσπάθεια ποσοτικοποίησης του για μια αποτελεσματικότερη διαχείριση και πρόβλεψη του. Ερευνητές με τη χρήση εφαρμοσμένων επιστημών καταγράφουν και μοντελοποιούν τις πυρκαγιές. Για τη διάδοση τους, από τη χρήση γεωγραφικών χαρτών για μια πιο μακροσκελή εκτίμηση προς την εκτίμηση της περιμέτρου της πυρκαγιάς έως και τη αντίδραση τοπικής φωτιάς με το περιβάλλον της. Η συμμετοχή πολλών παραγόντων για τη περιγραφή του φαινομένου και οι πολυάριθμοι τρόποι μοντελοποίησης του, δείχνει τη πολυπλοκότητα του φαινομένου και τη προβολή του ως μια δοκιμασία για την επιστημονική κοινότητα.

Abstract

This thesis serves the purpose towards a better understanding of wildfires. Studying wildfires is important for ensuring human safety through protecting the environment, sustaining biodiversity as well as mitigating health hazards and economic damages. The first way of understanding wildfires is through two important ways. The first way is dividing the phenomenon into two sections, ignition and spread. Both sections are influenced by factors such as human, land cover, climate and topography but the importance of each factor varies depending on which section is analyzed. It is evident that human factors are much more important for wildfire ignition while they play an almost negligible role in wildfire spread. The second way is through quantification for predicting and efficiently managing wildfires. Through the use of applied sciences, researchers model wildfires. Regarding wildfire spread, modeling starts with the use of geographic maps for a more large scale estimation while the next step is perimeter spread estimation and lastly a more detailed interaction between fires and their local surroundings. The multi variability of the phenomenon and numerous ways that it can be modeled proves its complexity and a challenge to the scientific community.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη/Abstract.....	3
Κατάλογος εικόνων.....	5
Κίνητρο και υπόβαθρο	6
Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	9
Παράγοντες ανάφλεξης πυρκαγιάς.....	11
Ανθρωπογενείς	11
Εδαφοκάλυψη.....	14
Κλιματικοί	18
Τοπογραφικοί	22
Παράγοντες Ανάφλεξης και αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης.....	24
Παράγοντες διάδοσης πυρκαγιάς.....	29
Ανθρωπογενείς	29
Εδαφοκάλυψη.....	30
Κλιματικοί	36
Τοπογραφικοί	38
Μοντελοποίηση διάδοσης πυρκαγιάς.....	45
Μοντέλα διάδοσης περιμέτρου φωτιάς	47
Μοντέλα διάδοσης βασισμένα στην υπολογιστική ρευστομηχανική.....	57
Αρχή διατήρησης μάζας.....	59
Αρχή διατήρησης ορμής.....	67
Αρχή διατήρησης ενέργειας.....	68
Συλλογή των τριών βασικών εξισώσεων.....	72

Απλοποίηση και προσομοίωση.....	74
Συμπεράσματα.....	80
Βιβλιογραφία.....	89

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1.1.....	8
Εικόνα 2.1.....	20
Εικόνα 2.2.....	21
Εικόνα 2.3.....	21
Εικόνα 2.4.....	23
Εικόνα 2.5.....	25
Εικόνα 2.6.....	26
Εικόνα 2.7.....	27
Εικόνα 3.1.....	32
Εικόνα 3.2.....	33
Εικόνα 3.3.....	34
Εικόνα 3.4.....	35
Εικόνα 3.5.....	40
Εικόνα 3.6.....	41
Εικόνα 3.7.....	41
Εικόνα 3.8.....	42
Εικόνα 3.9.....	43
Εικόνα 4.1.....	46
Εικόνα 4.2.....	46

Εικόνα 4.3.....	47
Εικόνα 4.4.....	50
Εικόνα 4.5.....	50
Εικόνα 4.6.....	51
Εικόνα 4.7.....	54
Εικόνα 4.8.....	63
Εικόνα 4.9.....	77
Εικόνα 4.10.....	78

Κίνητρο και Υπόβαθρο

Οι πυρκαγιές είναι ένα ανεξέλεγκτο θερμικό φαινόμενο καύσης. Το μέγεθος τους αντικατοπτρίζεται από ένα αντίστοιχα γιγαντιαίο τρίγωνο καύσης. Τεράστιες ποσότητες καυσίμου, οξυγόνου και θερμότητας εξαντλούνται στο διάβη τους. Περισσότερο ακόμα στη περίπτωση των αγροδασικών πυρκαγιών(wildfires) οι οποίες συμβαίνουν στην ύπαιθρο σε αγροτικές ή/και δασικές περιοχές. Υπάρχουν πολλοί τρόποι διαφοροποίησης των αγροδασικών πυρκαγιών βάση της τοπογραφίας ή του καυσίμου ανάλωσής τους, Ωστόσο τα τρία κυριότερα είδη της είναι η επικόρυφος(crown),η επιφανειακή(surface) και η υπόγεια(subsurface) πυρκαγιά. Μια επικόρυφος πυρκαγιά καίει στις κορυφές των δέντρων και διαδίδεται ταχύτατα σε πυκνά δάση όπου ενώνονται κλαδιά διαφορετικών δέντρων και διαμορφώνουν μια αλυσιδωτή αντίδραση. Η επιφανειακή πυρκαγιά καίει επιφανειακή βλάστηση, φύλλα, κλαδιά και είναι μια σχετικά εύκολα διαχειρίσιμη φωτιά,εν αντιθέση μια υπόγεια φωτιά είναι δυσχερέστερη. Το καύσιμο είναι νεκρή βλάστηση υπό του εδάφους πραγματοποιώντας βραδεία καύση ικανή να διαρκέσει μήνες. Κατα την σύγκριση τους, οι επιφανειακές και υπόγειες διαδίδονται αργά ενώ οι επικόρυφες ταχέως ενώ παράλληλα καίνε διαφορετικά είδη καυσίμου και οι τρεις[1,2]. Ως προς τη διαχείριση τους η σειρά δυσκολίας είναι από τις επικόρυφες προς τις επιφανειακές (Πίνακας 1.1). Είναι πολύ σημαντικό ότι παρόλο τη διαφοροποίηση τους και οι τρεις είναι εξίσου επικίνδυνες και καταστροφικές για τη φύση, την κοινωνία και τον άνθρωπο.

Πίνακας 1.1: Απλή κατανομή των ειδών πυρκαγιών βάση καύσιμο, διάδοση, διαχείριση.

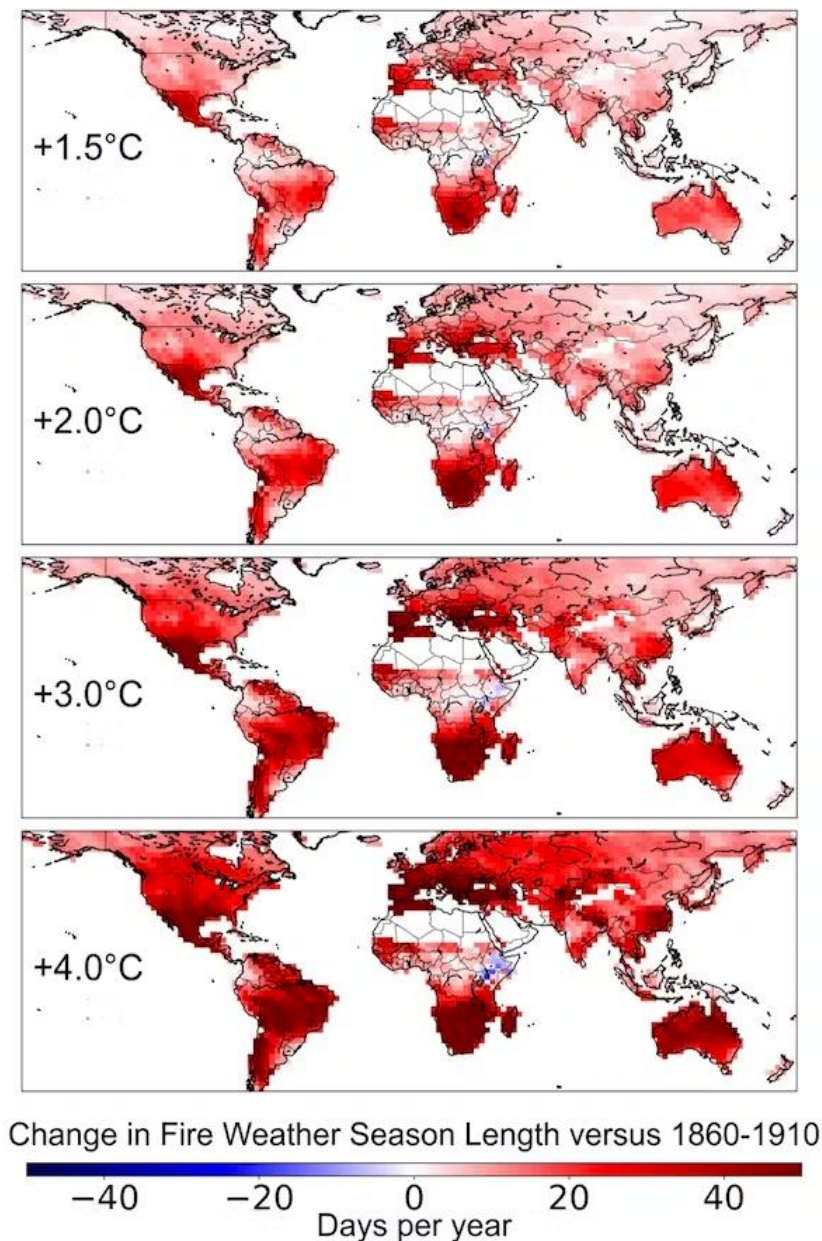
Είδος Πυρκαγιάς	Καύσιμο	Διάδοση	Διαχείριση
Επικόρυφος	Κορυφές δέντρων	Ταχεία	Πολύ δύσκολη
Επιφανειακή	Φύλλα, κλαδιά, επιφ. βλάστηση	Αργή	Εύκολη
Υπόγεια	Υπο-εδαφική νεκρή βλάστηση	Αργή	Δύσκολη

Η καταστροφή της φύσης από τις πυρκαγιές ξεκινά για τα ίδια τα δάση. Πυρκαγιές ισχυρής έντασης καίνε δέντρα, μειώνουν ζωτικό χώρο για σπάνια χλωρίδα και πανίδα ενώ διαβρώνουν το έδαφος. Μια ακόλουθη επίπτωση της διάβρωσης του εδάφους είναι η αλλαγή του στην υδάτινη απορροφητικότητα και σε συνδυασμό με ισχυρές βροχοπτώσεις σε καταστροφικές πλημμύρες[3]. Επιπλέον, η καύση απελευθερώνει γιγαντιαίες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα με ισχυρή επίπτωση στην ατμόσφαιρα και επιπλέον συμβολή στις επιπτώσεις λόγω εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα όπως αύξηση της θερμοκρασίας και οξινισμό των ωκεανών. Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή υπηρεσία παρακολούθησης ατμόσφαιρας Copernicus(Cams), το 2021 εξαπολύθηκαν 1,76 δισεκατομμύρια μετρικοί τόνοι άνθρακα στην ατμόσφαιρα από πυρκαγιές. Σε σύγκριση την ίδια χρονιά ο πλανήτης εξέπεμπε 10 δισεκατομμύρια μετρικούς τόνους άνθρακα από κατανάλωση ορυκτών καυσίμων[4].

Πέραν των άμεσων περιβαλλοντικών καταστροφών που επηρεάζουν την κοινωνία. Υπάρχει και μια επιβλαβής οικονομική επίδραση στις πυρόπληκτες περιοχές. Από την καταστροφή περιουσιών και καλλιεργήσιμης γης μέχρι υποδομών σε δημοτικό και περιφερειακό επίπεδο ενώ επιπλέον δυσχεραίνει τη τουριστική προσέλκυση για τη περιοχή και ένα σημαντικό μερίδιο του ΑΕΠ της χώρας. Αυτό οδηγεί σε επιβράδυνση της οικονομικής δραστηριότητας και περαιτέρω δυσχέρεια της πληγείσας περιοχής. Μια οικονομική μελέτη εκτίμησε ότι κάθε επιπλέον μέρα έκθεσης σε καπνό από πυρκαγιά τότε μειώνονται τα έσοδα της κοινωνίας για 0.04 τα εκατό μέχρι τα επόμενα δύο χρόνια[5]. Έπειτα οι πυρκαγιές έχουν άμεσα θύματα και έμμεσες επιβλαβές στους ανθρώπους λόγω εκπομπών και καπνού. Ο καπνός περιέχει αέρια και λεπτά σωματίδια τα οποία είναι επικίνδυνα και επιβλαβή για την υγεία. Τα λεπτά σωματίδια οδηγούν σε πνευμονικά και καρδιακά προβλήματα και ως αποτέλεσμα δευτερογενή θύματα από το φαινόμενο των πυρκαγιών[6,7].

Ως αποτέλεσμα ήταν πολύ σημαντικό για τον ανθρώπινο πολιτισμό η ικανότητα αντιμετώπισης και περιορισμού των πυρκαγιών. Οι πρώτες γραπτές αναφορές για την συνειδητή και συλλογική πυρόσβεση ξεκινούν στην αρχαία ρώμη ενώ παράλληλα στην αρχαία Αλεξάνδρεια, ο Ήρων βελτίωνε την πρώτη αντλία πυρόσβεσης. Ωστόσο, αυτές οι πρώτες προσπάθειες αφορούσαν μικρές αστικές φωτιές σε οικίες και συνοικίες μεγάλων αστικών κέντρων της αρχαιότητας και συνεχίστηκαν στο ίδιο πλαίσιο μέχρι τα τέλη του 19 αιώνα. Η ικανότητα οπτικοποίησης, εκτίμησης και περιορισμού μεγαπυρκαγιών είναι μια σύγχρονη ιδιότητα της ανθρωπότητας και ξεκίνησε στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής με αφορμή την μέγα πυρκαγιά του 1910[8]. Με τη ανάπτυξη της μηχανοποίησης, των ιπτάμενων μέσων και των αναδυόμενων οικολογικών επιστημών, η ανθρωπότητα ήταν πλέον ικανή να στραφεί από τη τοπική καταπολέμηση της πυρκαγιάς στην διαχείριση της. Δεδομένου ότι το φαινόμενο ελεγχόμενο και υπό χαμηλή ένταση είναι ευεργετικό για τη φύση.

Παρόλο την ανάπτυξη του κλάδου όπως παρατηρείτε, η ικανότητα μας να ελέγξουμε μεγαπυρκαγιές στο μέλλον ίσως προβεί ελλιπής. Ο λόγος είναι αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη οδηγεί ανάλογα σε αύξηση του φαινομένου των πυρκαγιών. Σύμφωνα με έκθεση του Ο.Η.Ε προβλέπεται αύξηση των πυρκαγιών κατά πενήντα τα εκατό μέχρι το 2100[9]. Μία πιθανή εξήγηση είναι ότι η αύξηση της θερμοκρασίας συμβάλει σε μεγαλύτερες περιόδους ξηρασίας για τη βλάστηση και δημιουργώντας ένα γόνιμο έδαφος για εστία νέας πυρκαγιάς[10]. Ιδιαίτερος ανησυχητική είναι ότι με στιγμιαία αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας, οι μέρες με καιρικές συνθήκες πυρκαγιάς αυξάνονται πολλαπλάσια (Εικόνα 1.1). Είναι συνεπώς εμφανές ότι στα επόμενα χρόνια η συχνότητα πυρκαγιών τείνει να αυξηθεί, οι πρόσθετες πυρκαγιές όχι μόνο απαιτούν περαιτέρω διαχείριση από τις πυροσβεστικές αρχές αλλά και συμβάλλουν ποσοστιαία για τη πιθανότητα ανάφλεξης καινούργιων. Με αυτό το τρόπο είναι απαραίτητη η άμεση εφαρμογή νέων πολιτικών από τις κυβερνήσεις για να αποφευχθεί η μελλοντική καταστροφή σε φύση, άνθρωπο και κοινωνία.



Εικόνα 1.1: Οι καιρικές συνθήκες πυρκαγιάς με την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη για χρονολογίες 1860-1910.

Από: <https://www.weforum.org/agenda/2022/07/climate-change-wildfire-risk-has-grown-nearly-everywhere-but-we-can-still-influence-where-and-how-fires-strike/>.

Η πολιτική προσέγγιση ενός επικίνδυνου φαινομένου είναι σωστό να βασίζεται στον ορθολογισμό και την έρευνα. Στο φαινόμενο μπορούν να συμβάλουν οι περισσότερες επιστήμες στη πρόβλεψη, κατανόηση και διαχείριση του. Παρόλο που στα χέρια ενός μηχανικού η έρευνα στοχεύει κυρίως στη κατανόηση του. Αρχικά από τη σκοπιά ανάφλεξης, στην επιστήμη της ίδιας της καύσης και αργότερα στους παράγοντες μετάδοσης. Όλα αυτά δένουν στα μαθηματικά μοντέλα που περιλαμβάνουν αρχές ρευστομηχανικής και έχουν σκοπό στη τελική και την καλύτερη προσομοίωση του φαινομένου. Παρόλο που η μοντελοποίηση είναι ένα ισχυρό εργαλείο των μηχανικών υπάρχουν πολλές νέες πτυχές που μπορεί να στραφεί

Ο Μηχανικός μπορεί να στραφεί αρχικά προς τη καλύτερη συλλογή δεδομένων για τη μελέτη και πρόληψη τους (remote sensing). Επιπλέον, η ανάπτυξη πυρίμαχων αναλώσιμων υλικών για μείωση της ταχύτητας διάδοσης όπως έδειξε το stanford με χρήση πυρίμαχης γέλης [11]. Βαθύτερη μελέτη προκαθορισμένων πυρκαγιών (prescribed fires), οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αποσυμφόρηση ξηρού καυσίμου μια περιοχής υπό ελεγχόμενα μέσα. Βελτιστοποίηση η καινοτομία σε πυροσβεστικό εξοπλισμό. Βελτιστοποίηση των μοντέλων συμπεριφοράς και διάδοσης. Ανάμιξη μηχανικής μάθησης στην αναγνώρισή τους Συμπερασματικά, συνδυασμός πληροφορίας, έρευνας και τεχνολογίας για μία ολιστική προσέγγιση του φαινομένου.

Η πολυπλοκότητα του φαινομένου σε συνδυασμό της όλο και αυξανόμενης έντασης του κρούει το κώδωνα κινδύνου στη παγκόσμια κοινότητα. Είναι θέμα υψίστης σημασίας η άμεση συνεργασία κρατών, οργανισμών και ερευνητικής κοινότητας για την ανάπτυξη μηχανισμών αντίδρασης, ενημέρωσης του κοινού και διεύρυνση της επιστήμης. Η έρευνα θα προσφέρει πλήρη κατανόηση του φαινομένου και χώρο για νέες τεχνολογίες ή συνδυασμό παλαιότερων, με βλέψεις για αποδοτικότερη διαχείριση του σε διαγνωστικό και επιχειρησιακό επίπεδο. Η προσπάθεια του ανθρώπου για μελλοντικό επίτευγμα είναι ο ικανοποιητικός έλεγχος του φαινομένου και η αλλαγή του ρόλου του από πυροσβέστης του πλανήτη σε κηπουρό του.

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η σειρά της βιβλιογραφικής ανασκόπησης βασίζεται στην οργάνωση της διπλωματικής εργασίας. Στην αρχή αναλύονται βασικές γνώσεις για τις πυρκαγιές και οι επιπτώσεις τους στην κοινωνία, περιβάλλον και άνθρωπο. Έπειτα, σειρά έχουν οι παράγοντες ανάφλεξης διότι για τη διάδοση μιας πυρκαγιάς προηγείται η ανάφλεξη. Το επόμενο μέρος της βιβλιογραφίας αφορά τους παράγοντες διάδοσης και τέλος ανάλυση και περιγραφή τρόπων μοντελοποίησης των πυρκαγιών.

Το πρώτο μέρος βιβλιογραφίας [1]-[11] ξεκινά με τον ορισμό διαφορετικών ειδών πυρκαγιών (επικόρυφος, επιφανειακή, υπόγεια) και των διαφορών τους. Έπειτα, περιλαμβάνεται κατά πόσο οι πυρκαγιές επηρεάζουν τα δάση καθώς και η σημασία της εκπομπής του διοξειδίου του άνθρακα από τις πυρκαγιές για το περιβάλλον. Οι επόμενες αναφορές είναι για την επέκταση των επιπτώσεων στην κοινωνία και στον άνθρωπο ως προς την ζημιά προς την οικονομία και τον κίνδυνο προς την υγεία των ανθρώπων μέσω αναπνευστικών και καρδιακών προβλημάτων. Ακολουθεί μια σύντομη ιστορική αναδρομή, προβλέψεις για σημαντική αύξηση της εμφάνισης των πυρκαγιών στον 21ο αιώνα και καινοτόμων λύσεων από την επιστημονική κοινότητα.

Το δεύτερο μέρος βιβλιογραφίας [12]-[33] επικεντρώνεται στους παράγοντες ανάφλεξης. Παρόλο που στην διπλωματική εργασία η οργάνωση του κεφαλαίου χωρίζεται σε τέσσερις παράγοντες (ανθρωπογενείς, εδαφοκάλυψη, κλιματικοί και τοπογραφικοί), στην βιβλιογραφία ένα άρθρο μπορεί να μελετάει έναν συνδυασμό αυτών. Συνεπώς, η βιβλιογραφία σε αυτό το μέρος της διπλωματικής απαρτίζεται από κύριους παράγοντες ανάφλεξης πυρκαγιών στην ευρώπη [12], σε περιοχές της καταλονίας [13], κεντρική ισπανία [14], άνω μεσοδυτικές Ηνωμένες Πολιτείες [15], μαλαισία [16], νότια των ΗΠΑ [17], ανατολική μεσόγειο [25,26]. Για τον ρόλο του ανθρώπου στην ανάφλεξη αναφέρονται [12-18] με κύριες μεταβλητές να είναι ο πληθυσμός, η πυκνότητα πληθυσμού, η απόσταση από αστικές περιοχές. Όσον αφορά τους παράγοντες εδαφοκάλυψης επικεντρώνεται η βιβλιογραφία [19-24] και αναφέρεται στην επίδραση του καυσίμου από μακροσκοπικό πλαίσιο (τοποθεσία, είδος καυσίμου) προς μικροσκοπικό πλαίσιο (υγρασία καυσίμου,

φαινομενική πυκνότητα). Για τους κλιματικούς παράγοντες η βιβλιογραφία είναι [25,26,27] και αναφέρεται στη ξηρασία, τις συνθήκες των ανέμων και του τοπικού κλίματος. Για τους τοπογραφικούς παράγοντες η βιβλιογραφία είναι [16,19,23,27,29,30] και αναφέρεται σε κλίση εδάφους, προσανατολισμό και υψομετρική διαφορά. Τέλος, οι αναφορές [31-33] είναι τρεις μελέτες που με τη χρήση μηχανικής μάθησης κατατάσσουν την σημαντικότητα των διαφόρων παραγόντων που περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο για συγκεκριμένες περιοχές, δύο στη πολιτεία της καλιφόρνια και μία στην νότια γαλλία.

Το τρίτο μέρος της βιβλιογραφίας [34]-[50] επικεντρώνεται στους παράγοντες διάδοσης των πυρκαγιών. Ακολουθείται η ίδια κατηγοριοποίηση με το κεφάλαιο της ανάφλεξης στους τέσσερις παράγοντες (ανθρωπογενείς, εδαφοκάλυψη, κλιματικοί και τοπογραφικοί), η διαφορά είναι ότι κύρια σημασία για την διάδοση πλέον έχει το περιβάλλον και όχι ο άνθρωπος. Για τους ανθρωπογενείς παράγοντες στη διάδοση των πυρκαγιών αναφέρεται η βιβλιογραφία [35]-[37] με τη συμβολή των οδών ως παράγοντας για τη μείωση της εξάπλωσης των πυρκαγιών. Έπειτα, η εδαφοκάλυψη [38]-[47] είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για την εξάπλωση των πυρκαγιών βάση της έκτασης, της πυκνότητας, της υγρασίας, του τύπου, της δομής και χημικής της σύνθεσης. Μετά η σημασία του κλίματος στη διάδοση αναφέρεται και στις προηγούμενες αναφορές [39,40,43,48] διότι η εδαφοκάλυψη, το κλίμα και η τοπογραφία συνδέονται με συγκεκριμένα μοτίβα και ακολούθως αναλύονται συνδυαστικά τις περισσότερες φορές. Σε αυτές αναφέρεται η σημασία του ανέμου στη διάδοση, η καθίζηση, η ατμοσφαιρική υγρασία αλλά και η ιστορική εξέλιξη του τοπικού κλίματος για μελλοντικό κίνδυνο πυρκαγιάς. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου η βιβλιογραφία [35,40,41,46,47,50] αφορά τοπογραφικούς παράγοντες με τη κλίση, τον προσανατολισμό ως κυρίες μεταβλητές.

Το τέταρτο και τελευταίο μέρος της βιβλιογραφίας [51]-[62] αφορά τη μοντελοποίηση των πυρκαγιών με τη βιβλιογραφία [51]-[60] και την αναφορά τρόπων μοντελοποίησης, μοντέλων και αντίστοιχων λογισμικών για την εφαρμογή τους, Παρακάτω, αναλύονται λεπτομερώς δύο ειδών μοντέλα, τα μοντέλα διάδοσης περιμέτρου φωτιάς και τα μοντέλα διάδοσης βασισμένα στην υπολογιστική ρευστομηχανική. Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο του rothermel [55] και το μοντέλο του Linn[60]-[62].

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Οι κύριοι τρόποι ανάφλεξης μια πυρκαγιάς είναι δύο, από άνθρωπο και απο φυσικό αίτιο. Από τους ανθρωπογενείς ο πιο συχνός είναι ο εμπρησμός ενώ από τη φύση οι κεραυνοί και αστραπές. Όσο πιο κοντά σε κατοικημένη περιοχή είναι η εστία ανάφλεξης της πυρκαγιάς τόσο πιο πιθανό είναι το αίτιο του εμπρησμού ενώ αντιθέτως όσο πιο δύσβατη και απόμακρη η περιοχή τότε το φαινόμενο της ανάφλεξης από αστραπή είναι όλο και πιο πιθανό. Επιπλέον, η ευφλεκτότητα μιας περιοχής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως πυκνότητα πληθυσμού, είδος εδαφοκάλυψης, ποσοστό υγρασίας, κλίμα και εποχή, ταχύτητα ανέμου, υψομετρική διαφορά κ.α. Μολονότι, οι παράγοντες αυτοί είναι αλληλένδετοι με τον ένα ή άλλο τρόπο έχει γίνει προσπάθεια στη επιστημονική βιβλιογραφία ώστε να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους. Ένας βασικός είναι να χωρίσουμε σε τεσσερις βασικές πτυχές: Ανθρωπογενείς, Εδαφοκάλυψης, Κλιματικοί και Τοπογραφικοί παράγοντες. Οι Ανθρωπογενείς περιλαμβάνουν παράγοντες που εμπλέκουν ανθρώπινη δραστηριότητα και συνδέονται με αυξημένη ανάφλεξη πυρκαγιών όπως πυκνότητα πληθυσμού, ανάπτυξη υποδομών όπως δρόμοι και σιδηρόδρομοι ενώ και κοινωνικο-οικονομικούς λόγους όπως η ανεργία. Οι Εδαφοκάλυψης περιλαμβάνουν το είδος βλάστησης που αναφλέγεται, τη συμβολή του ποσοστού υγρασίας του και ο κορεσμός της στο χώρο. Οι Κλιματικοί περιλαμβάνουν τη συμβολή των ανέμων, των εποχών και της ξηρασίας στην ανάφλεξη. Τέλος οι τοπογραφικοί περιλαμβάνουν την υψομετρική διαφορά, το προσανατολισμό και την έκθεση μιας περιοχής στην ηλιακή ακτινοβολία.

Ανθρωπογενείς

Ο λόγος της σημαντικότητας του ανθρώπινου παράγοντα για την ανάφλεξη πυρκαγιάς είναι διότι τείνει να είναι το συχνότερο αίτιο της. Όπως έχει παρατηρηθεί σε έρευνα για τους κύριους λόγους ανάφλεξης πυρκαγιών στην ευρώπη, στις μεσογειακές χώρες η ανθρωπογενής ανάφλεξη είναι ο κύριος παράγοντας πυρκαγιάς είτε από πρόθεση ή ατύχημα. Κατά τη περίοδο 2006-2010 για τις πυρκαγιές με γνωστό αίτιο ανάφλεξης 55,8 τα εκατό ήταν από εμπρησμό. Μία ενδιαφέρον παρατήρηση είναι ότι για την ίδια περίοδο οι πυρκαγιές με γνωστό αίτιο ανάφλεξης για τη βόρεια ευρώπη ήταν 13,9 τα εκατό, τονίζοντας την κοινωνικοοικονομική διαφορά μεταξύ βορρά και νότου στο φαινόμενο. Συνολικά, για όλη την ευρώπη οι φωτιές που προκλήθηκαν από ανθρώπινο παράγοντα(αμέλεια ή εμπρησμό) είναι 97,1 τα εκατό. Αυτή η παρατήρηση έχει οδηγήσει τους μελετητές να συμπεριλαμβάνουν στα μοντέλα διάγνωσης πυρκαγιάς τους μεταβλητές συνδεδεμένες με την ανθρώπινη δραστηριότητα όπως αποστάσεις από δρόμους και σιδηρόδρομους, γραμμές ηλεκτροδότησης αλλά και κοινωνικο-οικονομικούς λόγους όπως ανεργία, πληθυσμός, πυκνότητα πληθυσμού σε μια περιοχή[12].

Μεταβλητές όπως ο πληθυσμός, η πυκνότητα του και η απόσταση από αστικές περιοχές συνδέονται δυναμικά με το φαινόμενο και θα εξηγηθούν παρακατω. Όμως, ένα χαρακτηριστικό που είναι εξίσου σημαντικό είναι η αλλαγή του τρόπου χρήσης των δασικών χώρων από τους ανθρώπους με την αστικοποίηση και την εκβιομηχάνιση της ζωής του. Οι αλλαγές στα κοινωνικά πρότυπα και τον τρόπο ζωής κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα οδήγησαν στην εγκατάλειψη των παραδοσιακών χρήσεων δασικών εκτάσεων, με

αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη αύξηση βλάστησης και κατ' επέκταση καυσίμου για τις πυρκαγιές. Ταυτόχρονα, υπάρχει αύξηση του αριθμού των ατόμων που χρησιμοποιούν δασικές περιοχές για ψυχαγωγικές δραστηριότητες γεγονός που αυξάνει την πιθανότητα έναρξης πυρκαγιάς. Η αυξημένη συχνότητα πυρκαγιών αποτελεί τον μεγαλύτερο κίνδυνο για τα δασικά οικοσυστήματα. Ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία για τη μείωση της συχνότητας και της έντασης των πυρκαγιών είναι η πρόληψη. Τα προληπτικά μέτρα και οι προσπάθειες διόρθωσης των κινδύνων μπορούν να μειώσουν την πιθανότητα μικρών πυρκαγιών να εξελιχθούν σε μεγάλες δασικές πυρκαγιές, παρόλο που δεν μπορούν να προληφθούν όλες οι φωτιές. Ορισμένες ανθρώπινες συνήθειες και εδαφικά χαρακτηριστικά μπορούν να αντιμετωπιστούν με θεσμικούς κανόνες, αλλά η αλλαγή του καιρού και η διατήρηση της συνέχειας του δάσους είναι ανεξέλεγκτες. Επιπλέον, το μεσογειακό κλίμα είναι ευνοϊκό για την ανάπτυξη των πυρκαγιών και η μη διαχειριζόμενη δασική γη δίνει το άφθονο καύσιμο για τέτοιου είδους αναφλέξεις[13,14].

Η σχέση ωστόσο μεταξύ υποδομών μεταφοράς και ανάφλεξης πυρκαγιάς δεν είναι τόσο ξεκάθαρη. Από τη μια σε έρευνα για τις άνω μεσοδυτικές Ηνωμένες Πολιτείες, περιοχές με υψηλότερη πυκνότητα οδών, υψηλότερο πληθυσμό και μικρότερες αποστάσεις από μη δασικές περιοχές βρέθηκαν να έχουν αυξημένο κίνδυνο πυρκαγιάς. Αντιθέτως, περιοχές με υψηλή πυκνότητα λιμνών, κρατικές εκτάσεις και εθνικά δάση έδειξαν μειωμένη πιθανότητα εμφάνισης όλων των πυρκαγιών (υποδεικνύοντας λιγότερους μόνιμους κατοίκους και μικρότερη ανθρώπινη πρόσβαση). Τα ευρήματα δείχνουν ότι, σε γενικές γραμμές, η υψηλότερη πρόσβαση των ανθρώπων αύξησε την πιθανότητα εμφάνισης πυρκαγιάς, αλλά ότι αυτό το αποτέλεσμα ήταν περιορισμένο σε περιοχές με εξ αρχής σημαντική ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως με υψηλή σιδηροδρομική πυκνότητα και μικρές αποστάσεις προς την πόλη[15]. Από την άλλη η δυναμική των δασικών πυρκαγιών μπορεί και να επηρεάζεται σε θετικό βαθμό από τους δρόμους. Με το τρόπο που μειώνουν τον κίνδυνο πυρκαγιάς λειτουργώντας ως διαχωριστές της περιοχής(διαχωρίζοντας τη καύσιμη ύλη και περιορίζοντας την εξάπλωση) ή δίοδοι καταστολής(με την ταχύτερη άφιξη πυροσβεστικών μέσων)[16]. Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι υπάρχει σχέση μεταξύ της μείωσης της οδικής πυκνότητας και της αυξημένης πιθανότητας πυρκαγιάς σε περιοχές όπου οι πυρκαγιές δεν προκαλούνται κυρίως από ανθρώπινη δραστηριότητα [17].

Ενδεικτικά,ερευνητές στη κεντρική ισπανία συμπέραναν ότι τα πρότυπα ανάφλεξης σχετίζονται στενά με την προσβασιμότητα του τοπίου, ειδικά σε σχέση με τους αυτοκινητόδρομους και τους σιδηρόδρομους. Σημαντικές συσχετισμοί παρατηρούνται μέχρι 50 m, με ένα κρίσιμο κατώφλι στα 450m να χρησιμεύει ως ανώτατο όριο σε περιστατικά[14]. Άλλη μια συνεισφορά στις υποδομές μεταφοράς είναι η σιδηροδρομική, καθώς βάσει της ιστορικής συσχέτισης μεταξύ της πυρκαγιάς και των σιδηροδρομικών σπινθήρων, αναμένεται ότι το ύψος της δραστηριότητας των τρένων αλλά και η οδική δραστηριότητα επηρεάζουν την πιθανότητα και τη συχνότητα ανάφλεξης πυρκαγιάς. Δεδομένου του μεγάλου ποσοστού των πυρκαγιών που προκαλούνται από τον άνθρωπο στις άνω μεσοδυτικές ΗΠΑ, η πυκνότητα του σιδηροδρομικού και οδικού δικτύου έχει σημαντική επίδραση στην πιθανότητα αναφοράς πυρκαγιών, η οποία σχετίζεται με την ανθρώπινη δραστηριότητα. Δεδομένου ότι οι δρόμοι και τα τρένα είναι τα κύρια μέσα μεταφοράς εξοπλισμού στο σημείο, αναμένεται επίσης ότι η προσβασιμότητα του πυροσβεστικού υλικού έχει συσχετιστεί με την οδική και σιδηροδρομική δραστηριότητα[15].

Όσον αφορά την πυκνότητα του πληθυσμού σε μία περιοχή, επειδή οι άνθρωποι είναι η κύρια αιτία ανάφλεξης των πυρκαγιών, αυτή θεωρείται κρίσιμο στοιχείο. Αυτός ο παράγοντας καταγράφει την επιρροή του πληθυσμού σε διαφορετικές φάσεις του κύκλου

ζωής μιας πυρκαγιάς. Η πυκνότητα των ανθρώπων σε μια περιοχή επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο αξιοποιείται η ανάφλεξη και το οποίο καθορίζει τον κίνδυνο ανάφλεξης. Επηρεάζει επίσης την πιθανότητα να αναφερθεί πυρκαγιά και συνδέεται με έμμεσες μεταβλητές όπως η πυκνότητα των δρόμων όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Επιπλέον, η δυνατότητα καταστολής πυρκαγιάς και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται επηρεάζονται από την παρουσία ανθρώπων και περιουσιακών στοιχείων στην περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, Η απόσταση από την πλησιέστερη πόλη με πληθυσμό μεγαλύτερο από 10.000 θεωρείται παράγοντας που επηρεάζει την χρήση της περιοχής από ανθρώπους, την προσβασιμότητα και την πιθανότητα ανάφλεξης πυρκαγιάς όσο και τη συχνότητα της. Ενώ επιπλέον, η εγγύτητα σε μια μεγάλη πόλη αναμένεται εξίσου να επηρεάσει την αναφορά των πυρκαγιών και την ευκολία παράδοσης του εξοπλισμού καταστολής πυρός[15].

Σε έρευνα στην πολιτεία της Καλιφόρνια, ένα αξιοσημείωτο εύρημα είναι ότι στο μοντέλο πρόβλεψης τους καθώς η μείωση της πυκνότητας του πληθυσμού, ακόμη και στο μηδέν, δεν μειώνει τον κίνδυνο ανάφλεξης. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι πολλές πυρκαγιές συμβαίνουν σε απομακρυσμένες περιοχές με ελάχιστη ή καθόλου ανθρώπινη δραστηριότητα. Μια σημαντική αύξηση της πυκνότητας του πληθυσμού (π.χ. δέκα φορές) έχει μέτρια επίδραση. Τα ευρήματα αυτά υποδηλώνουν ότι λιγότερες πυρκαγιές μπορεί να συμβούν εάν οι άνθρωποι συγκεντρώνονται σε πολλές μικρές κοινωνίες παρά να είναι αποκομμένοι σε διάφορα μέρη. Αυτό μας υποδηλώνει επιπλέον ότι εξίσου σημαντική είναι η απόσταση από μεγάλες αστικές περιοχές

Συμπεραίνουμε ότι είναι μια συλλογική παρατήρηση, η ανθρώπινη δραστηριότητα είναι συχνά η αιτία των πυρκαγιών, οι οποίες τείνουν να συσσωρεύονται γεωγραφικά σε διαφορετικές περιοχές. Αυτή σχετίζεται άμεσα με την ύπαρξη αστικών περιοχών. Η έρευνα δείχνει επανειλημμένα ότι η πιθανότητα των πυρκαγιών που προκαλούνται από τον άνθρωπο μειώνεται με την αύξηση της απόστασης από τις αστικές περιοχές, δηλαδή όσο πιο μακριά μια περιοχή από αστική περιοχή τόσο μικρότερη η πιθανότητα ανάφλεξης. Ενώ επιπλέον παρατηρείται η διαφορά ότι υπάρχουν περισσότερες πυρκαγιές στις αγρο-αστικές διασυνδέσεις από ό, τι στις παραθαλάσσιες περιοχές[12]. Παράλληλα, η αστική με φύση διεπαφή (Wildland Urban Interface) έχει αυξηθεί λόγω της αστικοποίησης της υπαίθρου, η αύξηση αυτή συμβάλει στη μεγαλύτερη επαφή δασικών περιοχών σε αστικές και συμβαίνει λόγω της αύξησης του πληθυσμού. Ως αποτέλεσμα, η ισχυρότερη προγνωστική μεταβλητή είναι η απόσταση προς τις αστικές περιοχές[14].

Επιπρόσθετα, υπάρχει σύνδεση μεταξύ αγροτικής δραστηριότητας και πιθανότητα ανάφλεξης πυρκαγιάς. Σύμφωνα με μελέτη, υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ αριθμού προβάτων και κατσίκων και μειωμένη ανάφλεξη πυρκαγιάς. Ενώ με την μείωση της κτηνοτροφίας φαίνεται μια αύξηση της. Η αύξηση της ανάφλεξης πιθανότατα οφείλεται στη μετάβαση από τη συμβατική κτηνοτροφία σε ψυχαγωγικές δραστηριότητες, οι οποίες συνδέονται με την ευρύτερη ανθρώπινη δραστηριότητα[14].

Σε μελέτη για τις άνω μεσοδυτικές Ηνωμένες Πολιτείες συμπεράναν ότι μεγάλες πυρκαγιές ήταν πιο πιθανό να συμβούν σε μέρη που ήταν μακριά από τις πόλεις κοντά σε μη δασικές περιοχές, και είχαν χαμηλή παρουσία λιμνών κοντά τους. Τα κρατικά δάση είχαν χαμηλότερη πιθανότητα μεγάλων πυρκαγιών, ίσως λόγω φροντίδας από τις αντίστοιχες αρχές. Επιπλέον, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η πιθανότητα μεγάλων πυρκαγιών αυξήθηκε σε περιοχές με περισσότερες ανάφλεξεις (π.χ. κοντά σε μη δασικές περιοχές και με υψηλότερη πυκνότητα οδών ανα περιοχή), ειδικά εάν η ανάφλεξη ήταν αρκετά μακριά από υποδομές (πόλεις) για να επιτρέψει σημαντική αύξηση της φωτιάς πριν ξεκινήσουν σημαντικές προσπάθειες καταστολής. Τα ευρήματα αυτά υποδηλώνουν μια δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ της πιθανότητας ανάφλεξης πυρκαγιάς και δραστηριοτήτων καταστολής[15]. Με παρόμοια

σύνδεση όπως οι οδοί συμβάλουν και στην αντιμετώπιση των πυρκαγιών παρόλο της υψηλής συσχέτισης τους με πιθανότητες ανάφλεξης. Οι υψηλά ανεπτυγμένες αστικές περιοχές βελτιώνουν την κινητικότητα λόγω της εύκολης προσβασιμότητας τους και της υψηλής πυκνότητας του πληθυσμού. Αυτά τα στοιχεία επιτρέπουν την αυξημένη ανταπόκριση, η οποία βοηθά στην ταχεία αναγνώριση και καταστολή των πυρκαγιών. Παράλληλα εμφανίζεται ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της υψηλής συχνότητας πυρκαγιών κοντά σε κόμβους μεταφορών και αστικές περιοχές και της πυκνής χρήσης της περιοχής, ειδικά σε δασωμένες περιοχές.[13].

Ένα τελευταίο παράδειγμα για την επιρροή των ανθρώπινων υποδομών στην πιθανότητα ανάφλεξης είναι μέσου του ηλεκτρικού δικτύου. Οι ακραίες συνθήκες ανέμου, σε συνδυασμό με τις αποτυχίες των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφικές πυρκαγιές στην άγρια φύση. Σε περιπτώσεις, οι αποτυχίες της γραμμής ηλεκτροδότησης μπορούν να προκαλέσουν πολλαπλές αναφλέξεις σε μια ευρεία περιοχή, προάγοντας την εκρηκτική ανάπτυξη της φωτιάς. Παραδείγματα περιλαμβάνουν περιστατικά στην Καλιφόρνια το 2007 και σημαντικά επεισόδια στην Αυστραλία, όπως οι θανατηφόρες πυρκαγιές του Μαύρου Σαββάτου το 2009. Επιπλέον, οι πυρκαγιές, συνήθως χρειάζονται μια πηγή ανάφλεξης, και η ανθρώπινη δραστηριότητα είναι η μεγαλύτερη πηγή κινδύνου. Η ανάπτυξη των ηλεκτρικών δικτύων στα σύνορα μεταξύ αγροτικών και αστικών περιοχών αυξάνει τον κίνδυνο εμφάνισης πυρκαγιών. Ακόμη και αν οι πυρκαγιές που σχετίζονται με την ενέργεια αντιπροσωπεύουν μόνο το 1% όλων των πυρκαγιών, μπορούν να γίνουν μια σημαντική πηγή σε ορισμένα μετεωρολογικά σενάρια και να οδηγήσουν σε αξιοσημείωτες φωτιές[18].

Εδαφοκάλυψη

Όσον αφορά την εδαφοκάλυψη, ο παράγοντας αυτός μπορεί να εξεταστεί από μακροσκοπικό προς μικροσκοπικό πλαίσιο, εννοώντας ότι για αρχή έχει σημασία η γεωγραφική τοποθεσία της εκάστοτε περιοχής λαμβάνοντας υπόψη περιοχές όπως τις νότιες μεσογειακές χώρες, τα βαλκάνια και το καναδά, νότια αμερική και σε συνέχεια η σύσταση του υλικού σε ιδιότητες όπως περιεκτικότητα σε υγρασία του καυσίμου, φαινομενική πυκνότητα κ.α. Οι κυρίες κατηγοριοποιήσεις για την εδαφοκάλυψη είναι αν είναι δασική, καλλιεργήσιμη, χορτολιβαδική, θαμνώδης και κατά πόσο η έκταση είναι κατοικήσιμη στην επιφάνεια της είτε αγροτική είτε αστική. Σε γενικές γραμμές, οι γεωργικές και αστικές κατοικήσιμες περιοχές δείχνουν χαμηλότερη προδιάθεση για πυρκαγιά, ενώ οι θαμνώδεις και οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις δείχνουν μεγαλύτερη πιθανότητα για πυρκαγιά. Ενώ τα δάση είναι σε μια ενδιάμεση πιθανότητα ανάφλεξης[19]. Ανακαλύφθηκε ότι στις περιοχές της Μεσογείου, οι θάμνοι και τα κωνοφόρα δάση ήταν πιο πιθανόν σε ανάφλεξη, ενώ οι καλλιεργητικές εκτάσεις, τα βοσκοτόπια και τα πλατύφυλλα δάση επηρεάζεται λιγότερο από τις πυρκαγιές [20]. Στην Πορτογαλία, οι γεωργικές περιοχές επηρεάζονται λιγότερο από τις πυρκαγιές, αλλά οι θάμνοι και τα κωνοφόρα δάση είναι πιο πιθανά στην ανάφλεξη.. Λόγω των φυσικών τους χαρακτηριστικών, οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις και οι θάμνοι είναι εγγενώς πιο επιρρεπείς σε πυρκαγιές. Μετά από πυρκαγιά, οι θάμνοι ανανεώνονται γρήγορα, επιτρέποντας την ταχύτερη συσσώρευση καυσίμου από τα δάση, τα οποία χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να ανακάμψουν[19,20].

Στη μεσόγειο, η επιλεκτικότητα της πυρκαγιάς ευνοεί σταθερά τους θάμνους, τα χορτάρια και τις περιοχές με αραιή βλάστηση. Υπάρχουν δύο αξιοσημείωτες εξαιρέσεις: η Βουλγαρία και η εδαφοκάλυψη στην Τουρκία και Κύπρο, όπου τα κωνοφόρα δάση είναι πιο επιρρεπή σε πυρκαγιές. Ορισμένα αποτελέσματα θα μπορούσαν να εξηγηθούν από τους τύπους εδαφικής κάλυψης που είναι διαθέσιμα. Η αφθονία κωνοφόρων δέντρων στην Τουρκία-Κύπρο, ιδίως του πεύκου της Πάλλας, μπορεί να αποτελέσει παράγοντα για την εκτεταμένη ευφλεκτότητα της περιοχής. Από την άλλη πλευρά, ένας τύπος κάλυψης γης που είναι γεωγραφικά πιο αραιός από άλλους μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι λιγότερο επιρρεπής σε πυρκαγιά. Η πυρκαγιά μπορεί να ενθαρρυνθεί από δομικές και συνθετικές διαφορές στους τύπους κωνοφόρων δασών που βρίσκονται σε αυτές τις περιοχές, όπως τα πεύκα Palla στην Ανατολία, την Κύπρο και την Βαλκανική χερσόνησο, τα οποία έχουν μια πυκνότερη δομή. Αυτό είναι σε αντίθεση με το ανοιχτό κάλυμμα δέντρων που βρίσκεται στα πεύκα του Salzmann της Γαλλίας και της Ισπανίας. Τέλος, η Ανατολική Ευρώπη έχει λιγότερα δάση που κυριαρχούν από τα είδη *P. pinaster* και *P. pinna* spp. σε σχέση με τη Δυτική Ευρώπη [19].

Δεδομένου ότι δεν καταγράφηκαν πυρκαγιές σε δασικές περιοχές το 2010, η πλειονότητα των καμένων περιοχών στη Βουλγαρία το 2010 ήταν σε γεωργικές και άλλες φυσικές εκτάσεις (45% και 55%, αντίστοιχα), γεγονός που υποδηλώνει ότι η προτίμηση της χώρας για χορτολιβαδικές εκτάσεις πιθανότατα σχετίζεται με τη γεωγραφία της. Αντίθετα, παρατηρούνται στην Ιταλία ότι οι καμένες περιοχές βρίσκονται κυρίως σε δασικές περιοχές (40%) και αγροτικές περιοχές (41%). Η συγκριτικά υψηλή πιθανότητα ανάφλεξης για τα ευρυζωνικά δάση στην Πορτογαλία είναι ένα ενδιαφέρον παράδειγμα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι τα δάση ευκαλύπτου, ένα είδος που είναι επιρρεπές σε πυρκαγιά, είναι τόσο συνηθισμένα εκεί [19].

Στην Παταγονία, υπήρξαν περισσότερες πυρκαγιές σε θαμνώδεις περιοχές παρά σε δάση [21]. Στο καναδά σε σύγκριση με τα φυλλοβόλα δάση, τα ερυθρέλατα δάση ήταν πιο επιρρεπείς σε πυρκαγιές. Ένα μοτίβο που παρατηρήθηκε στην Ευρώπη το 2010: οι γεωργικές περιοχές αντιπροσώπευαν το 14,6% των κατεστραμμένων περιοχών, άλλες φυσικές εκτάσεις το 39,9% και τα δάση και άλλες δασωμένες περιοχές το 41,2% (EC 2011). Τα ευρήματά επιβεβαιώνουν ότι οι πυρκαγιές στην Ευρώπη έχουν επιλεκτική επίδραση σε διάφορους τύπους εδαφοκάλυψης.

Οι πόλεις, οι γεωργικές περιοχές, και οι μεταβατικές φυσικές-αγροτικές περιοχές είναι γενικά λιγότερο επιρρεπής ενώ οι θάμνοι και οι κακώς διαχειρισμένοι τόποι είναι πιο πιθανό να βιώσουν πυρκαγιές [19]. Παρατηρείται ότι η ανθρώπινη προσβασιμότητα έχει αντίκτυπο και στο παράγοντα της εδαφοκάλυψης, καθώς οι πυρκαγιές είναι πιο συχνές σε περιοχές που είναι προσβάσιμες από τους ανθρώπους, ειδικά σε χορτολιβαδικές και γεωργικές εκτάσεις. Οι γεωργικές δραστηριότητες επηρεάζουν τη συχνότητα των πυρκαγιών και σε γενικές γραμμές, οι πυρκαγιές εκδηλώνονται σε πιο δύσβατες περιοχές, αν και οι χορτολιβαδικές εκτάσεις είναι πιο εύαλωτες λόγω της αγροτικής τους χρήσης [19,20].

Αν και η επιλεκτικότητα των πυρκαγιών γενικά ευνοεί τις θαμνώδεις περιοχές και τις χορτολιβαδικές, τρεις περιοχές του κόσμου—μεσογειακή ευρώπη, τα Βαλκάνια και Τουρκία-Κύπρος—εμφανίζουν προτιμήσεις για συγκεκριμένους τύπους κάλυψης γης. Αυτές οι διακυμάνσεις προκαλούνται από διάφορα βιογεωγραφικά χαρακτηριστικά, καθεστώτα πυρκαγιάς, πρότυπα ανάφλεξης, τεχνικές διαχείρισης βλάστησης και μέτρα πυρόσβεσης. Με τον εντοπισμό των μοναδικών στοιχείων που προκαλούν αυτές τις διακυμάνσεις, οι τακτικές διαχείρισης πυρκαγιών μπορούν να προσαρμοστούν στις συνθήκες κάθε κράτους, ενδεχομένως μειώνοντας την πιθανότητα και την ένταση των αναφλέξεων μέσω των προσπαθειών διαχείρισής του τοπίου [19]. Η λιγότερη ευαίσθητη σε πυρκαγιά εδαφοκάλυψη μπορεί να λειτουργήσει ως φυσικός πυροσβέστης σε περιοχές υψηλής πιθανότητας εμφάνισης φωτιάς. Η ποικιλομορφία της κάλυψης γης έχει αναγνωριστεί ως δυνητικός

παράγοντας για τη μείωση του κινδύνου πυρκαγιάς, επηρεάζοντας την εξάπλωση και την ένταση της φωτιάς με τη δημιουργία διακοπτόμενων περιοχών (fuel breaks). Για παράδειγμα, η ανάμειξη κωνοφόρων δασών με δάση με μεικτά ή πλατιά φύλλα σε περιοχές που είναι επιρρεπείς σε πυρκαγιές, όπως η Τουρκία και Κύπρος, θα μπορούσε να μειώσει αποτελεσματικά την εξάπλωση των πυρκαγιών. Αυτή η προσέγγιση, όταν ενσωματωθεί σε ένα ολοκληρωμένο σχέδιο διαχείρισης πυρκαγιών μπορεί να συμπληρωθεί με άλλες δράσεις για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας[19].

Όσον αφορά την αγρό-αστική διεπαφή (WUI). Μια μελέτη ταξινομεί τους τύπους κάλυψης σε τρεις κατηγορίες εύφλεκτου χαρακτήρα: χαμηλού μέτριου και υψηλού. Όταν οι χάρτες τύπου καυσίμου επικαλύπτονται με ιστορικούς χάρτες καθεστώτος πυρκαγιάς, καθίσταται προφανές ότι το 80% των περιοχών με μικρές ανάφλεξης φωτιάς καλύπτεται από δάση υψηλού ή μέτριου εύφλεκτου χαρακτήρα. Ενώ τύποι όπως υγρά δάση σκληρού ξύλου, θάμνοι, υγρότοποι και γεωργικές περιοχές είναι λιγότερο εύφλεκτοι τύποι[22]. Η μελέτη καταλήγει ότι η χαμηλή πυκνότητα κατοικιών (λιγότερο από ένα σπίτι ανά δύο εκτάρια) αναμιγνύεται με σχεδόν όλες τις (88%) από τις περιοχές υψηλού κινδύνου πυρκαγιάς στην αγρία-αστική διεπαφή (WUI). Η πλειοψηφία των σπιτιών και των κατοίκων στο WUI υψηλού κινδύνου βρίσκονται σε αυτή την περιοχή χαμηλής πυκνότητας. Η επικράτηση των ενδιάμεσων περιοχών δείχνει ότι η επεξεργασία του καυσίμου κοντά σε κατοικίες είναι απαραίτητη για τη μείωση του κινδύνου ανάφλεξης ενός σπιτιού κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς. Λόγω των διασκορπισμένων κατοικιών και των ασαφών συνόρων μεταξύ τους και των καυσίμων της δασικής γης, οι περιοχές χαμηλής πυκνότητας παρουσιάζουν δυσκολίες για τον έλεγχο των πυρκαγιών. Επιπλέον, ενδέχεται να υπάρχουν λιγότεροι νόμοι και πόροι διαθέσιμοι για την καταστολή πυρκαγιών σε αυτές τις περιοχές, προκειμένου να αποτραπεί η έναρξη πυρών. Ως εκ τούτου, σε περιοχές με χαμηλή πυκνότητα, καθίσταται εξαιρετικά ζωτικής σημασίας να προωθηθούν τα χαρακτηριστικά κατασκευής σπιτιών και οι συνθήκες καυσίμου που περιορίζουν την ανάφλεξη των κατοικιών[22].

Σε μια επόμενη κλίμακα, για τη πιθανότητα ανάφλεξης έχει σημασία και το είδος της βλάστησης. Τα είδη που αποτελείται από ένα δάσος διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της συχνότητας των πυρκαγιών, ειδικά όταν υπάρχουν είδη κωνοφόρων με υψηλή περιεκτικότητα σε ρητίνες. Ο κίνδυνος πυρκαγιάς είναι χαμηλότερος σε δέντρα που είναι ώριμα, αραιά δάση από ό, τι σε πυκνά και πολυεπίπεδα δέντρα. Σύμφωνα με έρευνα για τη πιθανότητα πυρκαγιάς σε δάση στη καταλονία, η πιθανότητα πυρκαγιάς αυξάνεται κατά 5,8 φορές όταν τα δέντρα σκληρού ξύλου αντικαθίστανται από μαλακότερα[23]. Στην έρευνα, το μοντέλο κινδύνου πυρκαγιάς αξιολόγησε την πιθανότητα διακριτών δασών με διαφορετικά μεγέθη δομών και συνθέσεις ειδών σε υψόμετρο 700 μέτρων. Οι πιθανότητες για καθαρό κωνοφόρο και με δέντρα με δύο στρώματα στη κορυφή ήταν υψηλή. Όσον αφορά την διαχείριση των δασών για τη μείωση της πιθανότητας συμπεράναν ότι σημαντική αραιωση στη κορυφή του δέντρου μειώνει τον κίνδυνο πυρκαγιάς σε 0,160 και η αφαίρεση του κατώτερου στρώματος δέντρου το μείωσε από 0,192 σε 0,090[23].

Η τελευταία κλίμακα μελέτης για την εδαφοκάλυψη είναι στη διαφορετικότητα των ειδών ξύλου προς τη καύση. Ο λόγος στην εστίαση προς σε αυτο το καύσιμο(ξύλο) είναι γιατί στις δασικές πυρκαγιές είναι τα πιο συνηθισμένα καύσιμα. Έρευνα που μελέτησε μέσω πειραμάτων 34 διαφορετικά είδη συμπεράνε ότι τα είδη pinus είναι τα πιο εύφλεκτα από τα 34 είδη.

Κατα τα πειράματα, όταν προσανάμματα ρίχνονται κατά τη διάρκεια της φάσης καύσης χωρίς ροή αέρα, οι δάδες είναι πιο πιθανό να ανάψουν τα κρεβάτια καυσίμων(τρόπος που τοποθετήθηκαν τα διαφορετικά είδη καυσίμου) από ό, τι όταν ρίχνουν κατά τη φάση

ανάφλεξης με ροή αέρα. Η πιθανότητα ανάφλεξης του καυσίμου προβλέπεται από τα μοντέλα λογιστικής παλινδρόμησης της έρευνας, τα οποία παρουσιάζουν επίσης μια σύνδεση με το είδος ή τη μάζα των δαδών. Ενώ συγκριτικά, όταν πέφτουν σε έτοιμη φλόγα, ο φλοιός από *Pinus pinaster*, *Pinus halepensis*, και φύλλα *Eucalyptus globulus*, και κώνων κελύφη τους μπορεί να έχουν πιθανότητες ανάφλεξης που είναι τουλάχιστον διπλάσιες από εκείνες του φλοιού του πεύκου[24].

Σε σύγκριση με άλλα είδη καυσίμων, είδη που ανήκουν στο γένος *Pinus* και *Ulex europaeus* παρουσιάζουν χαμηλότερο χρόνο ανάφλεξης και υψηλότερη συχνότητα ανάφλεξης (89-100%), ποσοστά εξάπλωσης, καύσης και ύψους φλόγας. Τα είδη *Quercus* είναι λιγότερο εύφλεκτα από τα *Pinus* επειδή έχουν μεγαλύτερο χρόνο ανάφλεξης αλλά χαμηλότερες τιμές για άλλες μετρήσεις. Επιπλέον, Δείγματα από *Eucalyptus globulus* είχαν ένα υψηλό ύψος της φλόγας και συχνότητα της ανάφλεξης, αλλά απαιτούσαν ένα μεγάλο χρονικό διάστημα για να ανάψουν και πιο αργή εξάπλωση. Τα χόρτα, παρά τις υψηλότερες τιμές υγρασίας καυσίμων, παρουσιάζουν τον χαμηλότερο χρόνο ανάφλεξης και τα υψηλότερα ποσοστά εξάπλωσης, καύσης και φλόγας σε σύγκριση με τα άλλα δείγματα[24].

Παρατηρήθηκε ότι η μειωμένη ευφλεκτότητα και ο μεγαλύτερος χρόνος ανάφλεξης οφείλονται σε αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας και της περιεκτικότητας σε υγρασία του καυσίμου. Η περιεκτικότητα σε υγρασία και η φαινομενική πυκνότητα έχουν σημαντικό αντίκτυπο στο μέγιστο ύψος της φλόγας, το μέσο ύψος της φλόγας και το ποσοστό εξάπλωσης των προσαναμμάτων. Επιπρόσθετα, όταν μειώνεται η φαινομενική πυκνότητα και η περιεκτικότητα σε υγρασία του καυσίμου, οι παράμετροι αυτοί αυξάνονται (μέγιστο ύψος της φλόγας, το μέσο ύψος της φλόγας και το ποσοστό εξάπλωσης των προσαναμμάτων). Ωστόσο, στα πειράματα για το ποσοστό εξάπλωσης με τα δείγματα *Quercus faginea*, η επίδραση της φαινομενικής πυκνότητας δεν είναι σημαντική ενώ παράλληλα ούτε η φαινομενική πυκνότητα ούτε η περιεκτικότητα σε υγρασία του καυσίμου επηρεάζουν σημαντικά το χρόνο ανάφλεξης των δειγμάτων *Pinus pinaster*, του *Quercus faginea* και του *Q. pubescens*[24].

Σε γενικές γραμμές, ο χρόνος ανάφλεξης αυξάνεται, ενώ οι άλλες παράμετροι μειώνονται καθώς αυξάνονται η φαινομενική πυκνότητα και η περιεκτικότητα σε υγρασία των προσαναμμάτων. Τα προσανάμματα *Arbutus unedo* είναι το λιγότερο ανταποκρινόμενο καύσιμο σε αυτές τις αλλαγές, με τα χόρτα να είναι πιο ευαίσθητα σε διακυμάνσεις της περιεκτικότητας σε υγρασία καυσίμου από άλλους τύπους απορριμμάτων. Ιδιαίτερα για το *Pinus halepensis*, σημειώνονται υψηλές συχνότητες ανάφλεξης και καμία ροή αέρα. Εκτός από ορισμένες καταστάσεις, οι συχνότητες είναι συνήθως κάτω από το 50% όταν χρησιμοποιούνται προσανάμματα με ροή αέρα 0,8 m/s.

Υψηλότερες συχνότητες παράγονται συνήθως από επικλινή ροή αέρα παρά από οριζόντιες ροές αέρα. Οι δοκιμές στατιστικών επαληθεύουν ότι η κατεύθυνση της ροής του αέρα έχει σημαντικό αντίκτυπο στα αποτελέσματα. Οι υψηλότερες τιμές ροής αέρα προκαλούν αύξηση της συχνότητας ανάφλεξης, ιδιαίτερα όταν η ροή αέρα είναι επικλινή σε αντίθεση με την οριζόντια στα 0,8 m/s. Τα αποτελέσματα της δοκιμής Mann-Whitney επαληθεύουν ότι, σε σύγκριση με την οριζόντια ροή αέρα (61,25%), η επικλινή ροή του αέρα παρουσιάζει αισθητά υψηλότερες συχνότητες ανάφλεξης (87,5%)[24].

Η περιεκτικότητα σε υγρασία του καυσίμου (FMC), η ροή αέρα και το είδος του καυσίμου επηρεάζουν τα συμβάντα ανάφλεξης. Η βιωσιμότητα της καύσης για τα δέντρα ποικίλλει ανάλογα με την περιεκτικότητα σε υγρασία. καύση δεν τείνει να συμβεί με υγρασία πάνω από 70%, πλήρη καύση συμβαίνει κάτω από 30% και μερική καύση συμβαίνει μεταξύ 30% και 70%[24].

Εν κατακλείδι, η μελέτη εξέτασε την ευφλεκτότητα των καυσίμων, λαμβάνοντας υπόψη μεταβλητές όπως η συχνότητα ανάφλεξης, ο χρόνος ανάφλεξης, ο ρυθμός εξάπλωσης της φωτιάς, το ποσοστό καύσης των καυσασερίων, το ύψος της φλόγας και ο λόγος της κατανάλωσης καυσίμου. Σημαντικά συμπεράσματα συνίστανται στα εξής[24].

Τα χόρτα παρουσιάζουν υψηλότερη εύφλεκτη ικανότητα από τα προσανάμματα δέντρων και θάμνων, ακόμη και με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε υγρασία. Τα προσανάμματα *Pinus* και *Ulex europaeus* είναι πιο εύφλεκτα από τα προσανάμματα από σκληρό ξύλο, με τα αποθέματα *Eucalyptus globulus* να έχουν ενδιάμεσα χαρακτηριστικά. Η αυξημένη περιεκτικότητα σε υγρασία καυσίμου και η φαινομενική πυκνότητα όγκου οδηγούν σε μεγαλύτερο χρόνο ανάφλεξης και μειωμένες άλλες παραμέτρους. Η ικανότητα του προσανάμματος να ανάβει τα δείγματα καυσίμων σχετίζεται έντονα με τον τύπο τους (κλαδί, βελόνα, φύλλο) και την κατάσταση φωτεινή (glowing) ή καύσιμη (burning), με το *Pinus halepensis* να παρουσιάζει την υψηλότερη ικανότητα ανάφλεξης. Φωτεινές φωτιές (glowing) έχουν υψηλότερη πιθανότητα ανάφλεξης με αυξημένη ροή αέρα, υποδηλώνοντας μια επίδραση παροχής οξυγόνου. Οι κώνοι *P. halepensis* και το φλοιό *E. globulus* αναγνωρίζονται ως δυνητικά οι πιο επικίνδυνες αναφλέξεις υπό διάφορες συνθήκες. Τα φλεγόμενα προσανάμματα που πέφτουν χωρίς ροή αέρα μπορεί να έχουν υψηλή πιθανότητα να προκαλέσουν δευτερεύουσες πυρκαγιές, ειδικά κατά τη διάρκεια της διάδοσης της φωτιάς από κορυφή σε κορυφή[24].

Κλιματικοί

Προς τους κλιματικούς παράγοντες, οι πιο κύριοι είναι η ξηρασία και οι συνθήκες των ανέμων και τοπικού κλίματος. Έπειτα, σε δεύτερη σκοπιά στους κλιματικούς παράγοντες περιγράφεται η εποχικότητα του φαινομένου βάσει χρονικής διασποράς συμβάντων ανάφλεξης. Αρχικά, έρευνα συνδέει την ξηρασία και τα χαμηλά ύψη με την αύξηση της ανάφλεξης πυρκαγιών. Η έρευνα επισημαίνει τη συμβολή των εποχιακά ξηρών ατμοσφαιρικών μαζών στην εξάπλωση των πυρκαγιών. Τα επεισόδια ξηρασίας έχουν σημαντική επίδραση στη δραστηριότητα των πυρκαγιών στο ελληνικό περιβάλλον και οι συνθήκες καυσίμων επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τα πρότυπα βροχοπτώσεων καθώς η ξηρασία συνδέεται με την περιεκτικότητα σε υγρασία των καυσίμων[25]. Από Τα ελληνικά ιστορικά αρχεία πυρκαγιών και τα μετεωρολογικά δεδομένα από το 1894 έως το 2010. Τα αποτελέσματά τους αποδεικνύουν μια σημαντική αντίστροφη σχέση μεταξύ της συνολικής έκτασης που καίγεται και των βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια της εποχής των πυρκαγιών. Επιπλέον, υπάρχει μια θετική σύνδεση με τις βροχοπτώσεις των προηγούμενων δύο ετών, υπογραμμίζοντας τη μακροπρόθεσμη επίδραση των βροχών στη ρύθμιση της υγρασίας και της εξέλιξης των καυσίμων[26]. Συνδυαστικά με τη τοπογραφία, η οροσειρά Πίνδου, η οποία φτάνει σε μέγιστο υψόμετρο 2.637 μέτρα, έχει σημαντικό αντίκτυπο στο κλίμα της Ελλάδας. Οι περιοχές δυτικά του εύρους είναι συνήθως υγρότερες από εκείνες ανατολικά λόγω της επίδρασης σκιών βροχής. Το ελληνικό κλίμα διαμορφώνεται από ένα συνδυασμό τοπικών στοιχείων, όπως θαλάσσιες και χερσαίες αύρες και εποχιακά πρότυπα, όπως οι ετεσιανοί, καθώς και από πολύπλοκο έδαφος, εγγύτητα στη θάλασσα και ποικίλα υψόμετρα. Αυτά τα χαρακτηριστικά διαδραματίζουν επίσης ρόλο στο σχηματισμό πυρκαγιών[25]. Οι ετεσιανοί, *meltemia*, ή *meltem*, είναι οι ισχυροί, ξηροί βόρειοι άνεμοι του Αιγαίου, οι οποίοι φυσούν από τα μέσα Μαΐου έως τα μέσα Σεπτεμβρίου. Οι ετεσιανοί είναι μια κυρίαρχη επιρροή του καιρού στη περιοχή του Αιγαίου. Αυτοί εντείνονται από τα συστήματα ατμοσφαιρικής

πίεσης, τα οποία είναι ένα χαρακτηριστικό που συνδέεται με σημαντικές πυρκαγιές στην Ελλάδα[25].

Η ανάλυση δείχνει ότι ορισμένες κυκλοφορίες ανέμων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (Συνοπτικά μοτίβα κυκλοφορίας, τα οποία ορίζονται ως ανωμαλίες στην πίεση της στάθμης της θάλασσας (SLP), το γεωδυναμικό ύψος 500 hPa (Z500) και η ταχύτητα του ανέμου 250 hPa ("V250") και αναφέρονται ως μεγάλης κλίμακας μετεωρολογικά πρότυπα (LSMPs)) ευθύνονται για τα περισσότερα περιστατικά πυρκαγιών στην Ελλάδα. Ο συνδυασμός των συστημάτων υψηλής πίεσης αέρα στα βόρεια και βορειοδυτικά της Ελλάδας και των χαμηλότερων πιέσεων στην ανατολική περιοχή της Μεσογείου είναι αυτό που δημιουργεί συνθήκες επιρρεπής σε πυρκαγιές. Πάνω από το Αιγαίο, οι ετεσιανοί άνεμοι έχουν στενή σχέση με αυτό το μοτίβο της πίεσης του αέρα[25].

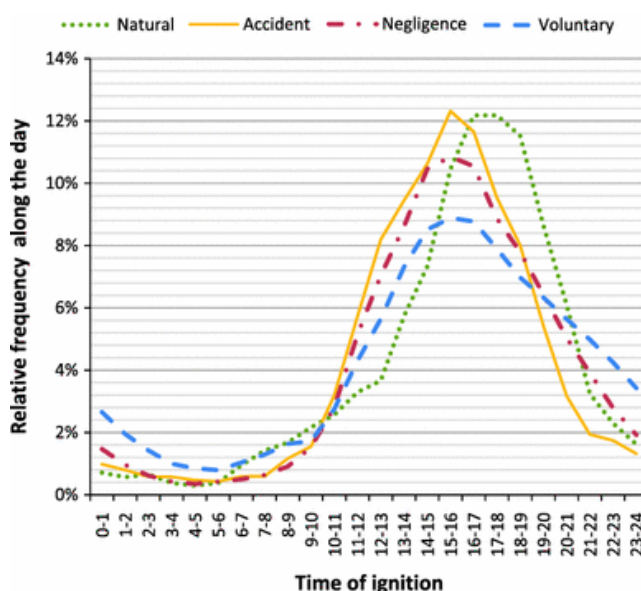
Τα αποτελέσματα είναι σύμφωνα με παγκόσμιες έρευνες, που δείχνουν ότι αν και η μεγάλης κλίμακας κυκλοφορία της ατμόσφαιρας έχει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της πιθανότητας πυρκαγιών, οι διαφορές στα μετωπικά συστήματα, τα καθεστώτα πίεσης και η συχνότητα της επιφανειακής μάζας του αέρα μπορούν είτε να αυξήσουν είτε να μειώσουν την πιθανότητα φωτιάς. Επιπλέον, τονίζεται ότι τα μεσοκλίμακα και τα τοπικά συστήματα είναι σημαντικά για την ανάπτυξη των πυρκαγιών, επειδή αλληλεπιδρούν με τα μοτίβα κυκλοφορίας μακροσκοπικής κλίμακας και τα επιδεινώνουν[25]. Αν και τα συστήματα πίεσης επιπέδου της θάλασσας είναι συνήθως προσωρινά, η συνεχής έξαρση βαρομετρικών πιέσεων στα 500 hPa μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση πυρκαγιών. Αυτοί, οι ημι-στατικοί όγκοι ζεστού αέρα που παραμένουν στάσιμες για μεγάλες χρονικές περιόδους έχουν διαπιστωθεί ότι είναι σημαντικές σε διάφορα μέρη, όπως το Ισραήλ, ο Καναδάς και η Ισπανία. Σύμφωνα με την έρευνα για τις ανωμαλίες γεωδυναμικού ύψους 500 hPa, οι πιο επιρρεπείς για πυρκαγιά καταστάσεις στην Ελλάδα συνδέονται με ανώμαλα χαμηλά ύψη, το οποίο είναι σύμφωνο με τα ευρήματα από άλλες περιοχές όπως στη Πενσυλβάνια[25].

Όσον αφορά την εποχικότητα των αναφλέξεων, Η εμφάνιση πυρκαγιάς διέπεται από φυσικούς κύκλους που εκτείνονται από καθημερινά έως ετήσια πρότυπα και συνδέονται με περιβαλλοντικούς παράγοντες και φαινολογία βλάστησης. Οι ανθρωπογενείς πυρκαγιές είναι πιο ομοιόμορφα διαδεδομένες όλο το χρόνο, ενώ οι αναφλέξεις που προκαλούνται από κεραυνούς συγκεντρώνονται μέσα σε λίγες ημέρες[27,28]. Στη Γαλλία, οι πυρκαγιές εκδηλώνονται κατά κύριο λόγο όλο το καλοκαίρι, συνήθως αργά το απόγευμα ή το βράδυ, ενώ οι γεωργικές ή δασικές φωτιές εμφανίζονται πιο συχνά κατά τη διάρκεια της ημέρας το φθινόπωρο και το χειμώνα. Παρόμοιες τάσεις παρατηρούνται στη Γερμανία, τη Βουλγαρία και τη Σλοβακία, όπου υπάρχουν δύο υψηλές τάσεις για πυρκαγιές το καλοκαίρι (συνήθως τον Αύγουστο) και την άνοιξη (Μάρτιος-Απρίλιος), οι οποίες και οι δύο σχετίζονται κυρίως με τους αγρότες που καίνε για αγροτικούς σκοπούς[27].

Οι πυρκαγιές που προκαλούνται από τους ανθρώπους στην περιοχή Γκρίσον της Ελβετίας κορυφώνονται το Μάρτιο και τον Απρίλιο, συνήθως τα Σαββατοκύριακα λόγω αμέλειας. Μια δεύτερη αύξηση σημειώνεται το απόγευμα από τις 2 έως τις 4 μ.μ., αντιπροσωπεύοντας περίπου το 83% όλων των πυρκαγιών, οι οποίες συμβαίνουν μεταξύ των 10 και των 6 π.μ. . Υψηλότερα ποσοστά ανθρωπογενών και φυσικών πυρκαγιών παρατηρούνται μόνο στην Ελλάδα το καλοκαίρι, από τον Ιούλιο έως τον Σεπτέμβριο, μεταξύ μεσημέρι και δύο το απόγευμα[27].

Μελέτες που διεξήχθησαν στη Φινλανδία και την Ελβετία δείχνουν ότι οι πυρκαγιές που σχετίζονται με την αστραπή συμβαίνουν από το Μάιο έως τον Οκτώβριο, με αιχμή τον Ιούλιο-Αύγουστο. Ενώ, μέχρι και το 52% αυτών των πυρκαγιών στην Ελβετία συμβαίνουν μεταξύ 4 και 8 μ.μ. Το 91% όλων των πυρκαγιών που συμβαίνουν τον Ιούλιο και τον Αύγουστο προκαλούνται από αστραπή. Αυτό είναι σύμφωνο με ευρήματα όπου διαπιστώθηκε ότι η θερινή ώρα αντιπροσωπεύει το 92% των πυρκαγιών που προκαλούνται από κεραυνούς στην Ισπανία[27,28].

Η Ευρωπαϊκή Βάση Δεδομένων για τις Πυρκαγιές των Δασών (EFD) δείχνει ότι, στα ευρωπαϊκά μεσογειακά έθνη, το ποσοστό των αιτιών πυρκαγιάς από το μεσημέρι μέχρι τα μεσάνυχτα είναι περίπου ίσο μεταξύ των περιστατικών που προκαλούνται από αμέλεια/ατυχήματα και εκούσιες φωτιές (φωτιές που δεν είναι από αμέλεια και μπορεί να οδηγήσουν σε πυρκαγιά αλλά δεν αναφέρεται και ως εμπρησμός). Κατά τη διάρκεια της υπόλοιπης ημέρας, και ειδικά τη νύχτα, υπάρχουν πολύ περισσότερες εκούσιες φωτιές. Γύρω στις 3 το απόγευμα είναι όταν η συχνότητα των πυρκαγιών για ανθρωπογενείς αιτίες κορυφώνεται, με μια πιο έντονη αύξηση για τα γεγονότα που προκύπτουν από ατυχήματα και αμέλεια. Η κορυφή είναι λίγο αργότερα από το συνηθισμένο, στις 5 μ.μ., λόγω φυσικών λόγων. (Εικόνα 2.1)[27].

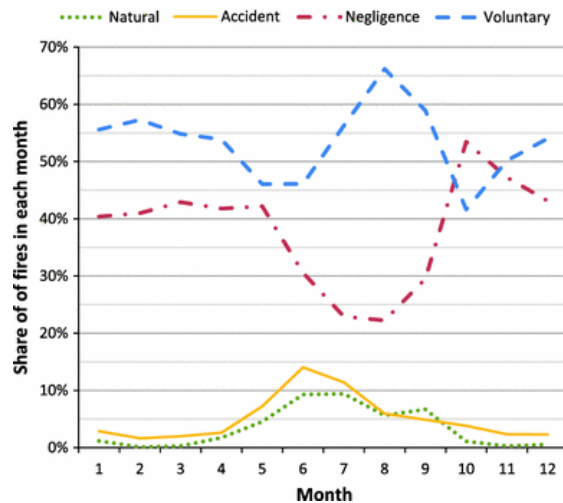


Εικόνα 2.1 Η χρονική διασπορά μέσα σε μια μέρα για τη συχνότητα ανάφλεξης πυρκαγιάς.

Από: Ganteaume, A.; Camia, A.; Jappiot, M.; San-Miguel-Ayanz, J.; Long-Fournel, M.; Lampin, C. *A Review of the Main Driving Factors of Forest Fire Ignition Over Europe*. *Environ. Manag.* 2013, 51, 651–662.

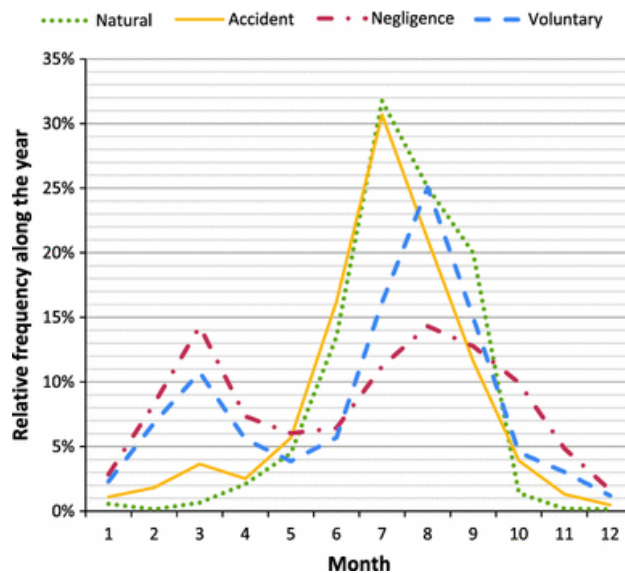
<https://doi.org/10.1007/s00267-012-9961-z>

Από την άποψη της ετήσιας κατανομής συχνότητας, οι από πρόθεση φωτιές το καλοκαίρι είναι σημαντικά πιο συχνές από τις εξ' αμελείας, που αντιστοιχούν κατά προσέγγιση στη συχνότητα των φωτιών που σχετίζονται με την αμέλεια τους στους άλλους μήνες. Οι φυσικές πυρκαγιές αντιπροσωπεύουν περίπου το 10% όλων των περιστατικών τον Ιούνιο και τον Ιούλιο (Εικόνα 2.2). Ενώ οι σκόπιμες και απρόσεκτες πυρκαγιές έχουν την υψηλότερη συχνότητα τον Αύγουστο, με δευτερεύουσα αιχμή τον Μάρτιο, οι φυσικές και τυχαίες φωτιές κορυφώνονται τον Ιούλιο (Εικόνα 2.3).[27].



Εικόνα 2.2: Ποσοστά αιτίας ανάφλεξης ανα μήνα στις μεσογειακές χώρες.

Από: Ganteaume, A.; Camia, A.; Jappiot, M.; San-Miguel-Ayanz, J.; Long-Fournel, M.; Lampin, C. *A Review of the Main Driving Factors of Forest Fire Ignition Over Europe*. *Environ. Manag.* 2013, 51, 651–662.
<https://doi.org/10.1007/s00267-012-9961-z>



Εικόνα 2.3: Χρονική διασπορά συχνότητας ανάφλεξης πυρκαγιών στις μεσογειακές χώρες σε σχέση με τις συνολικές για κάθε αίτιο,

Από: Ganteaume, A.; Camia, A.; Jappiot, M.; San-Miguel-Ayanz, J.; Long-Fournel, M.; Lampin, C. *A Review of the Main Driving Factors of Forest Fire Ignition Over Europe*. *Environ. Manag.* 2013, 51, 651–662.
<https://doi.org/10.1007/s00267-012-9961-z>

Τοπογραφικοί

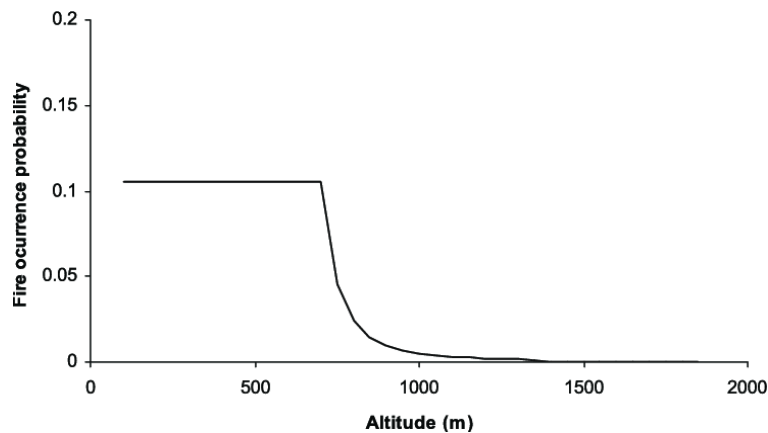
Οι τελευταίοι παράγοντες που μας ενδιαφέρουν είναι οι τοπογραφικοί καθώς και μία αναφορά στην χωρική κατανομή εμφάνιση αναφλέξεων στις χώρες της ευρώπης. Οι κύριοι τοπογραφικοί παράγοντες είναι η κλίση εδάφους, ο προσανατολισμός του και η υψομετρική διαφορά από το επίπεδο της θάλασσας.

Τοπογραφικά, βρέθηκε ότι οι περιοχές με πλαγιές μεγαλύτερες από 25% ήταν ουσιαστικά λιγότερο πιθανό να βιώσουν πυρκαγιές από ό, τι τα μέρη με χαμηλότερες κλίσεις. Η συσχέτιση αυτή ήταν ανεξάρτητη από το είδος της εδαφοκάλυψης γης σε αυτή την κατηγορία. Οι πυρκαγιές που προκλήθηκαν από τον άνθρωπο ήταν πιο συχνές σε ήπιες πλαγιές σε ορεινές περιοχές. Ανακαλύφθηκε επίσης ότι οι βόρειες πτυχές ήταν λιγότερο ευνοημένες από άλλες κατευθύνσεις. Αυτό είναι σύμφωνο με τη θεωρία ότι οι βόρειες πλαγιές λαμβάνουν λιγότερη άμεση και εκτεταμένη ηλιακή έκθεση από τις νότιες τους, που αυξάνει την περιεκτικότητα σε υγρασία της εδαφοκάλυψης και μειώνει την ευφλεκτότητα του. Είναι δυνατόν για διαφορετικές χώρες και περιοχές να έχουν ξεχωριστές σχέσεις μεταξύ των τοπογραφικών χαρακτηριστικών και των περιοχών που έχουν καεί. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητες εκτεταμένες αναλύσεις σε διάφορες χωρικές κλίμακες για να προσαρμοστούν κατάλληλα οι τακτικές πρόληψης και ελέγχου πυρκαγιών[19].

Η τοπογραφία επηρεάζει το ποσό ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνει μία περιοχή και μπορεί να μεταβάλλει την ταχύτητα καθώς και την διεύθυνση ανέμου. Το υψόμετρο, η κλίση και η όψη του εδάφους έχουν όλες σημαντικές επιπτώσεις στην ηλιακή ακτινοβολία, την κατεύθυνση του ανέμου και την ταχύτητα, όλα τα οποία επηρεάζουν τις συνθήκες ανάφλεξης. Ο προσανατολισμός είναι ο βασικός παράγοντας που δείχνει πόσο εκτεθειμένη η πλαγιά είναι στον ήλιο[16]. Οι νότιες εκθέσεις επηρεάζονται περισσότερο από τον ήλιο και τον άνεμο. Λόγω των αυξημένων ευαίσθητων σημείων εκκίνησης καύσης, οι περιοχές με νότιες πλευρές αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 40% όλων των δασικών πυρκαγιών[29]. Πάνω από εξήντα τοις εκατό των δασικών πυρκαγιών συμβαίνουν στις νότιες και νοτιοδυτικές πτυχές, σε πλαγιές που κυμαίνονται από μηδέν έως είκοσι βαθμούς. Καθώς η κλίση αυξάνεται, υπάρχει μια αξιοσημείωτη μείωση στη συχνότητα των δασικών πυρκαγιών [30].

Όσον αφορά το υψόμετρο, περισσότερο από το 90% των δασικών πυρκαγιών συμβαίνουν σε υψόμετρο 100 μέτρων πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, κυρίως σε χαμηλότερες περιοχές, αποδεικνύοντας τον κρίσιμο αντίκτυπο που παίζει η υψομέτρηση σε αυτά τα γεγονότα. Τα υψηλότερα υψόμετρα βλέπουν λιγότερο σοβαρές πυρκαγιές λόγω των περισσότερων βροχοπτώσεων. Είναι ζωτικής σημασίας να ληφθούν υπόψη οι μεταβολές του υψομέτρου πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας σε σχέση με τη γύρω τοπογραφία. Οι αυξήσεις των βροχοπτώσεων σε υψηλότερα υψόμετρα θεωρείται ότι είναι ο λόγος πίσω από λιγότερο καταστροφική συμπεριφορά των πυρκαγιών σε αυτά τα υψόμετρα. Οι ανατολικές πλευρές στεγνώνουν γρηγορότερα λόγω της αυξημένης έκθεσης στην υπεριώδη ακτινοβολία καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, και οι απότομες κλίσεις διευκολύνουν την εξάπλωση των πυρκαγιών μέσω της αποτελεσματικής προθέρμανσης και ανάφλεξης [16,29].

Το ύψος είναι σημαντικό καθώς οι πυρκαγιές είναι λιγότερο συχνές και μικρότερες από 700 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (Εικόνα 2.4). Αυτή η σχέση απεικονίζεται στην εικόνα 2.4, η οποία δείχνει επίσης πώς η πυρκαγιά μειώνεται απότομα με το υψόμετρο. Η εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration) και το υψόμετρο έχουν μια ουσιαστική συσχέτιση, η οποία προσθέτει στη σημασία της μεταβλητής.



Εικόνα 2.4. Κατανομή της πιθανότητας ανάφλεξης φωτιάς σε σχέση με την υψομετρική διαφορά από το επίπεδο της θάλασσας.

Από: Gonzalez, J.R.; Palahi, M.; Trasobares, A.; Pukkala, T. *A fire probability model for forest stands in Catalonia (north-east Spain)*. *Ann. Forest Sci.* 2006, 63, 169–176.

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις, υπάρχει σχεδόν πενταπλάσια αύξηση στην πιθανότητα πυρκαγιάς για κάθε 100 μέτρα απώλειας υψομέτρου, από 800 μέτρα σε 700 μέτρα. Αυτή η ίδια πτώση από 1400 μέτρα σε 1300 μέτρα, ωστόσο, οδηγεί μόνο σε αύξηση 1,35 φορές. Από την άλλη πλευρά, η πιθανότητα πυρκαγιάς δεν επηρεάζεται από μια αλλαγή ύψους 100 μέτρων από οποιοδήποτε ύψος μικρότερο ή ίσο με 700 μέτρα[23].

Για την χωρική κατανομή τους στην ευρώπη περισσότερο από το ήμισυ όλων των πυρκαγιών προκαλούνται από κεραυνούς, οι οποίοι τείνουν να συγκεντρώνονται σε ορεινές περιοχές σε αντίθεση με τις ανθρωπογενείς φωτιές, οι οποίες είναι διασκορπισμένες ανεξάρτητα τοπογραφικής εξάρτησης. Στη Φινλανδία, ο αριθμός των πυρκαγιών που προκαλούνται από κεραυνούς μειώνεται δραματικά καθώς κάποιος κινείται προς τα βόρεια, από 0,1 σε 0,01 πυρκαγιές/100 km²/έτος στο νότο. Η επίδραση των άκρων (edge effect) και ο κατακερματισμός (landscape fragmentation) του τοπίου έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην μείωση ευαισθησίας της περιοχής σε πυρκαγιά. Η χωρική κατανομή των πυρκαγιών επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Μελέτες της Πορτογαλίας δείχνουν ότι οι περιοχές κατά μήκος του ατλαντικού ωκεανού και των ανατολικών συνόρων είναι λιγότερο πιθανό για πυρκαγιές. Στην Ισπανία, οι σκόπιμες πυρκαγιές συγκεντρώνονται σε πόλεις με υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα, αλλά οι πυρκαγιές που προκαλούνται από κεραυνό αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το ήμισυ όλων των περιστατικών. Στην Ισπανία, ο αριθμός των πυρκαγιών που προκαλούνται από κεραυνό ποικίλλει ανάλογα με την περιοχή και κυμαίνεται από 0,01 έως 0,32 ανά 100 km² ετησίως[27].

Στην περιοχή Grison της Ελβετίας, οι πυρκαγιές που προκαλούνται από τον άνθρωπο τείνουν να συγκεντρώνονται σε κατοικημένα υψόμετρα, ενώ οι πυρκαγιές που προκαλούνται από αστραπή συμβαίνουν κυρίως σε ορεινές περιοχές. Η κατανομή πυρκαγιάς που προκαλείται από κεραυνούς εξηγείται από τις ιδιότητες του καυσίμου, συμπεριλαμβανομένης της περιεκτικότητας σε υγρασία και της δομής [27].

Στις βόρειες περιοχές της Ευρώπης, η χωρική κατανομή των φυσικών καθεστώτων πυρκαγιάς διαμορφώνεται σημαντικά από τις κλιματικές συνθήκες. Στη Φινλανδία, ο αριθμός των πυρκαγιών που προκαλούνται από κεραυνό μειώνεται δραματικά από το Νότο προς το Βορρά, από 0,1 σε 0,01 φωτιές ανά 100 km² ετησίως. Αυτή η κλιμάκωση εξηγείται από τις διαφορές στη συχνότητα αστραπής και την υγρασία καυσίμου που προκαλείται από το κλίμα.

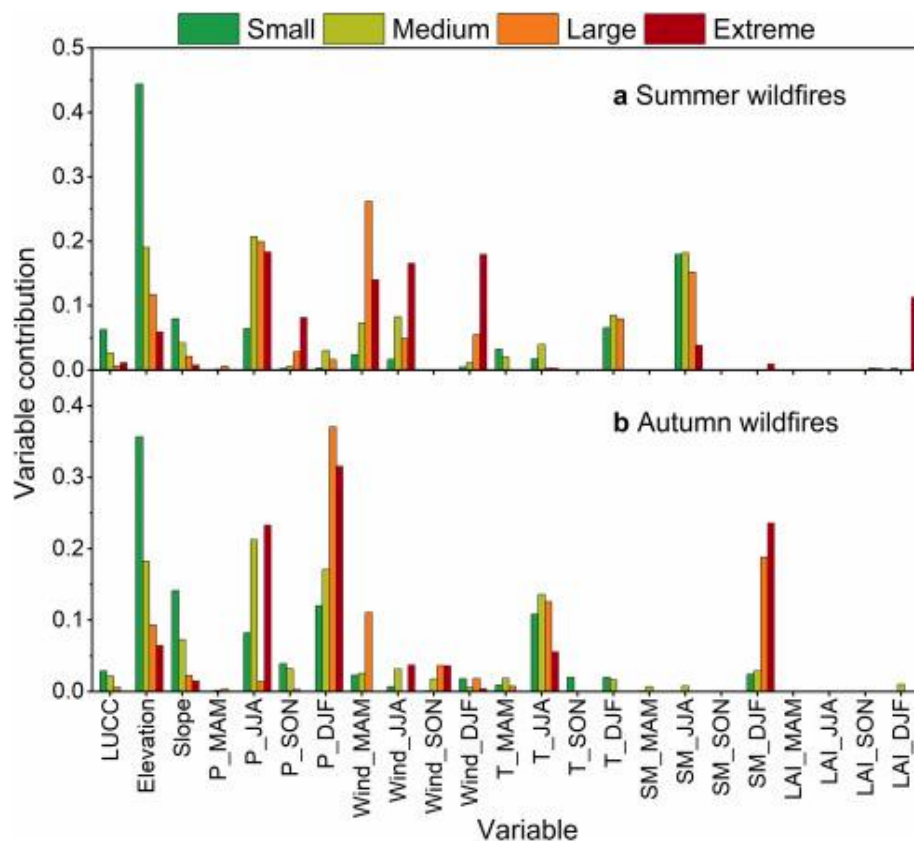
Στα ίδια γεωγραφικά πλάτη, παρόμοια πρότυπα παρατηρούνται στη Σουηδία. Επιπλέον, η ποικιλία στο τοπίο συνδέεται με την αυξημένη πυκνότητα πυρκαγιών που προκαλούνται από τον άνθρωπο, ιδιαίτερα κοντά στη διασύνδεση μεταξύ αγροτικών και αγροφυσικών περιοχών.

Παράγοντες Ανάφλεξης και αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης

Εφόσον το θέμα της ανάφλεξης η συμβάν πυρκαγιάς είναι πολυδιάστατο και οι παράγοντες αλληλένδετοι η πιο σύγχρονη προσέγγιση για την πρόβλεψη σημαντικότητας παράγοντα για μια περιοχή είναι μέσω της μηχανικής μάθησης. Σε αυτή τη μέθοδο, οι ερευνητές παράγουν ένα μοντέλο βάση κάποιου αλγορίθμου μηχανικής μάθησης και επεξεργάζονται ιστορικά δεδομένα ή χαρτογραφικά δεδομένα μέσω δορυφόρων και συμπεραίνουν μια συσχέτιση στη σημαντικότητα των παραγόντων.

Ένα παράδειγμα η έρευνα για τη πολιτεία της καλιφόρνια[31]. Η μελέτη διερεύνησε και ταξινόμησε τα γεγονότα πυρκαγιών στην Καλιφόρνια με βάση τις περιοχές που κάηκαν κατά τη διάρκεια του 1981-2019, κατηγοριοποιώντας τα σε μικρές, μεσαίες, μεγάλες και τεράστιες πυρκαγιές σε διαφορετικές εποχές. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Shapley τιμή και Random Forest (RF) μοντελοποίηση, η έρευνα εντοπίστηκε και χαρτογράφησε τους οδηγούς ελέγχου για την εμφάνιση και την έκταση των πυρκαγιών, ενσωματώνοντας 23 μεταβλητές προβλέψεων όπως το κλίμα και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας της γης.

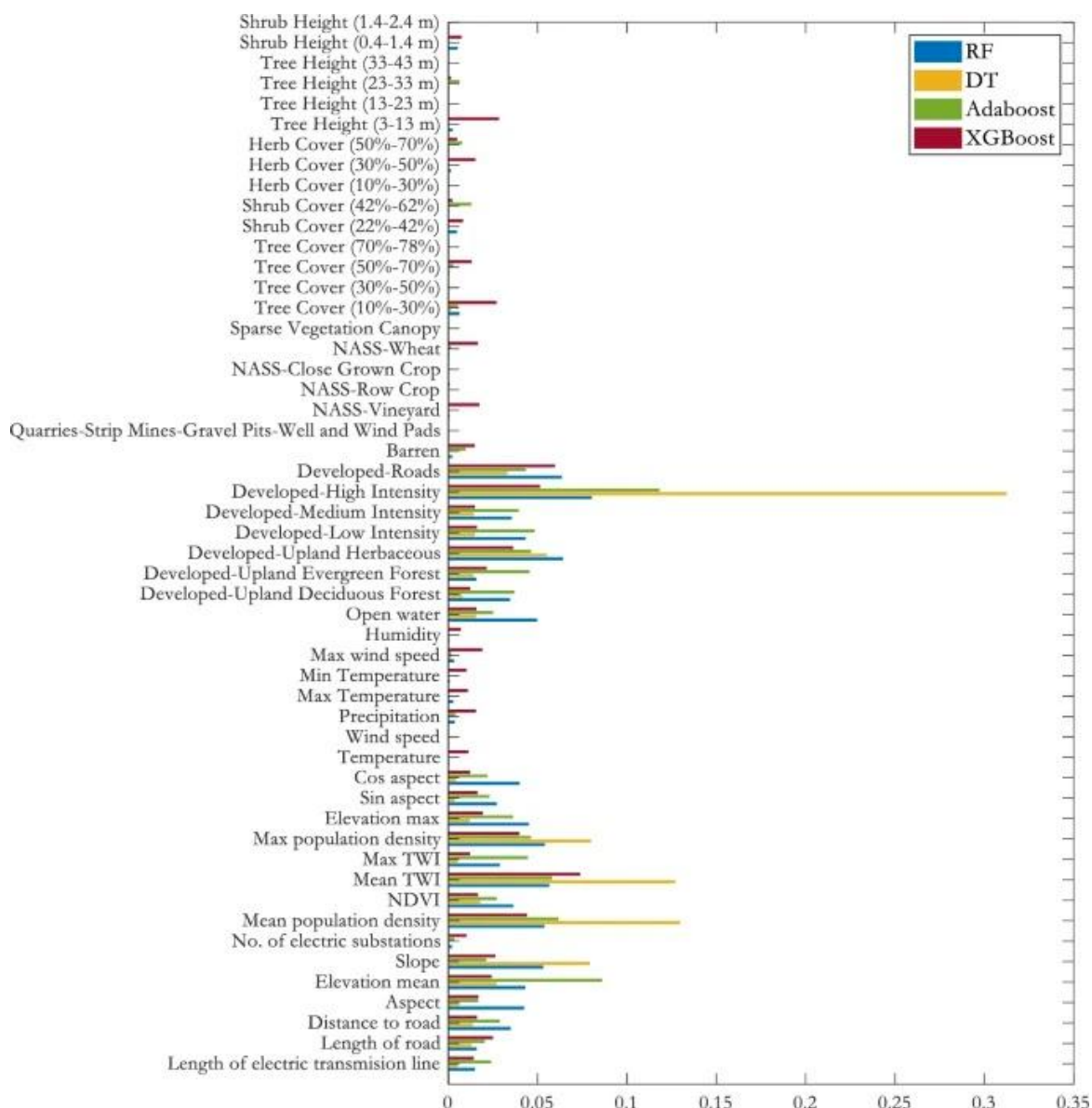
Τα βασικά ευρήματα περιλαμβάνουν την επίδραση των προηγούμενων ή της ίδιας εποχής βροχοπτώσεις, την υγρασία του εδάφους, και τους ανέμους σε μεγάλες και ακραίες πυρκαγιές σε όλες τις εποχές. Το υψόμετρο επηρεάζει κυρίως τις μικρές και μεσαίες πυρκαγιές κατά τη διάρκεια των περισσότερων εποχών. Η μελέτη επισήμανε ετερογενή χωρικά πρότυπα των πυρκαγιών στην Καλιφόρνια, όπως ο έλεγχος του ανέμου στη Βόρεια Ακτή και τη Σιέρα Νεβάδα, τον έλεγχο των βροχοπτώσεων στην κεντρική ακτή, και τον έλεγχο της υγρασίας του εδάφους στη Νότια ακτή κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Από ποσοτική άποψη, η μελέτη διαπίστωσε ότι ένα σημαντικό μέρος των περιοχών που καίγονται για μεγάλες και τεράστιες πυρκαγιές το καλοκαίρι αποδίδεται στις καλοκαιρινές βροχοπτώσεις και την υγρασία του εδάφους, ενώ η χειμερινή βροχόπτωση και η υγρασία του εδάφους συμβάλλουν ουσιαστικά σε μεγάλες και τεράστιες φωτιές το φθινόπωρο. Επιπλέον, η έρευνα τόνισε την ετερογένεια των παραγόντων για μεμονωμένα περιστατικά πυρκαγιών, παρέχοντας πληροφορίες για την πρόληψη και τη διαχείριση των πυρκαγιών(Εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5. Εικόνα αναπαράστασης συνεισφοράς μεταβλητών στην ανάφλεξη πυρκαγιών στην πολιτεία της καλιφόρνια σε καλοκαίρι και φθινόπωρο. Οι μεταβλητές P_MAM,JJA,SON,DSF είναι παράγοντες κατακρήμνισης(precipitation). Οι μεταβλητές Wind_ είναι παράγοντες ανέμων. Οι μεταβλητές T_ αφορούν θερμοκρασία και αντίστοιχα SM (soil moisture) υγρασία εδάφους ενώ LAI(leaf area index) επιφάνεια φύλλου. Τέλος, η LUCC είναι μεταβλητή για την εδαφοκάλυψη.

Από: Qiu, Linghua, et al. "High-Resolution Mapping of Wildfire Drivers in California Based on Machine Learning." *Science of the Total Environment*, vol. 833, Aug. 2022, p. 155155, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155155>. Accessed 23 Mar. 2023.

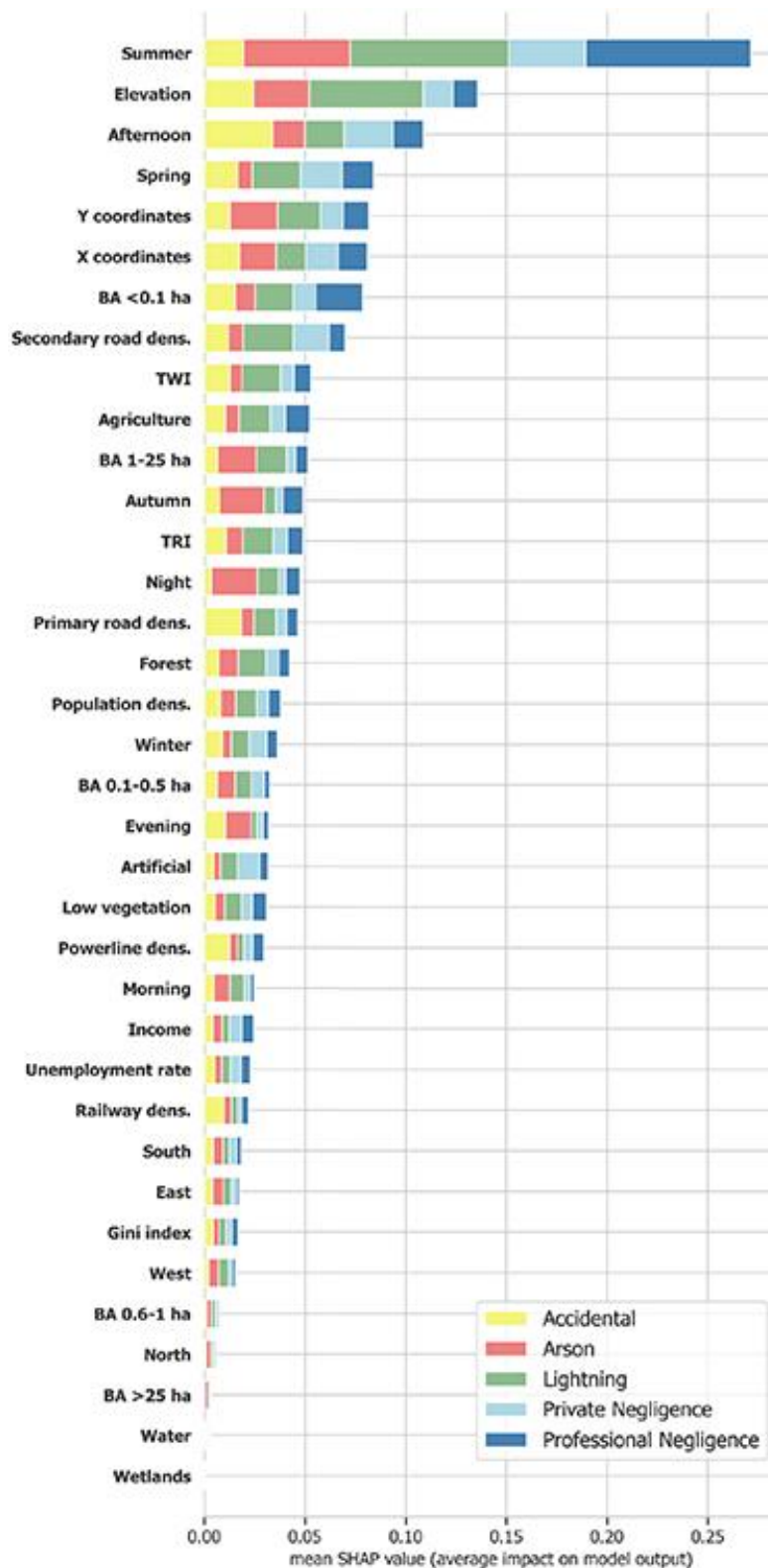
Μια δεύτερη έρευνα για τη πολιτεία της καλιφόρνια εισάγει ένα μοντέλο μηχανικής μάθησης για την πρόβλεψη των πυρκαγιών χρησιμοποιώντας 76 προγνωστικούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των τοπογραφικών, εδαφοκάλυψης, ανθρωπογενών και κλιματικών παραγόντων. Η μελέτη καλύπτει χωρική ανάλυση 3 χιλιομέτρων με 3 χιλιόμετρα στη Βόρεια Καλιφόρνια, με 8.510.040 σημεία δεδομένων σε περίοδο οκτώ ετών και 4.074 καταγεγραμμένες αναφλεξεις. Η ανάλυση σημασίας χαρακτηριστικών προσδιορίζει παράγοντες όπως η υψηλή ανάπτυξη στην κάλυψη γης, η πυκνότητα πληθυσμού και ο δείκτης τοπογραφικής υγρασίας (TWI) ως εξαιρετικά σημαντικούς για την επίδραση των πυρκαγιών. Το ξηρότερο καύσιμο και οι πυκνοκατοικημένες περιοχές αυξάνουν τον προβλεπόμενο αριθμό πυρκαγιών. Οι προβλέψεις του καιρού δείχνουν χαμηλότερη επιρροή στις ανάφλεξεις. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε παρέχει ημερήσιες πιθανότητες ανάφλεξης πυρκαγιάς για κάθε κελί στην περιοχή μελέτης, προσφέροντας πληροφορίες για περιοχές υψηλού κινδύνου(Εικόνα 2.6)[32].



Εικόνα 2.6. Εικόνα αναπαράστασης σημαντικότητας μεταβλητών στο μοντέλο μηχανικής μάθησης με διαφορετικές μεθοδολογίες.

Από: Tong, Qi, and Thomas Gernay. "Mapping Wildfire Ignition Probability and Predictor Sensitivity with Ensemble-Based Machine Learning." *Natural Hazards*, vol. 119, no. 3, 12 Sep. 2023, pp. 1551–1582, <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06172-x>. Accessed 13 Jan. 2024.

Μια τελευταία μελέτη για την νότια γαλλία χρησιμοποιεί ένα πλαίσιο για την εκμάθηση ενός μοντέλου στην ταξινόμηση των αιτιών ανάφλεξης πυρκαγιάς με βάση διάφορα περιβαλλοντικά και ανθρωπογενή χαρακτηριστικά. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η πηγή των άγνωστων πυρκαγιών μπορεί να προσδιοριστεί με διαφορετικά επίπεδα ακρίβειας, ανάλογα με τη φύση της δασικής φωτιάς (e.g., F1-score: lightning 0.87, accidental 0.74, arson 0.64). Τα χωροχρονικά χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβανομένης της γεωγραφικής θέσης, της εποχής, της ώρας της ημέρας και των τοπογραφικών παραγόντων όπως το υψόμετρο, προσδιορίζονται ως τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά για τον προσδιορισμό της ταξινόμησης των άγνωστων πυρκαγιών που προκαλούνται στην συγκεκριμένη περιοχή και το καθεστώς πυρκαγιάς που μελετάται(εικόνα 2.7)[33].



Εικόνα 2.7. Αναπαράσταση παραγόντων βαση του μέσου αντίκτυπο στην απόδοση του μοντέλου και ποσοστιαία κατανομή σε είδος ανάφλεξης (ατύχημα, εμπρησμός, αστραπή, ιδιωτική αμέλεια, επαγγελματική αμέλεια)

Από: Christos Bountzouklis, et al. "Predicting Wildfire Ignition Causes in Southern France Using EXplainable Artificial Intelligence (XAI) Methods." *Environmental Research Letters*, vol. 18, no. 4, 1 Apr. 2023, pp. 044038–044038, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acc8ee>.

Συμπερασματικά, η σημασία συμβολής του κάθε παράγοντα επηρεάζεται από τη κάθε γεωγραφική περιοχή που μελετάται. Με διαφορετικούς παράγοντες να είναι πιο καίριοι σε διαφορετικό επίπεδο διότι κάθε περιοχή έχει διαφορετικό κλίμα, είδος εδαφικάλυψης, ανθρώπινη δραστηριότητα κ.α. Είναι απαραίτητη η ξεχωριστή έρευνα για τη κάθε περιοχή ώστε να διαπιστωθούν οι σημαντικότεροι παράγοντες ανάφλεξης και μια αποτελεσματικότερη προσέγγιση του φαινομένου.

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Στη προσπάθεια κατανόησης του φαινομένου των πυρκαγιών το επόμενο λογικό βήμα είναι, η κατανόηση της συμπεριφοράς διάδοσης των πυρκαγιών. Στη πραγματικότητα μετά από μια ανάφλεξη, κατα την οποία είναι πιο συχνή να είναι από ανθρώπινο παράγοντα, οι τοπικές κλιματικές και περιβαλλοντικές συνθήκες καθορίζουν την διάδοσή της και την εξέλιξη της σε μια σοβαρή πυρκαγιά. Έχει παρατηρηθεί το ευρύ έλλειμμα διάδοσης πυρκαγιών, όπου οι περισσότερες φωτιές σβήνονται πριν καλύψουν 120 εκτάρια, αφήνοντας τοπία με περισσότερο καύσιμο και καθιστώντας τα πιο ευαίσθητα σε μεγάλες φλόγες. Ιδιαίτερα στις περιοχές χαμηλού και μεσαίου υψόμετρου, τα σύγχρονα δάση είναι πιο ευάλωτα σε ασυνήθιστα μεγάλες πυρκαγιές[34]. Όπως και στους παράγοντες ανάφλεξης, η κύρια κατηγοριοποίηση της βιβλιογραφίας είναι σε ανθρωπογενείς, εδαφοκάλυψη, κλιματικοί και τοπογραφικοί παράγοντες. Με τη διαφορά ότι σε αυτή την πτυχή των πυρκαγιών, οι ανθρωπογενείς έχουν ελάχιστη συμβολή στην διάδοση της φωτιάς και κυρίως μείωση της διάδοσης με φυσικά ανθρωπογενή εμπόδια (δρόμοι) και με τη πυρόσβεση. Αντιθέτως, οι παράγοντες εδαφοκάλυψης, κλιματικοί και τοπογραφία είναι σημαντικοί για τη συμπεριφορά της διάδοσης, με την εδαφοκάλυψη να είναι το καύσιμο, οι κλιματικοί να εκφράζουν τους τρόπους που διαδίδεται ο αέρας και τη τοπογραφία να δίνει ανασταλτική ή θετική επιρροή στη διάδοση της φωτιάς, με τη τροποποίηση των προηγούμενων.

Ανθρωπογενείς

Το πρώτο ανθρωπογενές χαρακτηριστικό για τη συμπεριφορά διάδοσης είναι οι οδοί. Οι οδοί είναι πάντα σημαντικοί για τον καθορισμό των ορίων των πυρκαγιών σε διαφορετικές οικολογικές περιοχές και μεγέθη, αλλά έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση σε πυρκαγιές που είναι μεταξύ 102 και 104 εκταρίων σε μέγεθος[35]. Σε αυτό το εύρος μεγέθους, η συμβολή των οδών στην πυρόσβεση είναι αρκετά σημαντική. Σε διαφορετικές περιοχές υπάρχουν διαφορετικά μοτίβα επικαλύψεων οδικών-τοπογραφικών χαρακτηριστικών και συνήθως δεν διασταυρώνονται με κορυφές και κοιλάδες. Συμπεριλαμβάνοντας ή αποκλείοντας τους δρόμους, αξιολογείται άμεσα η επίδραση των ανθρώπων στην πυρόσβεση και διαπιστώνετε ότι οι δρόμοι έχουν σταθερά σημαντικό αντίκτυπο στα όρια πυρκαγιάς[35]. Καθώς και συνάδει με το κρίσιμο ρόλο που διαδραματίζουν οι δρόμοι στην πυρόσβεση πυρκαγιών. Οι οδοί έχουν ισχυρό έλεγχο περιορισμού εξάπλωσης σε μικρές και μεσαίες πυρκαγιές, και η επιρροή τους είναι εμφανής ακόμη και για μεγαλύτερου μεγέθους φωτιάς, αν και με μικρότερη αποτελεσματικότητα[36].

Ωστόσο, λιγότερη προσοχή έχει δοθεί στην ανακάλυψη στοιχείων που καθορίζουν πως σταματούν οι πυρκαγιές, ειδικότερα τις εστίες και αιτίες των συνόρων των πυρκαγιών, καθώς η εστίαση της μελέτης των πυρκαγιών ήταν συχνά στην κατανόηση του τρόπου εξάπλωσης της. Έρευνες έχουν δείξει ότι τα όρια πυρκαγιάς συχνά συμπίπτουν με περιοχές που έχουν ήδη καεί, αλλά σχετικά λίγοι είναι οι γνωστοί παράγοντες και οι διαδικασίες που ελέγχουν τη φυσική πυρόσβεση μιας φωτιάς. Δηλώνοντας ότι την ιδιότητα μείωσης διάδοσης μπορεί να μην την έχουν μόνο ανθρωπογενή παράγοντες αλλά και το καύσιμο ή το κλίμα.[34,36,37]

Εδαφοκάλυψη

Το καύσιμο είναι ένα βασικό συστατικό των πυρκαγιών και διαιρείται σε ζωντανά καύσιμα (φυτά) και νεκρά με βάση τη ζωτικότητα. Οι διάφορες ιδιότητες της βλάστησης, όπως η κάλυψη, η έκταση, η πυκνότητα, η δομή και η χημική σύνθεση, επηρεάζονται από τις γεωγραφικές αλλαγές. Διαφορετικά είδη βλάστησης έχουν διαφορετικά σημεία ανάφλεξης και ταχύτητες καύσης ως αποτέλεσμα αυτών των διαφορών. Για παράδειγμα, η εδαφοκάλυψη της Κίνας από το Σεπτέμβριο του 2022 αποτελείται από 331 εκατομμύρια εκτάρια δάσους, ή 24,02% της συνολικής έκτασης της χώρας, και 392,8 εκατομμυρίων εκταρίων βοσκοτόπων, ή 40,90%[38]. Κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου που κυμαίνεται από μία ημέρα έως ένα έτος, η εμφάνιση πυρκαγιάς εμφανίζει παρατηρήσιμα μοτίβα που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τους φυτικούς φαινολογικούς κύκλους. Το νεκρό καύσιμο, το οποίο περιλαμβάνει νεκρή βλάστηση, είναι απαραίτητο για την καύση των πυρκαγιών. Επιπλέον, λόγω των ευρύτερων διαστάσεων μεταξύ των υλικών και επειδή τα επιφανειακά καύσιμα (όπως νεκρά χόρτα) έχουν χαμηλή πυκνότητα και επιτρέπουν την άφθονη αποθήκευση οξυγόνου, γίνονται πολύ εύφλεκτα καύσιμα. Επιπλέον, είναι πορώδη και απορροφούν και απελευθερώνουν νερό σαν ένα σφουγγάρι, με το μηχανισμό της διάχυσης. Ενώ, μεγαλύτερη πυκνότητα επιφανειακών καυσίμων αναστέλλει την εκτεταμένη εξάπλωση των πυρκαγιών, μειώνοντας την αποθήκευση οξυγόνου και δημιουργώντας μικρότερα κενά[38].

Η βλάστηση τείνει να μοιράζεται προσαρμοστικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη δυναμική πυρκαγιάς σε περιοχές με παρόμοια κλίματα. Για παράδειγμα, τα φυτά στις περιοχές της Μεσογείου έχουν αναπτύξει μηχανισμούς για να διατηρήσουν την υγρασία κατά τη διάρκεια παρατεταμένων περιόδων ξηρασίας, και η βλάστηση βιώνει ανάπτυξη την άνοιξη. Με παρόμοιο τρόπο, τα κωνοφόρα δάση έχουν αναπτυχθεί σε όλες τις βορειοδυτικές περιοχές του κόσμου ως αποτέλεσμα της προσαρμογής στους μακρούς χειμώνες και τις σύντομες καλοκαιρινές περιόδους ανάπτυξης που βρίσκονται σε κρύα κλίματα. Τα αγροδοσικά καύσιμα αποτελούνται από κλαδιά και φύλλα και διατηρούν την κυτταρική τους δομή μέχρι να καταρρεύσουν[39].

Όσον αφορά τη καύση σε μικροσκοπικό επίπεδο, ένα σωματίδιο νεκρού καυσίμου θα επιτύχει την ισορροπία του περιεχομένου υγρασίας (equilibrium moisture content, EMC), η οποία ελέγχεται από τις συνθήκες περιβάλλοντος, σε σταθερή θερμοκρασία και σχετική υγρασία. Η διάμετρος ενός κυλινδρικού σωματιδίου καυσίμου επηρεάζει το πόσο καιρό χρειάζεται για να φτάσει στην ισορροπία. Αν και οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας καθιστούν δύσκολο να επιτευχθεί η ισορροπία του περιεχομένου υγρασίας σε δυναμικές αγροδοσικές συνθήκες, είναι μια χρήσιμη έννοια για τη μοντελοποίηση πρόβλεψης της περιεκτικότητας σε υγρασία καυσίμων. Αυτή η γνώση της ισορροπίας του περιεχομένου υγρασίας βοηθά στη δημιουργία μοντέλων που είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των πυρκαγιών σε σχέση με τις συνθήκες υγρασίας καυσίμων[39].

Η περιεκτικότητα σε υγρασία ενός καυσίμου είναι η μάζα του νερού σε ένα καύσιμο, εκφραζόμενη ως ποσοστό της ξηρής μάζας καυσίμου και είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό του κινδύνου διάδοσης της πυρκαγιάς. Αυτή η μέτρηση έχει αποδειχθεί ότι σχετίζεται με την έκταση των πυρκαγιών σε διεθνές επίπεδο και χρησιμοποιείται συνήθως σε συστήματα εκτίμησης κινδύνου φωτιάς. Επιπλέον, η υγρασία του εδάφους είναι ένας τρόπος αποθήκευσης της βροχόπτωσης και έχει σημαντική επίδραση

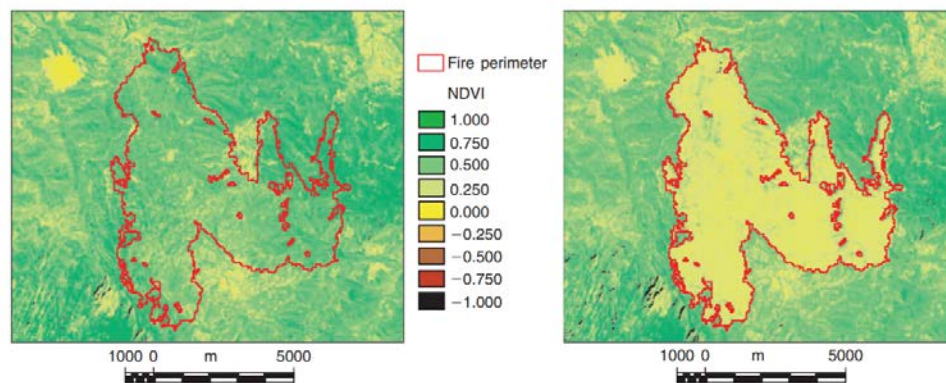
στην περιεκτικότητα υγρασίας των επιφανειακών καυσίμων. Με έμφαση στη διατήρηση του νερού, τα ζωντανά φυτά έχουν αναπτύξει πολύπλοκα συστήματα και μεθόδους για τον έλεγχο της ποσότητας νερού που λαμβάνουν από το έδαφος και τον αέρα, καθώς και την ποσότητα που εκπέμπουν στην ατμόσφαιρα. Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία είναι δύο σημαντικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απαίτηση των φυτών για διατήρηση του νερού. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων πολλά φυτά πηγαίνουν σε μια κατάσταση στασιμότητας για να χρησιμοποιήσουν λιγότερο νερό. Τα φυτά χάνουν την υγρασία όταν είναι στασιμα, γεγονός που αυξάνει την πιθανότητα πυρκαγιών. Σε όλο τον κόσμο, η εμφάνιση πυρκαγιών έχει συνδεθεί με τις συνθήκες ξηρασίας. Η νεκρή βλάστηση που προκαλείται από την ξηρασία όχι μόνο αυξάνει τον κίνδυνο διάδοσης πυρκαγιών λόγω της αύξησης της ποσότητας των νεκρών καυσίμων των αγροδασικών περιοχών, αλλά αυξάνει επίσης τον κίνδυνο των ξηρών ζωντανών φυτών. Επιπρόσθετα, τα λεπτά καύσιμα, αυτά με διάμετρο μικρότερη από 0,63 cm, αντιδρούν γρήγορα σε αλλαγές στη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία, γι' αυτό και είναι κύριοι πολλαπλασιαστές των αγροδασικών πυρκαγιών. Η περιεκτικότητα σε υγρασία του νεκρού καυσίμου τείνει να μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα. Ακόμη και αν οι βροχοπτώσεις αυξάνουν την υγρασία του καυσίμου καθώς ορισμένα νεκρά καύσιμα (τύπου ξερά χόρτα) μπορεί να είναι σε θέση να απορροφήσουν ακόμη και μικρές ποσότητες νερού πιο εύκολα από τα ξύλινα καύσιμα παρόμοιου μεγέθους.[39]

Επιπρόσθετα, υπό μέτριες μετεωρολογικές συνθήκες, διαπιστώθηκαν αλλαγές στην υγρασία των καυσίμων μεταξύ των ώριμων και των νεαρών φυτών. Τα μειωμένα επίπεδα υγρασίας σε θάμνους μεγαλύτερης ηλικίας, ειδικά σε ζωντανά κλάσματα του *Ulex parviflorus* Poir (είδος θάμνου), είναι η αιτία της μειωμένης περιεκτικότητας σε υγρασία των ώριμων θάμνων. Επιπλέον, καθώς οι θάμνοι γερνούν, υπάρχει μια αξιοσημείωτη αύξηση νεκρών κλασμάτων καυσίμου με χαμηλά ποσοστά περιεκτικότητας σε υγρασία, γεγονός που προσθέτει στη συνολική μείωση της περιεκτικότητας σε νερό της βλάστησης. Σημαντικό ποσοστό σταθερής νεκρής μάζας, κυρίως στα λεπτά κλάσματα καυσίμου, χαρακτηρίζει την ομοιογενή κατακόρυφη και οριζόντια δομή που αναπτύσσεται σε θάμνους λίγα χρόνια μετά από πυρκαγιά. Αυτοί οι θάμνοι έχουν φυσικά υψηλή ευφλεκτότητα και κίνδυνο πυρκαγιάς ως αποτέλεσμα. Τα καύσιμα αυτά ανταποκρίνονται γρήγορα στις αλλαγές του καιρού, ειδικά όταν είναι νεκρά. Είναι σημαντικές για την έναρξη όλων των πυρκαγιών και την εξάπλωση των περισσότερων από αυτές. Το ποσοστό διάδοσης της φωτιάς σχετίζεται αρνητικά με την περιεκτικότητα σε υγρασία των φυτών, ενώ το φορτίο καυσίμου επηρεάζει άλλα στοιχεία της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς, όπως ένταση της πυρκαγιάς. Η παροχή καυσίμου και οι δομικές αλλαγές έχουν συσχετιστεί με την ηλικία, υποδεικνύοντας ότι αυτά τα στοιχεία επηρεάζουν τη συμπεριφορά πυρκαγιάς[40]. Πιο συγκεκριμένα για την ηλικία στο παράδειγμα των θάμνων. Σε σύγκριση με τους νεότερους θάμνους, οι ώριμοι θάμνοι έδειξαν υψηλότερο φορτίο καυσίμου, ένταση πυρκαγιάς και ρυθμό εξάπλωσης της φωτιάς. Η περιεκτικότητα σε υγρασία της βλάστησης και εδώ είχε τη μεγαλύτερη επίδραση στον ρυθμό με τον οποίο εξαπλώθηκε η φωτιά. Τέλος, σημαντικές ποσότητες καυσίμου χαμηλής υγρασίας βρέθηκαν στο ώριμο θάμνο καθώς το *Ulex parviflorus*, ένα είδος που είναι γνωστό για την αποθήκευση σημαντικών ποσοτήτων καυσίμου και αντιπροσωπεύει το 80% του καυσίμου[40].

Στη προσπάθεια ποσοτικοποίησης των μεταβλητών του καυσίμου οι ερευνητές καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι συμβατικές τεχνικές για την παρακολούθηση της απώλειας βλάστησης χρησιμοποιώντας δείκτες όπως ο τύπος καυσίμου, η κάλυψη κομοστέγης (canopy coverage) και οι ξηρές συνθήκες είναι χρήσιμες για την πρόβλεψη των πυρκαγιών[41,42]. Σε μια μελέτη για τις πυρκαγιές τύρφης στην Ινδονησία, οι δείκτες βλάστησης και νερού ήταν

πιο χρήσιμοι για την εξήγηση των πυρκαγιών στην περιοχή από ό, τι οι θερμοκρασίες της επιφάνειας και του αέρα, αν και συνέβαλαν στην κατανόηση της ευαισθησίας των δασών. Αυτό υπογραμμίζει πόσο σημαντικοί είναι οι οικολογικοί δείκτες για την κατανόηση και την πρόβλεψη του πόσο ευάλωτα είναι τα τοπία σε διάδοση πυρκαγιών σε οικοσυστήματα τύρφης. Τρεις παράγοντες που χρησιμοποιήθηκαν για να εκτιμήσουν την ευαισθησία σε πυρκαγιές στη συνοικία Northwest Fire Centre στην περιοχή Lutz Creek (BC) ήταν, διαθεσιμότητα καυσίμου (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), υγρασία καυσίμου (Normalized Difference Water Index, NDWI), και κλίση (slope). Για την απεικόνιση της διαθεσιμότητας καυσίμου και την παρακολούθηση της εξάπλωσης και της περιοχής καύσης των πυρκαγιών, χρησιμοποιήθηκε η διαθεσιμότητα καυσίμου. Παράλληλα, αξιολογήθηκαν τα συνολικά επίπεδα υγρασίας της περιοχής της έρευνας χρησιμοποιώντας την υγρασία καυσίμου. Συνδυάζοντας αυτά τα χαρακτηριστικά, ήταν δυνατόν να εκτιμηθεί πόσο καλά θα μπορούσαν να προβλέψουν την ευαισθησία ενός οικοπέδου στην εξάπλωση της πυρκαγιάς[41].

Σε έρευνα στη βορειοανατολική ισπανία, το ποσοστό κάλυψης κομοστέγης (canopy cover) και η διαθεσιμότητα καυσίμου έχουν αρνητική συσχέτιση, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι εκτάσεις με υψηλότερο ποσοστό κάλυψης κομοστέγης (canopy cover) είχαν μικρότερες διαφορές στη διαθεσιμότητα καυσίμου, οι οποίες αποτελούν ένδειξη λιγότερο έντονων πυρκαγιών, και αντίστροφα (εικόνα.3.1). Η διαφορά διαθεσιμότητας καυσίμου δεν συσχετίστηκε σημαντικά με το μέσο μέγεθος του δέντρου ή την ετήσια διαθεσιμότητα υγρασίας[43].



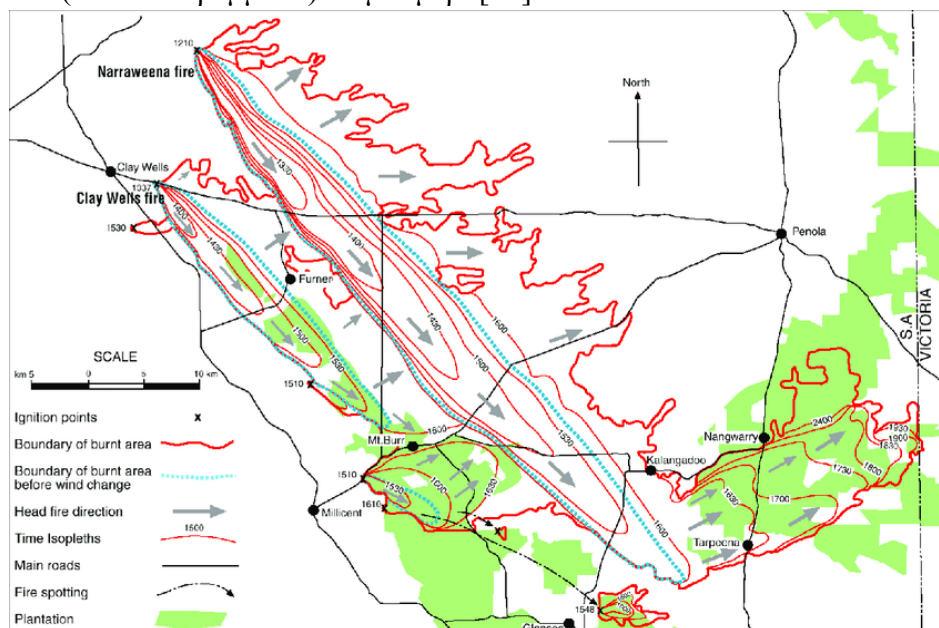
Εικόνα.3.1.Ομαλοποιημένος δείκτης βλάστησης διαφοράς (NDVI) εικόνες 15 ημέρες πριν από την πυρκαγιά (αριστερά) και 17 ημέρες μετά τη φωτιά (δεξιά).

Από: Oliveras, Imma, et al. "Factors Influencing the Pattern of Fire Severities in a Large Wildfire under Extreme Meteorological Conditions in the Mediterranean Basin." *International Journal of Wildland Fire*, vol. 18, no. 7, 2009, p. 755,

Η μελέτη προσδιόρισε σημαντική σχέση με παράγοντες που σχετίζονται με την εδαφοκάλυψη όπως το μέγεθος των δέντρων ή τη βιομάζα της έκτασης, το μέσο όρο κάλυψης κομοστέγης και της ετήσιας διαθεσιμότητας υγρασίας. Αυτά τα ευρήματα έρχονται σε σύγκριση με τα αποτελέσματα προηγούμενων μελετών όπου η παρουσία μεγάλων δέντρων συνδέθηκε με χαμηλότερα έντονη πυρκαγιά. Το ποσοστό κάλυψης κομοστέγης αποδείχθηκε ότι είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την εξήγηση της διαφοράς στη διαθεσιμότητα καυσίμου, υποδεικνύοντας ότι οι εκτάσεις με ένα υψηλότερο ποσοστό καλύψεως κομοστέγης εμφανίζουν λιγότερο σοβαρές πυρκαγιές[43].

Τα αποτελέσματα είναι σύμφωνα με εδαφοκάλυψη στη περιοχή της Μεσογείου υπό εξαιρετικά ζεστές θερμοκρασίες. Σημειώθηκε, ότι η πλειοψηφία των επιζώντων περιοχών είχε μεγαλύτερες οριζόντιες συνέχειες και ήταν πιο δασωμένες. Αυτά τα οικοπέδα έχουν υψηλή κάλυψη κομοστέγης επειδή η κομοστέγη αναστέλλει την ανάπτυξη ενός πυκνού υποστρώματος θάμνων ή νεαρών δέντρων, γεγονός που αυξάνει την κατακόρυφη συνέχεια καυσίμου και την ευκολία καύσης τους. Ενώ τα δεδομένα δείχνουν ότι η διατήρηση μιας υψηλότερης κάλυψης κομοστέγης στη μεσογειακή δασική βλάστηση μπορεί να είναι πιο επιτυχής στην μείωση της έντασης των πυρκαγιών. Αντιθέτως, οι τεχνικές διαχείρισης στα δυτικά δάση της Βόρειας Αμερικής συχνά δίνουν προτεραιότητα στη μείωση κάλυψης κομοστέγης των δασών ως μια στρατηγική για τη μείωση διάδοσης πυρκαγιάς[44].

Όταν οι πυρκαγιές εμφανίζονται σε χορτολιβαδικές εκτάσεις με χαμηλή σχετική υγρασία (<20%) και ισχυρούς ανέμους (>40 χλμ/ώρα), μπορούν να κινηθούν γρήγορα και καλύπτουν γρήγορα μεγάλες εκτάσεις. Υπό ορισμένες συνθήκες, οι φλόγες μπορούν να εξαπλωθούν μέχρι και 65 χιλιόμετρα σε λιγότερο από τέσσερις ώρες, όπως συνέβη στην πυρκαγιά Narraweena(εικόνα 3.2) του 1983 στη νοτιοανατολική Νότια Αυστραλία, η οποία κατέστρεψε περίπου 347 km² βοσκοτόπων. Οι ευνοϊκές καιρικές συνθήκες μπορούν να προκαλέσουν αυτές τις πυρκαγιές να εξαπλωθούν γρήγορα, καταναλώνοντας περισσότερα από 100 km² (10.000 στρέμματα) σε μια μέρα[45].



Εικόνα 3.2:Χάρτης επέκτασης των Narraweena and Clay Wells φωτιών στην νοτιοανατολική Αυστραλία.

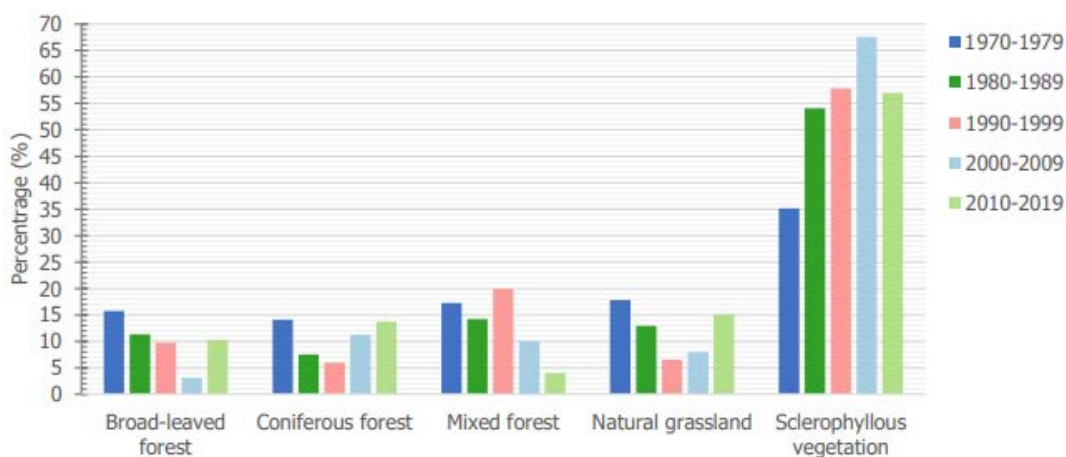
Από: Cruz, Miguel G., et al. "Wildfire Rates of Spread in Grasslands under Critical Burning Conditions." *Fire*, vol. 5, no. 2, 14 Apr. 2022, p. 55, <https://doi.org/10.3390/fire5020055>.

Έχει αναπτυχθεί μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό του προοδευτικού ρυθμού εξάπλωσης των πυρκαγιών σε τύπους καυσίμων που βρίσκονται σε θάμνους, δάση ευκαλύπτου και κωνοφόρων δασών κατά τη διάρκεια περιόδων αυξημένου κινδύνου φωτιάς. Με τις ίδιες μονάδες, αυτός ο τύπος αντιπροσωπεύει κατά προσέγγιση το ποσοστό εξάπλωσης της πυρκαγιάς ως 10% της μέσης ταχύτητας ανοικτού ανέμου 10 m. Για παράδειγμα, ο προβλεπόμενος ρυθμός εξάπλωσης των πυρκαγιών με μέση ταχύτητα ανοικτού ανέμου 40 χλμ/ώρα θα ήταν περίπου 4 χιλιόμετρα/ώρα. Ο κανόνας αυτός έχει αποδειχθεί ότι ισχύει για διαφορετικούς τύπους βλάστησης, αλλά όχι για τις χορτολιβαδικές εκτάσεις[45]. Διότι, ο

τύπος βλάστησης επηρεάζει το πόσο εύφλεκτο είναι, και ο τύπος της βλάστησης επηρεάζεται άμεσα το είδος και την ποσότητα των εύφλεκτων στοιχείων που υπάρχουν στο δάσους[46].

Σε μεγάλη έρευνα στη νότια γαλλία, η εδαφοκάλυψη χωρίστηκε σε πέντε κατηγορίες: σκληροφυλλική βλάστηση, χορτολιβαδικές εκτάσεις, κωνοφόρα δάση, μεικτά δάση, και πλατύφυλλα δάση. Οι κατηγορίες αυτές είχαν 50ετή μέση κάλυψη 20, 6,9%, 24,1%, 19,2%, 11,2%, και 24,9%, αντίστοιχα. Ενώ τα κωνοφόρα εξέθεταν μια μικρή αλλά μειούμενη τάση, τα μεικτά δάση και τα πλατύφυλλα ήταν σε μεγάλο βαθμό σταθερά στην κάλυψη κατά τα τελευταία 50 χρόνια. Η σκληροφυλλική βλάστηση είχε αυξηθεί κατά περίπου 6% τα τελευταία 30 χρόνια για να γίνει η πιο κοινή μορφή. Τα τελευταία 50 χρόνια, υπήρξε μια μικρή πτώση περίπου 3,5% στις φυσικές χορτολιβαδικές εκτάσεις, οι οποίες είναι η λιγότερο διαδεδομένη. Χρησιμοποιώντας μια χρονική κλίμακα δεκαετιών, η ανάλυση των καμένων περιοχών ανά τύπο καυσίμου προσέφερε μια λεπτομερή εικόνα της κατανομής της καμένης περιοχής και της ευαισθησίας διάδοσης πυρκαγιάς για διάφορους τύπους καυσίμων μεταξύ 1970 και 2019. Η δεκαετής κατανομή της καμένης περιοχής ανά τύπο καυσίμου παρουσιάζεται στην εικόνα 3.3. Με την πάροδο των ετών, η σκληροφυλλική βλάστηση υπήρξε η κυρίαρχη αιτία των καυσίμων, αποδεικνύοντας τον σημαντικό ρόλο της στη διάδοση των πυρκαγιών. Τα δεδομένα δείχνουν πώς, κατά τη διάρκεια των καθορισμένων περιόδων, άλλαξαν τα πρότυπα των πυρκαγιών σε διάφορους τύπους καυσίμων[47].

Κατά τη διάρκεια της μελέτης, η σκληροφυλλική βλάστηση αποτελούσε συνεχώς το μεγαλύτερο ποσοστό της καμένης έκτασης και παρέμεινε κυρίαρχη, τα κωνοφόρα δάση έδειξαν μέτρια αύξηση, ενώ τα μικτά δάση έδειχναν μια τάση μείωσης. Οι πληροφορίες υπογραμμίζουν τον τρόπο με τον οποίο η δυναμική των επιπτώσεων της φωτιάς σε διάφορους τύπους βλάστησης έχουν αλλάξει με την πάροδο των ετών[47].

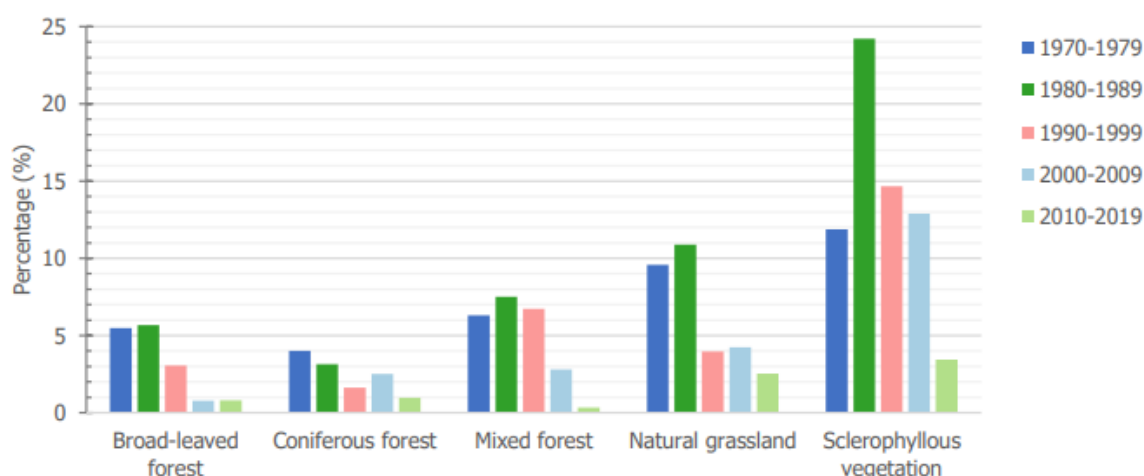


Εικόνα.3.3,Κατανομή της κατεστραμμένης έκτασης ανά κατηγορία βλάστησης ανά δεκαετία (το άθροισμα κάθε δεκαετίας ισούται με 100%)

Από: Bountzouklis, Christos, et al. "Environmental Factors Affecting Wildfire-Burned Areas in Southeastern France, 1970–2019." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 22, no. 4, 6 Apr. 2022, pp. 1181–1200, <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1181-2022>.

Λαμβάνοντας υπόψη τις αλλαγές της συνολικής έκτασης καθώς και του μεγέθους, στην εικόνα 3.4 το δεκαδικό ποσοστό της καμένης περιοχής σε σύγκριση με τη συνολική έκταση

κάθε τύπου βλάστησης. Η κατανομή της βλάστησης δεν έχει αλλάξει πολύ κατά τη διάρκεια των ετών, με τη σκληροφυλλική βλάστηση να αποτελεί το 25%, τα μικτά δάση να αποτελούν το 19%, τα πλατύφυλλα δάση να καλύπτουν περίπου το 21%, και τα κωνοφόρα δάπεδα να καλύψουν το 24%. Υπήρξε εξέλιξη στη σκληροφυλλική βλάστηση, με αύξηση από 21% το 1970-1979 σε 27% το 2010-2019[47].



Εικόνα.3.4. Ποσοστό των κατηγοριών βλάστησης που καίγονται ανά δεκαετία

Από: Bountzouklis, Christos, et al. "Environmental Factors Affecting Wildfire-Burned Areas in Southeastern France, 1970–2019." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 22, no. 4, 6 Apr. 2022, pp. 1181–1200, <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1181-2022>.

Παρόλο που το γρασίδι είναι η λιγότερο διαδεδομένη μορφή και έχει ελαφρώς μικρότερη κάλυψη συνολικά, το μερίδιό του στην περιοχή που καίγεται είναι είτε ίσο ή υψηλότερο από εκείνο των άλλων τύπων καυσίμων που ακολουθούν σκληροφυλλική. Εκτός από το χρονικό πλαίσιο 1990-1999, τα μικτά δάση συχνά περιέχουν υψηλότερα ποσοστά καμένων περιοχών σε σχέση με τα πλατύφυλλα και τα κωνοφόρα. Ακόμη και σε δεκαετίες με μεγάλες πυρκαγιές, τα κωνοφόρα εμφανίζουν συνεχώς σχετικά χαμηλές αναλογίες, γεγονός που υποδηλώνει ότι η τροποποίηση της πυροσβεστικής στρατηγικής της δεκαετίας του 1990 δεν είχε καμία επίδραση. Όταν πρόκειται για το ποσοστό των κατεστραμμένων περιοχών, τα δάση με πλατύ φύλλο συχνά εμπίπτουν μεταξύ των μικτών και των κωνοφόρων δασών[47].

Το ποσοστό των πυρκαγιών έχει αυξηθεί με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που δείχνει ότι αυτός ο τύπος βλάστησης εξαπλώνεται με ταχύτερο ρυθμό. Οι θάμνοι μπορεί να είναι πιο ανθεκτικοί στην πρώιμη καταστολή από άλλου είδους εδαφοκάλυψη που μπορεί να έχει βραδύτερο αρχικό ρυθμό εξάπλωσης όταν πρόκειται για περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητο να σβήσουν τις πυρκαγιές. Επιπλέον, υπάρχει υψηλή συμμετοχή βοσκοτόπων σε καμένες περιοχές, οι οποίες μπορεί να σχετίζονται με ζητήματα προσβασιμότητας ή ταχύτερη αρχική διάδοση. Οι φυσικές χορτολιβαδικές περιοχές έχουν υψηλή ευαισθησία σε πυρκαγιά, λόγω του λεπτού καυσίμου αδυναμία διατήρησης υγρασία κλπ. Αντίθετα, ακόμη και σε χρόνια που υπάρχουν μεγάλες πυρκαγιές, τα κωνοφόρα εκθέτουν ένα χαμηλό ποσοστό καμένων εκτάσεων. Τα κωνοφόρα δάση είναι η λιγότερο επιρρεπής σε πυρκαγιά, παρά το γεγονός ότι ταξινομείται ως πυροφιλική εδαφοκάλυψη. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η

πλειονηφία των κωνοφόρων δασών βρίσκονται σε ζώνες υψηλού υψομέτρου όπου υπάρχουν λιγότερες πυρκαγιές[47].

Κλιματικοί

Η κλιματική αλλαγή προκαλείται από την υπερθέρμανση του πλανήτη και έχει οδηγήσει σε σημαντικές αλλαγές σε ορισμένα δασικά οικοσυστήματα. Η συχνότητα και η ένταση των πυρκαγιών έχουν αυξηθεί ως αποτέλεσμα αυτής της αλλαγής. Η κατεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου είναι δύο από τις σημαντικότερες μετεωρολογικές μεταβλητές που επηρεάζουν τον τρόπο συμπεριφοράς των πυρκαγιών. Η ταχύτητα του ανέμου έχει σημαντική επίδραση στο μήκος, το ποσοστό εξάπλωσης και την κάλυψη των πυρκαγιών. Τα ποσοστά διάδοσης πυρκαγιάς σε πραγματικό χρόνο και η απόδοση μεταφοράς θερμότητας επηρεάζονται άμεσα από τη συνδυασμένη επίδραση της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου. Ο άνεμος επιταχύνει την ξήρανση του καυσίμου, παρέχει οξυγόνο και επιταχύνει της διάδοση πυρκαγιών. Μπορεί να επιταχύνει τη καύση στα δάση, προκαλώντας τις πυρκαγιές να εξαπλωθούν πιο γρήγορα. Λόγω της ορμής που φέρει ο άνεμος, καύτρες μπορούν να μεταφερθούν σε μέρη του δάσους που δεν έχουν καεί και τη δημιουργία νέων πηγών ανάφλεξης κατά μήκος της άκρης της φωτιάς. Αυτό το φαινόμενο παίζει ρόλο στην ταχεία εξάπλωση των πυρκαγιών. Επιπλέον, ο ρυθμός με τον οποίο εξαπλώνεται μια πυρκαγιά μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από την τροποποίηση της γεωγραφικής κατανομής των καυσίμων, όπως από την αύξηση της πυκνότητας ή την αλλαγή του προσανατολισμού των εύφλεκτων αντικειμένων[40,48]. Συνεπώς, επειδή η ταχύτητα του ανέμου έχει σημαντική επίδραση στη μετάδοση θερμότητας και επιταχύνει την εξάπλωση της πυρκαγιάς, είναι γενικά αποδεκτό ότι η ταχύτητα ανέμου είναι το βασικό στοιχείο που ελέγχει τη συμπεριφορά της φωτιάς[40].

Ο άνεμος έχει σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά αγροδασικών πυρκαγιών, επηρεάζοντας τόσο την κατεύθυνση της διάδοσης όσο και τον βαθμό καύσης. Υπάρχουν τρεις τύποι πυρκαγιάς: κατευθυνόμενη πυρκαγιά(heading fire), η οποία εξαπλώνεται με τον άνεμο, έναντι πυρκαγιά(backing fire), η οποία εξαπλώνεται εναντίον του ανέμου, και πλευρική φωτιά(flanking fire), που εξαπλώνεται καθετα προς την κατεύθυνση του ανέμου. Διαφορετικοί τύποι εξάπλωσης πυρκαγιάς οδηγούν σε διαφορετικούς ρυθμούς καύσης και παραγωγής καπνού. Οι μεταβλητές κλίσης και ανέμου επηρεάζουν την κατεύθυνση στην οποία εξαπλώνεται μια πυρκαγιά, με τον άνεμο να έχει τη μεγαλύτερη επιρροή, ιδιαίτερα σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου. Οι κατευθυνόμενες πυρκαγιές είναι πιο σοβαρές από τις πλευρικές και έναντι πυρκαγιές λόγω της αυξημένης ταχύτητας του ανέμου ή της κλίσης. Τα δεδομένα δείχνουν επίσης ότι αν και οι πυρκαγιές καίγονται πιο θερμά κατά τη διάρκεια της ημέρας από ό, τι τη νύχτα, η σημασία αυτής της μεταβλητής στον προσδιορισμό της σοβαρότητας της φωτιάς δεν είναι εμφανής. Ωστόσο, αποδείχθηκε ότι υπάρχουν ουσιαστικές αλληλεπιδράσεις με μεταβλητές όπως προσανατολισμός. Η βόρεια οψη των πυρκαγιών έχει υψηλότερο ποσοστό άθικτων δέντρων από τις νότιες πτυχές, όταν οι φωτιές δεν εξαπλώθηκαν προς την κατεύθυνση του πρωτογενούς ανέμου. Επιπλέον, σε σύγκριση με τις νότιες πτυχές, οι αλλαγές στη συμπεριφορά πυρκαγιάς κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας ήταν λιγότερο αισθητές στις βόρειες πλευρές. Οι ισχυρές, μαζικές πυρκαγιές προκαλούνται κυρίως από μετεωρολογικούς παράγοντες, ιδιαίτερα όταν ξεκινούν ως κατευθυνόμενες φωτιές (heading) που επεκτείνονται κατά μήκος της κύριας κλίσης και της κατεύθυνσης του ανέμου ή κατά τη διάρκεια της ημέρας σε εξαιρετικά ευνοϊκές συνθήκες. Από την άλλη πλευρά, οι μικρές κλιματολογικές διακυμάνσεις που προκαλούνται από την τοπογραφία και τη δομή της βλάστησης συνδέονται με το μοτίβο της πυρκαγιάς σε περιοχές

όπου η συμπεριφορά πυρκαγιάς δεν ταιριάζει με αυτές τις ακραίες συνθήκες. Η γενικευσιμότητα αυτών των ευρημάτων περιορίζεται από τις περίπλοκες σχέσεις μεταξύ παραγόντων, τα μοναδικά χαρακτηριστικά κάθε πυρκαγιάς. Σύμφωνα με τη μελέτη, η εστίαση των προσπαθειών εξάλειψης στις βόρειες πτυχές και στις περιοχές όπου η πυρκαγιά προχωρεί ως πλευρική ή έναντι φωτιά ενδέχεται να έχει μεγαλύτερες πιθανότητες επιτυχίας από ό, τι στις νότιες πλευρές και τις κατευθυνόμενες πυρκαγιές, δεδομένης της ακραίας δυσκολίας και συχνά της αδυναμίας καταπολέμησης φωτιών υπό σοβαρές μετεωρολογικές συνθήκες και υψηλής έντασης[43].

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις πυρκαγιές είναι οι βροχοπτώσεις. Μια σημαντική πτυχή που επηρεάζει το πόσο γρήγορα εξαπλώνονται οι πυρκαγιές είναι η καθίζηση(precipitation). Η αύξηση των βροχοπτώσεων την ημέρα της πυρκαγιάς και κατά τη διάρκεια της εβδομάδας προκαλεί το περιβάλλον να γίνει πιο υγρό και εύφλεκτα υλικά για να περιέχουν περισσότερη υγρασία, η οποία επιβραδύνει την εξάπλωση της φωτιάς. Για να κατανοήσουμε την επίδρασή της στην εξάπλωση των πυρκαγιών, η θερμοκρασία είναι μια άλλη σημαντική μετεωρολογική συνιστώσα που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Ενώ παράλληλα, ειδικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι ημερήσιες και εβδομαδιαίες μέσες θερμοκρασίες. Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους η θερμοκρασία επηρεάζει το πόσο γρήγορα εξαπλώνονται οι πυρκαγιές. Από τη μία πλευρά, οι αυξανόμενες θερμοκρασίες επιταχύνουν την ανάπτυξη των πυρκαγιών με τη μείωση της υγρασίας και τη γρήγορη μείωση των υγρών εύφλεκτων υλικών. Από την άλλη πλευρά, άλλες έρευνες δείχνουν ότι οι ασυνήθιστα υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να αποτρέψουν την εξάπλωση των πυρκαγιών. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί από μια σχέση κατώτατου ορίου μεταξύ της θερμοκρασίας και των εύφλεκτων υλικών, όπου η θερμοκρασία έχει περιορισμένη επίδραση σε αυτά τα υλικά πέρα από ένα ορισμένο όριο[39].

Οι σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των καιρικών παραγόντων στην ατμόσφαιρα, την υδρόσφαιρα, τη βιόσφαιρα και τη γεώσφαιρα καθορίζουν τη δυναμική φύση του κλίματος. Η δυναμική συμπεριφορά των πυρκαγιών επηρεάζεται από αλλαγές της μιας που έχει συνέπειες στις άλλες. Οι ακριβείς προβλέψεις σχετικά με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη συμπεριφορά των πυρκαγιών στο μέλλον είναι δύσκολο να καθοριστούν λόγω των πολύπλοκων σχέσεων μεταξύ αυτών των στοιχείων. Ωστόσο, είναι σαφές ότι οι παρατεταμένες περιόδους έντονων καιρικών φαινομένων μπορούν να αλλάξουν την υγρασία των καυσίμων της εδαφοκάλυψης, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του καθεστώτος πυρκαγιάς[39]. Διαφορετικές συνθήκες της βλάστησης και κλιματική μεταβλητότητα συνδυάζονται για να δημιουργήσουν μοναδικά κλιματολογικά πρότυπα σε διαφορετικά μέρη. Η περίοδος των πυρκαγιών τόσο στο Βόρειο όσο και στο Νότιο ημισφαίριο ξεκινάει σε περιοχές χαμηλότερου γεωγραφικού πλάτους και κινείται προς τα πάνω προς τα υψηλότερα πλάτη καθώς η ζεστή εποχή προχωρά κατά τη διάρκεια της τροχιάς της Γης γύρω από τον ήλιο. Σημαντικές ετήσιες κλιματικές διακυμάνσεις που επηρεάζουν τη διάρκεια των εποχών καλλιέργειας, τις παραλλαγές χιονιού και το λιώσιμο του χιονιού έχουν σημαντικό αντίκτυπο στο πότε αρχίζουν και τελειώνουν οι περίοδοι κινδύνου και διάδοσης πυρκαγιάς[39].

Εκτός από τις συνήθειες ή αναμενόμενες συνθήκες, η μεταβλητότητα του καιρού κατά τη διάρκεια του χρόνου είναι ένας σημαντικός παράγοντας στον καθορισμό των χαρακτηριστικών των περιόδων πυρκαγιάς. Η συχνότητα και η συμπεριφορά των πυρκαγιών επηρεάζονται σημαντικά από τις καθημερινές ακραίες συνθήκες στο ιστορικό κλίμα. Είναι ευρέως γνωστό ότι τα ακραία καιρικά φαινόμενα που επηρεάζουν το παγκόσμιο κλίμα συνδέονται με μαζικές πυρκαγιές που απαιτούν σημαντικά μέτρα ελέγχου. Παρόμοια, η

μικρής χρονικής κλίμακας χωρικές ανωμαλίες στα πρότυπα καθίζησης προκύπτουν από την σχεδόν τυχαία κατανομή των θερμών εποχιακών συμπτωτικών βροχοπτώσεων. Αλλά σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες, όπως οι εποχές, μπορεί να εμφανιστούν πιο έντονα πρότυπα, τα οποία στη συνέχεια θα συμβάλλουν σε γεγονότα όπως ξηρασία ή πλημμύρες. Είναι εμφανές ότι οι συνθήκες κλίμα και εδάφους είναι αλληλένδετες διότι η υγρασία της εδαφοκάλυψης ελέγχεται από μεταβλητές όπως ξηρασία ή πλημμύρες[39].

Ο καιρός μιας περιοχής περιγράφει την κατάσταση της ατμόσφαιρας εκείνη τη στιγμή σε ένα συγκεκριμένο μέρος και χρόνο, συμπεριλαμβανομένων ποσοτικών στοιχείων όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, συννεφιά, οι βροχοπτώσεις, η κατεύθυνση του ανέμου και η ταχύτητα. Ο καιρός είναι δυναμικός και δεν πρέπει να συγχέεται με το κλίμα, το οποίο είναι μια εκπροσώπηση των μακροπρόθεσμων καιρικών προτύπων σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία[39].

Η ατμοσφαιρική υγρασία, η οποία παίρνει τη μορφή υδρατμών και καθίζησης, επειδή επηρεάζει την υγρασία του καυσίμου τόσο της ζωντανής όσο και της νεκρής βλάστησης έχει κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό της εμφάνισης και της συμπεριφοράς των πυρκαγιών. Έχει σημειωθεί ότι τα υψηλότερα επίπεδα υγρασίας των καυσίμων εμποδίζουν την καύση όπως αναφέρθηκε στους παράγοντες εδαφοκάλυψης, μειώνουν την θέρμανση των καυσαερίων και καθιστούν δυσκολότερη την ανάφλεξη. Μέσω της εξάτμισης, τα καύσιμα απελευθερώνουν υγρασία στην ατμόσφαιρα σε περιοχές που είναι επιρρεπείς σε πυρκαγιές, όπου η συχνότητα εξάτμισης συχνά υπερβαίνει τη συχνότητα συμπύκνωσης[39].

Τέλος, η διασπορά του καπνού μιας μεγάλης πυρκαγιάς εξαρτάται κυρίως από τους ανέμους που συνδέονται με κρύα μέτωπα, ενώ η συμπεριφορά της φωτιάς επηρεάζεται από μια ποικιλία τοπικών κυκλωμάτων ανέμου σε μικροκλίμακα[39]. Ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρονται τα προϊόντα καύσης, ειδικά ο καπνός, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την αλληλεπίδραση μιας πυρκαγιάς με τον τοπικό καιρό. Επειδή ο καπνός της πυρκαγιάς είναι ελαφρύτερος του αέρα και επειδή απελευθερώνεται σε υψηλές θερμοκρασίες, ανεβαίνει, εξαπλώνεται και ψύχεται μέχρι να φτάσει σε υψόμετρο όπου η θερμοκρασία του είναι ίση. Ωστόσο, η διασπορά καπνού μπορεί να παρεμποδίζεται από τις εναλλαγές της θερμοκρασίας στην κατώτερη ατμόσφαιρα. Οι αντιστροφές της θερμοκρασίας, οι οποίες συχνά παρατηρούνται σε ορεινές περιοχές, συμβαίνουν όταν ο θερμότερος αέρας παγιδεύεται κάτω από τον ψυχρότερο αέρα. Μια επαρκώς μεγάλη και ισχυρή φωτιά μπορεί περιστασιακά να διεισδύσει στο στρώμα, βελτιώνοντας την ροή αέρα, τη διάδοση καπνού και τη συμπεριφορά πυρκαγιάς[39].

Τοπογραφικοί

Οι τελευταίοι παράγοντες που θα μελετήσουμε είναι οι τοπογραφικοί και οι μεταβλητές όπως το υψόμετρο, η κλίση εδάφους και ο προσανατολισμός είναι το κύριο ενδιαφέρον μας. Η πιθανότητα ανάφλεξης μειώνεται σε υψηλότερα υψόμετρα όπως έχουμε αναφέρει στο προηγούμενο κεφάλαιο, καθώς συχνά έχουν ψυχρότερες θερμοκρασίες, περισσότερη υγρασία και υψηλότερη περιεκτικότητα υγρασίας στα φυτά. Αντίθετα, λόγω της μειωμένης περιεκτικότητας σε υγρασία των φυτών, τα χαμηλότερα υψόμετρα είναι πιο επιρρεπή σε καύση και διάδοση. Η κλίση επηρεάζει την περιεκτικότητα σε υγρασία των εύφλεκτων υλικών, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει τον τρόπο συμπεριφοράς των πυρκαγιών. Επειδή υπάρχει λιγότερος χρόνος για την κατακράτηση νερού μετά από βροχές, τα υλικά στεγνώνουν πιο γρήγορα σε απότομες πλαγιές ενώ οι ήπιες πλαγιές, από την άλλη πλευρά, διατηρούν περισσότερο νερό από βροχοπτώσεις, γεγονός που αυξάνει την υγρασία και

μειώνει τον κίνδυνο πυρκαγιών. Οι αλλαγές στην κλίση επηρεάζουν τη χωρική σχέση μεταξύ καμένων επιφανειών και άκαυστων ευφλεκτων υλικών, η οποία επηρεάζει τον ρυθμό με τον οποίο εξαπλώνεται μια πυρκαγιά[40].

Η κλίση έχει αποδειχθεί ότι είναι ένας σημαντικός προγνώστης της εξάπλωσης των πυρκαγιών. Μεγαλύτερες περιοχές ταξινομούνται ως με μέτρια ή υψηλή ευαισθησία στην εξάπλωση των πυρκαγιών όταν λαμβάνεται υπόψη η κλίση του εδάφους. Λαμβάνοντας υπόψη και τις τρεις μεταβλητές μαζί(κλίση, υψόμετρο, προσανατολισμός), προκύπτει μια αξιόπιστη εκτίμηση της πιθανής εξάπλωσης των πυρκαγιών, ακόμη και μόνη της η κλίση δεν μπορεί να είναι επαρκής για τον προσδιορισμό των τόπων που είναι ευαίσθητα σε πυρκαγιές[41]. Έρευνα έχει δείξει ότι η κλίση εδάφους έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς (Rate of spread). Επιπλέον, παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας κατά 0,5 βαθμούς Κελσίου για κάθε 100 μέτρα αύξησης ύψους[46].

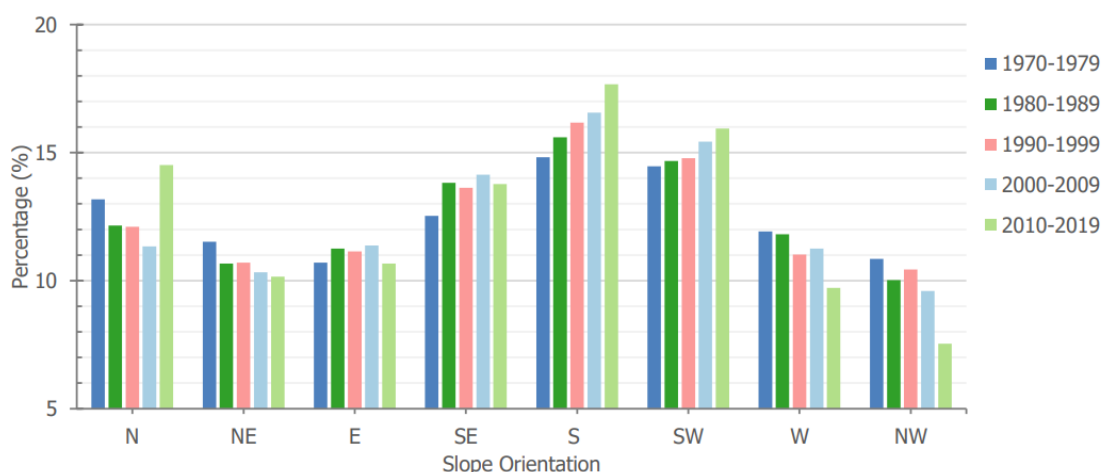
Η τοπογραφία λειτουργεί ως ένα σταθερό πρότυπο που επηρεάζει μια σειρά μεταβλητών, συμπεριλαμβανομένων των καιρικών συνθηκών, της συμπεριφοράς πυρκαγιάς και της δυναμικής της βλάστησης. Οι βόρειες πλαγιές βιώνουν μεγαλύτερα διαστήματα ανάκαμψης και ηπιότερη πυρκαγιά, καθώς είναι συχνά πιο δροσερές, υγρότερες από τις νότιες, λόγω της χαμηλότερης ηλιακής ακτινοβολίας τους. Τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά, όπως οι δίοδοι κρύου αέρα, παράγουν μικροκλίματα όπου η συμπεριφορά της πυρκαγιάς μπορεί να ποικίλει δραματικά. Η τοπογραφία επηρεάζει επίσης τα μοτίβα του ανέμου κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς. Ημερήσια μοτίβα προς τα άνω της κλίσης (upslope)η προς τα κάτω(downslope) επιταχύνουν την εξάπλωση της φωτιάς και επηρεάζουν τη σοβαρότητα της. [35,49].

Σε αντίθεση, η τοπογραφία μπορεί να λειτουργεί και ως εμπόδιο στην εξάπλωση της πυρκαγιάς, όπως οι πλαγιές, ή οι βράχοι, προκαλώντας τη συμπτωτική προθέρμανση των καυσίμων προς τα πάνω από το μέτωπο της φλόγας. Πυρανθεκτικές εστίες– περιοχές με παρατεταμένα διαστήματα χωρίς πυρκαγιά – μπορούν να παραχθούν από αυτά τα χαρακτηριστικά, τα οποία μπορούν να αφήσουν το τοπίο με ξεχωριστά και ανθεκτικά μοτίβα βλάστησης. Η τοπογραφία επηρεάζει την συμπτωτική θέρμανση, τα πρότυπα ροής ανέμου, τα φυσικά εμπόδια και το μακροπρόθεσμο κλίμα, τη βλάστηση και τα καύσιμα έμμεσα.[35,50].

Ο αντίκτυπος της τοπογραφίας στις πυρκαγιές φαίνεται να εξαρτάται από το πλαίσιο, με διαφορετικούς βαθμούς χωρικού ελέγχου ανάλογα με πράγματα όπως η απόσταση από το σημείο ανάφλεξης στα εμπόδια που εξαπλώνονται από τη φωτιά. Επειδή η συναγωγική θέρμανση εμφανίζεται σε απότομες πλαγιές, οι πυρκαγιές συνήθως εξαπλώνονται πιο γρήγορα προς τα πάνω. Οι κορυφογραμμές μπορούν φυσικά να εμποδίσουν την εξάπλωση της πυρκαγιάς δημιουργώντας διακοπές πτυχών και αλλάζοντας τις συνθήκες βλάστησης και καυσίμου. Οι λόφοι δεν χρησιμεύουν πάντα ως αδιαπέραστα εμπόδια. Οι πυρκαγιές μπορούν να περάσουν πάνω τους και να κατεβούν, ειδικά σε περίπτωση μείωσης των ανέμων. Υπό ορισμένες συνθήκες ανέμου και καυσίμου, οι κορυφογραμμές μπορεί να έχουν έμμεση επίδραση στο πόσο αποτελεσματικοί είναι οι γειτονικοί τυθμένες της κοιλάδας σε αυτή την κατάσταση[40]. Επιπρόσθετα ,η όψη μιας πλαγιάς επηρεάζει το πόσο φως του ήλιου λαμβάνει. Μελέτες υποδεικνύουν ότι η χλωρίδα και το έδαφος στις νότιες πλαγιές είναι ξηρότερη από εκείνες τις πλαγιές που στρέφονται προς άλλες κατευθύνσεις.[46]. Η ισχυρότερη ηλιακή ακτινοβολία στις ηλιόλουστες πλαγιές προκαλεί χαμηλότερη υγρασία και ξηρότερες συνθήκες, γεγονός που επιταχύνει την εξάπλωση των πυρκαγιών. Σε αντίθεση με τις ηλιόλουστες πλαγιές, οι σκιασμένες πλαγιές έχουν χαμηλότερο επίπεδο ηλιακής

ακτινοβολίας, υψηλότερα επίπεδα υγρασίας και χαμηλότερα ποσοστά εξάπλωσης της πυρκαγιάς[40].

Σε μεγάλη έρευνα στη νότια γαλλία, η κατανομή των καμένων περιοχών κατά τη διάρκεια μιας περιόδου πέντε δεκαετιών με βάση τον προσανατολισμό της κλίσης παρουσιάζεται στην εικόνα 3.5. Τα δεδομένα δείχνουν ότι οι νότιες πλαγιές (νοτιοανατολική και νοτιοδυτική) είναι εκεί όπου βρίσκεται πιο συχνά καμένη περιοχή, με χαμηλότερη επικράτηση στις βορειοδυτικές και βορειοανατολικές. Κατά τη διάρκεια της 50ετούς περιόδου μελέτης, οι τιμές για τις νότιες πλαγιές παρουσιάζουν μια αυξανόμενη τάση με την πάροδο του χρόνου, υποδεικνύοντας αυξημένη ευαισθησία σε πυρκαγιές. Από την άλλη πλευρά, όλες οι άλλες πλαγιές παρουσιάζουν πτωτικές τάσεις, με εξαίρεση εκείνες που προσανατολίζονται ανατολικά. Στη ζώνη μελέτης, οι δασικές πλαγιές προς τα νότια αντιπροσωπεύουν το 14,4% όλων των πλαγιών, ενώ οι βορειοι προσανατολισμένες δασώδεις πλαγιώσεις αποτελούν περίπου το 10,2% του συνόλου. Στην ερευνητική ζώνη, οι τιμές των δασωμένων πλαγιών είναι 33,4% για τις πλαγιές που στρέφονται προς τα βόρεια και 39,9% για τις πλαγιές που στρέφονται προς τα νότια. Στην εικόνα 3.6, οι καμένες περιοχές εκφράζονται ως ποσοστό των καλυμμένων δασικών πλαγιών για να υπολογιστεί αυτή η διαφορά στην κάλυψη της περιοχής. Η κατανομή της κλίσης σύμφωνα με την κατεύθυνση κλίσης εμφανίζεται στον αριθμό ανά δεκαετία, με συνολικό ποσοστό 100% για κάθε δεκαετία.[47]

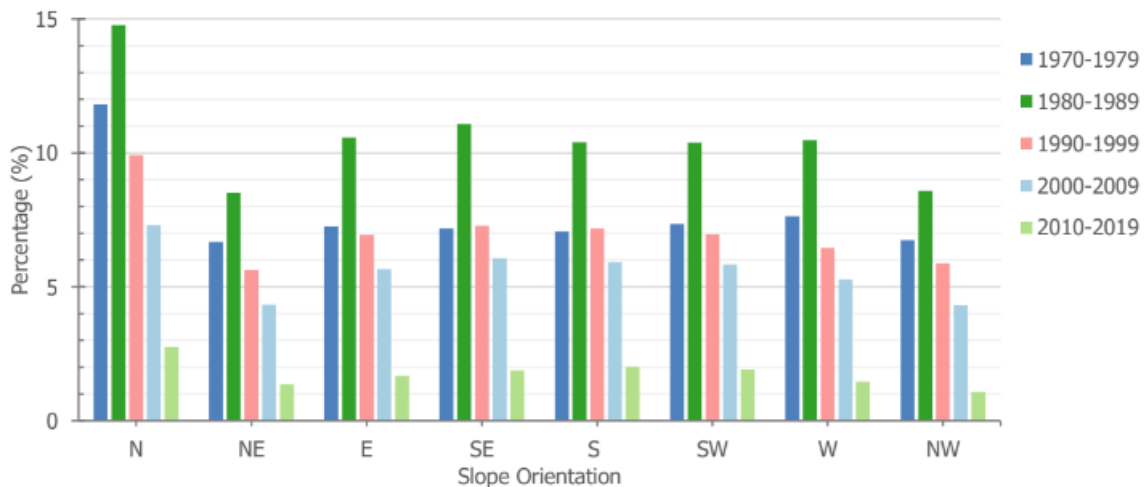


Εικόνα.3.5. Κατανομή του καμένης έκτασης σύμφωνα με τον προσανατολισμό κλίσης ανά δεκαετία (το άθροισμα κάθε δεκαετίας ισούται με 100%).

Από: Bountzouklis, Christos, et al. "Environmental Factors Affecting Wildfire-Burned Areas in Southeastern France, 1970–2019." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 22, no.

Σύμφωνα με την εξέταση του Εικόνα 3.6 για τις καμένες περιοχές, οι μέγιστες τιμές ήταν μεταξύ 1980 και 1989, μετά την οποία σημειώθηκε δραματική μείωση. Οι βορειοανατολικές και νοτιοδυτικές πλευρές καίγονται λιγότερο, ενώ οι πλαγιές που στρέφονται προς το βορρά καίγονται αναλογικά περισσότερο κάθε δεκαετία, σε αντίθεση με τις προσδοκίες. Οι αναλογικές τιμές ευνοούν τις βορειο προσανατολισμένες πλαγιές το 1970-1979, είναι ισορροπημένες το 1980-1989 και το 1990-1999 και ευνοούνται οι νότιες πλαγιότητες το 2000-2009 και το 2010-2019 όταν προστίθενται οι βόρειες και νοτιοανατολικές. Σε γενικές

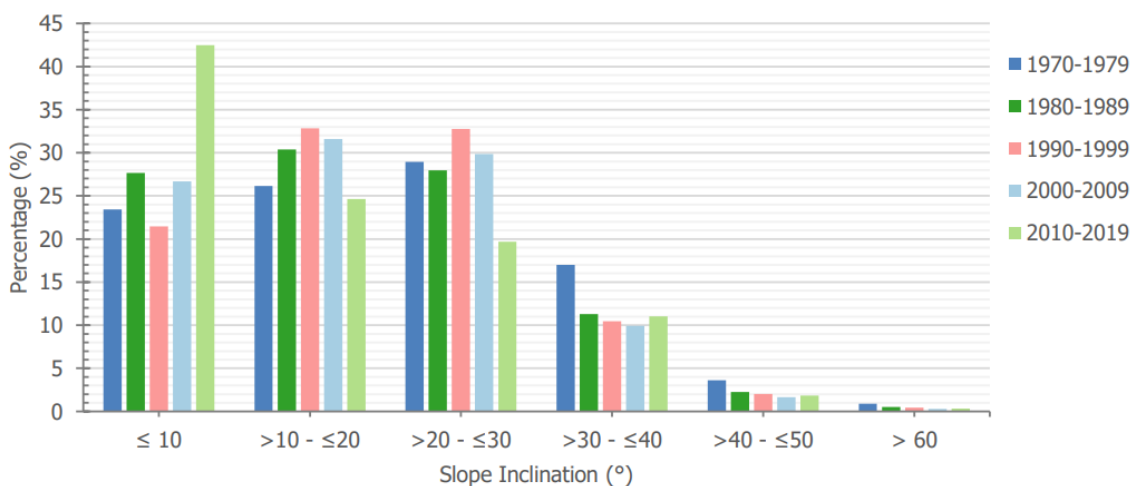
γραμμές, οι αναλογικές τιμές όλων των νότιων πλαγιών τείνουν να ισοδυναμούν ή ακόμη και να υπερβαίνουν εκείνες των βορειο προσανατολισμένων.στη πάροδο του χρόνου[47].



Εικόνα.3.6: Ποσοστό δασικών πλαγιών που καίγονται σύμφωνα με τον προσανατολισμό πλαγιάς ανά δεκαετία.

Από: Bountzouklis, Christos, et al. "Environmental Factors Affecting Wildfire-Burned Areas in Southeastern France, 1970–2019." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 22, no.

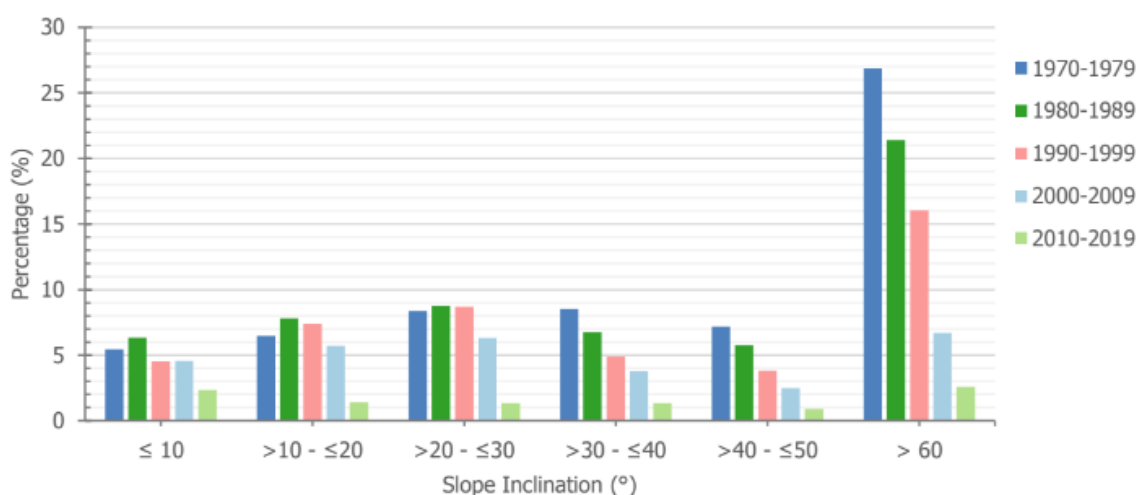
Η κατανομή των καμμένων περιοχών σύμφωνα με την κλίση των πλαγιών παρουσιάζεται στην εικόνα 3.7, όπου το σύνολο για κάθε δεκαετία είναι 100%. Οι πλαγιές μικρότερες των 30° παρουσιάζουν ξεκάθαρες διαφορές από εκείνες άνω των 30°, ενώ οι πλαγιές μικρότεροι από 30° δεν παρουσιάζουν διακριτές διακυμάνσεις. Το κλάσμα των καμένων περιοχών μειώνεται απότομα σε 30°. Μια ευρεία μετατόπιση από τις πλαγιές υψηλής κλίσης (40° ή υψηλότερη) σε χαμηλότερες ($\leq 20^\circ$) καταλήψεις αποδεικνύεται από τις χρονικές ταλαντώσεις στις διανομές. Κάτω από 10°, 30%; $10^\circ \leq 20^\circ$, 28%; $20^\circ \leq 30^\circ$, 24%; $30^\circ \leq 40^\circ$, 14%; $40^\circ \leq 50^\circ$, 3%; και 50 και άνω, 1% είναι οι κατανομές των δασικών πλαγιών[47].



Εικόνα.3.7.:Κατανομή της καμένης περιοχής σύμφωνα με τον κλίση πλαγιάς ανά δεκαετία (το άθροισμα κάθε δεκαετίας ισούται με 100%).

Από: Bountzouklis, Christos, et al. "Environmental Factors Affecting Wildfire-Burned Areas in Southeastern France, 1970–2019." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 22, no.

Αν και αποτελούν ένα πολύ μικρό ποσοστό της δασικής γης, πολύ απότομες δασικές πλαγιές -κυρίως στο ανατολικό τμήμα της περιοχής έρευνας- βιώνουν μεγαλύτερο ποσοστό πυρκαγιάς από τις ήπιες. Ως αποτέλεσμα, η συγκέντρωση είναι στην περιοχή 0–40°. Με εξαίρεση το 2010-2019, η πλειονότητα καμένης περιοχής συμβαίνει σε ενδιάμεσες πλαγιές 20°–30°. Οι δεύτερες υψηλότερες καυτές πλαγιές μπορεί να είναι ελαφρώς πάνω ή κάτω από το εύρος 20°≤30° ανάλογα με την δεκαετία, αλλά οι γενικές τάσεις δείχνουν μια σταδιακή κίνηση προς χαμηλότερη (10°≤20°) κλίση πλαγιών με την πάροδο του χρόνου. Οι απότομες πλαγιές γίνονται λιγότερο ευάλωτες σε πυρκαγιές με την πάροδο του χρόνου(Εικόνα 3.8).[47]



Εικόνα.3.8. Ποσοστό δασικών πλαγιών που καίγονται σύμφωνα με τη κλίση πλαγιάς ανά δεκαετία.

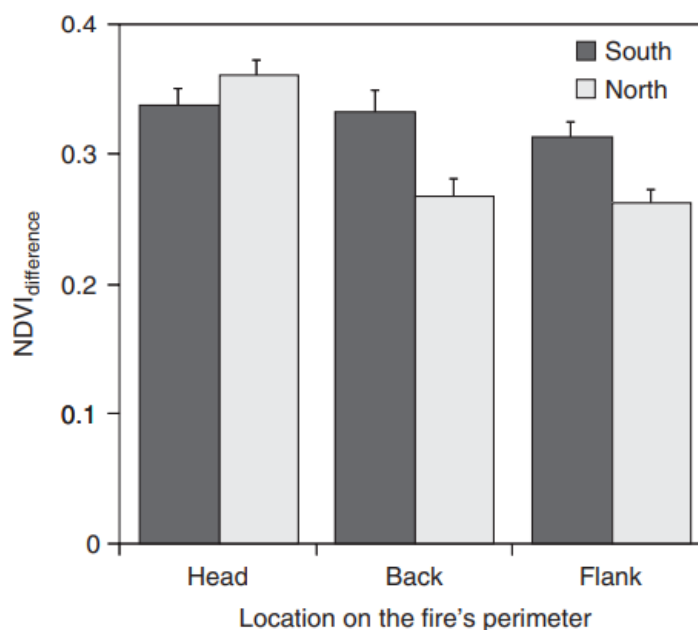
Από: Bountzouklis, Christos, et al. "Environmental Factors Affecting Wildfire-Burned Areas in Southeastern France, 1970–2019." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 22, no.

Οι αυξημένες ταχύτητες εξάπλωσης και η ένταση πυρκαγιάς είναι τα άμεσα αποτελέσματα της προώθησης της κλίσης των πλαγιών της πιο αποτελεσματικής μεταφοράς θερμότητας ακτινοβολίας. Η κλίση της πλαγιάς επηρεάζει επίσης έμμεσα την καταστολή πυρκαγιάς και την ανάφλεξη μέσω στοιχείων όπως η πυκνότητα καυσίμου, η υγρασία, η προσβασιμότητα και οι διακυμάνσεις στην ηλιακή ακτινοβολία. Σύμφωνα με τη παραπάνω μελέτη, οι πλαγιές που είναι κλίσης 20° - 30° είναι πιο πιθανό να είναι καμένες εκτάσεις. Αυτές οι πλαγιές είναι πιο επιρρεπείς σε πυρκαγιές λόγω της αποτελεσματικότητας της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία και της πρόκλησης της καταστολής τους[47].

Σύμφωνα με την ανάλυση, οι πλαγιές με χαμηλότερη κλίση έχουν μικρότερη αναλογική καμένη περιοχή, με εξαίρεση την περίοδο 2010-2019. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι τα πρώιμα μέτρα καταστολής ήταν πιο επιτυχημένα λόγω της λιγότερο αποδοτικής μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας στις επίπεδες πλαγιές, της μεγαλύτερης πυκνότητας ανθρώπινων οικισμών και της ευκολότερης προσβασιμότητας. Επιπλέον, τα αποτελέσματα δείχνουν μια μετατόπιση του χρονικού προσανατολισμού της κατεστραμμένης περιοχής από πιο απότομες προς λιγότερο απόκρημνες πλαγιές, υποδεικνύοντας ότι η τεχνική της ταχείας καταστολής στις αρχές της δεκαετίας του 1990 είχε κατασταλτική επίδραση στην εξάπλωση της φωτιάς από τις χαμηλότερες πλαγιότητες, όπου οι ανάφλεξεις είναι πιο συχνές, σε πιο

απότομες αγροδοασικές περιοχές. Αυτή η τάση υποδηλώνει μείωση της συχνότητας διαφυγής σε πιο απότομες αγροδοασικές περιοχές και ταχύτερη καταστολή των πυρκαγιών. Ειδικότερα στην Ευρωμεσογειακή περιοχή, οι περίπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ φυσικών διεργασιών, ανθρώπινης δραστηριότητας και τοπογραφίας υπογραμμίζουν τη σημασία της τοπογραφικής τραχύτητας ως δευτερεύοντος προγνωστικός παράγοντας της πυρκαγιάς[47].

Σε δευτερη μελέτη εξετάστηκε η σχέση μεταξύ των τοπογραφικών παραγόντων και του δείκτη διαθεσιμότητας καυσίμου (NDVI). Δεν βρέθηκε σημαντική συσχέτιση μεταξύ της κλίσης και της τραχύτητας του εδάφους, αλλά υπήρξε σημαντική σύγκριση μεταξύ της όψης και της πλαγιάς, με υψηλότερες τιμές διαθεσιμότητας καυσίμου στις νότιες πλαγιές από ό, τι στις βόρειες. Η θέση της περιμέτρου της πυρκαγιάς ήταν επίσης σημαντική, με τις κατευθυνόμενες πυρκαγιές (heading) να παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές διαθεσιμότητας καυσίμου από τις πλευρικές και της έναντι(Εικόνα.3.9). Τα αποτελέσματα μιας αλληλεπίδρασης έδειξαν ότι υπήρχαν λιγότερες διακυμάνσεις στις κατευθυνόμενες πυρκαγιές μεταξύ της νότιας και της βόρειας πλευράς, αλλά περισσότερες διακυμάνσεις στις πλάγιες και έναντι φωτιές. Επιπλέον, μια επίδραση αλληλεπίδρασης μεταξύ της όψης και της ώρας της ημέρας αποκάλυψε ότι, για τις βόρειες όψεις, οι τιμές διαφοράς διαθεσιμότητας καυσίμου ήταν πανομοιότυπες και στις δύο περιόδους, ενώ για τις νότιες πλευρές, οι αξίες ήταν μεγαλύτερες τη μέρα από ό, τι τη νύχτα(Εικόνα 3.9)[43].



Εικόνα 3.9.Αλληλεπίδραση μεταξύ της θέσης στην περίμετρο πυρκαγιάς και πλευρά (βόρεια, νότια) για NDVI διαφορά στη φωτιά Sant Llorenç. Εμφανίζονται οι μέσες + τυποποιημένες τιμές σφάλματος.

Από: Oliveras, Imma, et al. "Factors Influencing the Pattern of Fire Severities in a Large Wildfire under Extreme Meteorological Conditions in the Mediterranean Basin." *International Journal of Wildland Fire*, vol. 18, no. 7, 2009, p. 755, <https://doi.org/10.1071/wf08070>. Accessed 9 Oct. 2021.

Η όψη βρέθηκε να είναι σημαντική μεταξύ των τοπογραφικών μεταβλητών που μελετήθηκαν υποδεικνύοντας ότι οι νότιες πλαγιές έχουν περισσότερες ζώνες υψηλής επικινδυνότητας (υψηλότερες τιμές διαθεσιμότητας καυσίμου) από τις βόρειες. Αυτό αναμένεται δεδομένου

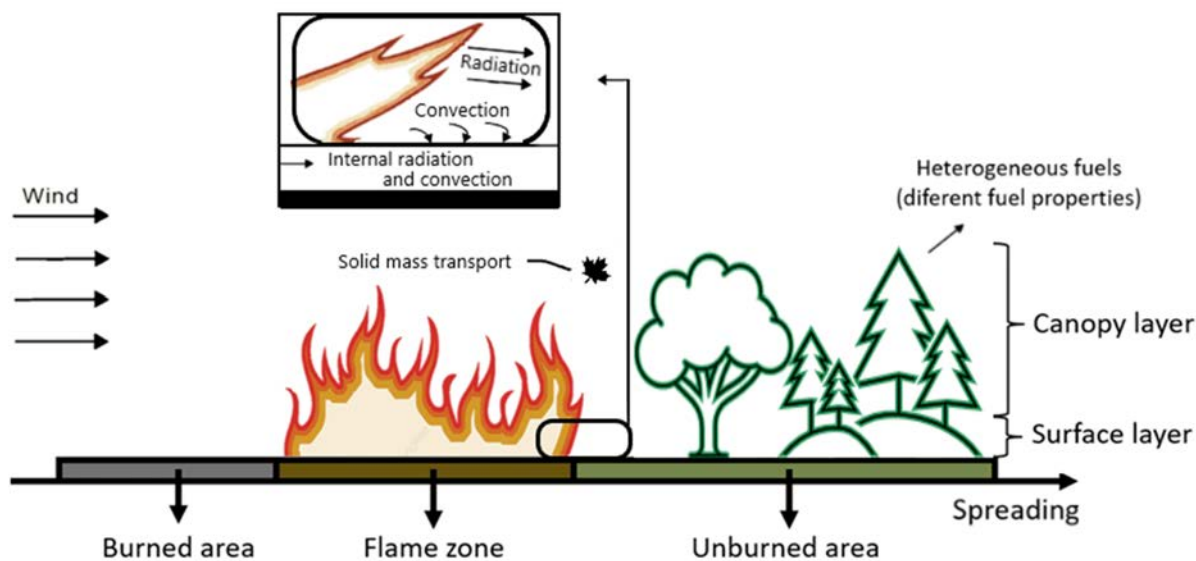
ότι η φωτιά οδηγείται από τους νότιους ανέμους και ότι οι νότιες πλευρές λαμβάνουν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας. Άλλα μέρη έχουν δείξει παρόμοιες τάσεις, με τις νότιες πτυχές που εμφανίζουν συνήθως πιο έντονη καύση από άλλες.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ

Η μοντελοποίηση των πυρκαγιών είναι ένα αρκετά δύσκολο εγχείρημα για τους ερευνητές λόγω της πολυπλοκότητας Φυσικής, Χημείας και υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεων για την επίλυση των φυσικών μοντέλων και την δυσκολία για τη διευκρίνιση των παραμέτρων εισαγωγής. Η μετάδοση θερμότητας και η ανάφλεξη των διαδοχικών καυσίμων στις πυρκαγιές δεν είναι πλήρως γνωστές παρόλο που βασίζονται σε βασικές αλληλεπιδράσεις καύσης στερεάς και αέριας φάσης. Συναγωγή, ακτινοβολία και μεταφορά καμένων υλικών είναι τα φαινόμενα που συμμετέχουν στην διάδοση της ενέργειας της φωτιάς. Λόγο της πολυπλοκότητας, η εμπειριστατωμένη εκτίμηση πάνω στο φαινόμενο είναι απαραίτητη για τις αποφάσεις την πρόληψη και πυρόσβεση των πυρκαγιών. Μια κεντρική παράμετρος υπολογισμού στις πυρκαγιές είναι η ταχύτητα διάδοσης(rate of spread) ως συνάρτηση πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων καύσης, παροχής ανέμου και ατμοσφαιρικών συνθηκών. Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενα κεφάλαια, παράγοντες εδαφοκάλυψης(είδος, σύσταση, ποσότητα), τοπογραφίας(όπως κλίση) και καιρικών φαινομένων(άνεμος) είναι από τις κύριες μεταβλητές για αυτο το φαινόμενο[51].

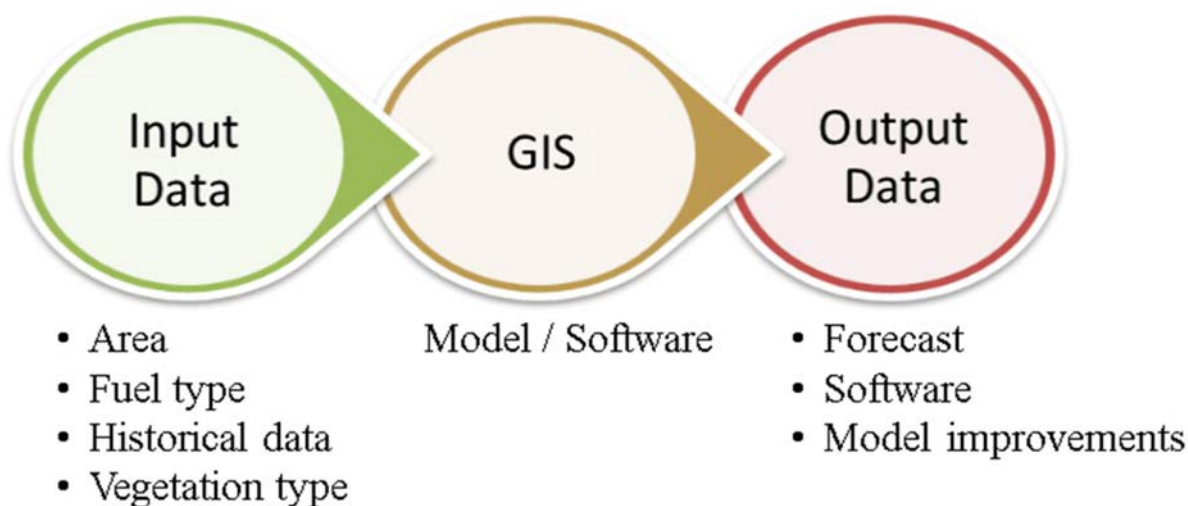
Στις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμα μοντέλα με διαφορετική προσέγγιση του φαινομένου όπως τα μοντέλα διάδοσης περιμέτρου φωτιάς, τα βασισμένα σε αρχές υπολογιστικής ρευστομηχανικής, μοντέλα με μεθόδους κατηγοριοποίησης σε κυψέλες ενός χώρου, μαθηματικά μοντέλα και συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών(GIS). Αυτό το κεφάλαιο θα επικεντρωθεί στα πρώτα δυο, τα μοντέλα διάδοσης περιμέτρου φωτιάς και τα βασισμένα σε αρχές υπολογιστικής ρευστομηχανικής, ωστόσο θα περιγραφούν τα υπόλοιπα συνοπτικά στην επόμενη παράγραφο.

Στα μοντέλα κατηγοριοποίησης σε κυψέλες, μια περιοχή διακριτοποιείται σε ένα πλέγμα όπου διατίθενται όλα τα δεδομένα εισαγωγής, έπειτα υπολογισμοί και εμπειρικές ή φυσικές σχέσεις ανανεώνουν τη κατάσταση του πλέγματος σύμφωνα με κατεύθυνση ανέμου, ένταση και άλλων παραμέτρων σε βάθος χρόνου. Παραδείγματα είναι το FireStation [52] και FIREMAP[53] ενώ αυτά του είδους τα μοντέλα είναι ελλιπή μπροστα στα διάδοσης περιμέτρου διότι η διακριτοποίηση παραμορφώνει το πραγματικό σχήμα φωτιάς[54]. Όσον αφορά τα μαθηματικά μοντέλα, περιγράφουν ένα σύστημα που χρησιμοποιεί μαθηματικές έννοιες για να περιγράψει ένα φαινόμενο όπως η ταχύτητα διάδοσης(Εικόνα.4.1). Η βασική τους χρήση είναι στην ανάπτυξη λογισμικού για προσομοίωση διάδοσης φωτιάς σε διαφορετικές ρυθμίσεις εδάφους και περιβάλλοντος όπως το BEHAVE και FARSITE. Τέλος, τα μοντέλα γεωγραφικών πληροφοριών αποθηκεύουν, αναπαράγουν και επεξεργάζονται χωρικά δεδομένα τα οποία αποθηκεύονται σε μια δομή πλέγματος και κάθε κελί αντιστοιχεί σε ένα ομοιογενές οικόπεδο(Εικόνα.4.2)[2]. Έπειτα αυτο το μοντέλο συνδυάζεται με μαθηματικά μοντέλα για να υπολογιστεί η ταχύτητα διάδοσης[51].



Εικόνα 4.1: Απλοϊκή προσέγγιση των μαθηματικών μοντέλων.

Από: Silva, João, et al. "A Systematic Review and Bibliometric Analysis of Wildland Fire Behavior Modeling." *Fluids*, vol. 7, no. 12, 5 Dec. 2022, p. 374, <https://doi.org/10.3390/fluids7120374>



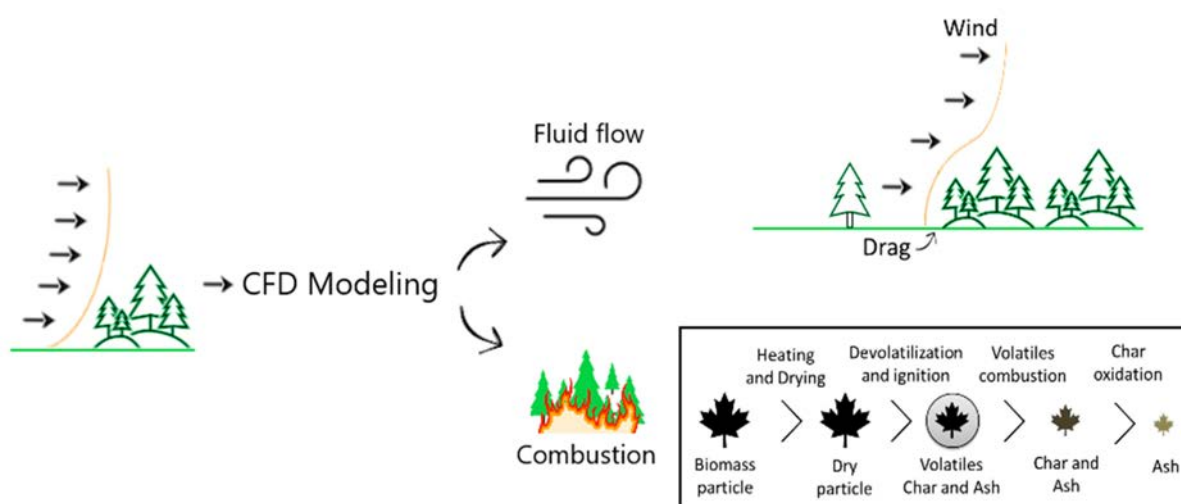
Εικόνα 4.2: Ροή δεδομένων μιας διαδικασίας GIS.

Από: Silva, João, et al. "A Systematic Review and Bibliometric Analysis of Wildland Fire Behavior Modeling." *Fluids*, vol. 7, no. 12, 5 Dec. 2022, p. 374, <https://doi.org/10.3390/fluids7120374>

Το πρώτο από τα δύο ειδών μοντέλων που θα εμβαθύνουμε είναι τα μοντέλα διάδοσης περιμέτρου, τα οποία εφαρμόζουν εμπειρικές εξισώσεις για τη ταχύτητα διάδοσης όπως το μοντέλο του rothermel[55], για τη προσομοίωση της διάδοσης της περιμέτρου της φωτιάς. Τα μοντέλα αυτά προσομοιώνουν διάδοση φωτιάς σε μεγάλη κλίμακα σε μία έκταση αντί να λύνουν απευθείας φυσικές και χημικές αρχές των πυρκαγιών. Η περίμετρος φωτιάς είναι η διεπιφάνεια μεταξύ καμένης και περιοχής που θα καεί και μη καμένης περιοχής και διαιρείται σε μεθόδους εντοπισμού μετώπου και κυνελοειδής μεθόδους. Στη πρώτη η περίμετρος θεωρείται ένα σύνολο γραμμών που διαδίδονται σε μία δεδομένη ταχύτητα διάδοσης και το σημείο μελλοντικής διάδοσης είναι κάθε σημείο της περιμέτρου της φωτιάς. Αυτά τα μοντέλα θεωρούνται υπολογιστικά γρήγορα και μερικά ενδεικτικά μοντέλα και

λογισμικά που χρησιμοποιούν αυτή τη προσέγγιση είναι το Phoenix RapidFire[56], Prometheus[57], Aurora[58], FARSITE[59] και BEHAVE [51].

Το δεύτερο μοντέλο που θα εμβαθύνουμε είναι αυτά βασισμένα σε υπολογιστική ρευστομηχανική, τα οποία προσπαθούν στη προσέγγιση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς βάσει αρχών καύσης και διαδικασιών μεταφοράς θερμότητας. Βασίζονται στις εξισώσεις Navier-Stokes με επικουρικές σχέσεις για παράγοντες όπως χημικές αντιδράσεις, φαινόμενα τύρβης και μετάδοσης θερμότητας. Επιπλέον, βασίζονται σημαντικά λιγότερο σε πειραματικές σχέσεις και το μοντέλο του Linn είναι ένα πολύ καλό πρότυπο[60]. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται για να λύσει εξισώσεις τυπικής ατμόσφαιρας μέσω ενός πλήρως συμπίεστου ρευστού ως μέσο για αναπαράσταση συνδυαστικών αλληλεπιδράσεων καύσης, ρευστομηχανικής, μετάδοσης θερμότητας των πυρκαγιών σε ένα πεδίο και χρησιμοποιεί το λογισμικό HIGRAD//FIRETEC(Εικόνα, 4.3). Εν κατακλείδι, η μελλοντική προσπάθεια των ερευνητών στοχεύεται σε αμφισυνδεδεμένα μοντέλα πρόβλεψης καιρού και διάδοσης πυρκαγιών[51].



Εικόνα 4.3: Προσέγγιση μοντελοποίησης μέσω υπολογιστικής ρευστομηχανικής πυρκαγιών.

Από: Silva, João, et al. "A Systematic Review and Bibliometric Analysis of Wildland Fire Behavior Modeling." *Fluids*, vol. 7, no. 12, 5 Dec. 2022, p. 374, <https://doi.org/10.3390/fluids7120374>

Μοντέλα διάδοσης περιμέτρου φωτιάς

Η αρχή της μοντελοποίησης διάδοσης περιμέτρου φωτιάς ξεκίνησε από τον Rothermel. Όπως όλες οι μοντελοποιήσεις, το μοντέλο του Rothermel παράχθηκε ώστε να ποσοτικοποιηθεί για τις δασικές αρχές η διαχείριση της εδαφοκάλυψης είτε με αφαίρεση καυσίμου η προδιαγραφόμενες φωτιές και να βελτιστοποιηθεί η διαχείριση των αγροδασικών περιοχών. Πιο συγκεκριμένα, για την εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης(rate of spread) και ένταση της φωτιάς σε ένα συνεχές στρώμα καυσίμου. Σημαντική παρατήρηση και πρώτο ελάττωμα του μοντέλου είναι ότι δεν εφαρμόζεται σε επικόρυφες πυρκαγιές (crown fires) αλλά εφαρμόζεται για επιφανειακές (ground fires). Τα εισαγωγικά δεδομένα στο μοντέλο είναι δύο ειδών, καυσίμου και περιβαλλοντικά. Για το καύσιμο είναι το φορτίο καυσίμου, το βάθος καυσίμου, λόγος επιφάνειας προς όγκο του σωματιδίου καυσίμου, θερμότητα καυσίμου σωματιδίου, υγρασία καυσίμου, περιεχόμενο στοιχείων και υγρασία στην οποία υπάρχει πυρόσβεση. Όσο για τα περιβαλλοντικά, η μέση ταχύτητα

ανέμου και η κλίση εδάφους είναι οι πιο σημαντικές. Θεώρηση του μοντέλου είναι ότι αφορά νεκρά καύσιμα σε ομοιογενές στρώμα ενωμένο με το έδαφος. Το μοντέλο είναι χρήσιμο για καύσιμα όπως το γρασίδι, πευκοβελόνες και θαμνώδη πεδία. Η θεώρηση ότι η φωτιά είναι μια σειρά αναφλέξεων βοηθάει στην ανάλυση του προβλήματος. Θερμότητα παρέχεται από σημείο ανάφλεξης στο πιθανό επόμενο, η υγρασία του κοντινού καυσίμου αφυδατώνεται μέχρι το καύσιμο να πυρολυθεί και εύφλεκτα αέρια απελευθερώνονται. Σε ένα κρίσιμο σημείο, τα εύφλεκτα αέρια αναφλέγονται και η καύση συνεχίζεται στο νέο σημείο. Εν τέλη, ορίζεται μια σταθερή ταχύτητα διάδοσης, ως ημι-σταθερή κατάσταση (quasi-steady state), όπου η φωτιά διαδίδεται με ταχύτητα μέση προς όλες τις στοιχειώδεις ταχύτητες[55].

Η αρχή του μοντέλου από τον Frandsen[61], βασίζεται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας μιας μονάδας όγκου καυσίμου σε μία κινούμενη φωτιά σε ομογενές στρώμα καυσίμου

$$R = \frac{l_{xig} + \int_{-\infty}^0 \left(\frac{\partial l_z}{\partial z} \right)_{z_c} dx}{\rho_{be} Q_{ig}} \quad (1)$$

Όπου,

R η ημι-σταθερή ταχύτητα διάδοσης, ft/min

l_{xig} οριζόντια θερμοροή που απορροφάται από μια μονάδα όγκου καυσίμου στη στιγμή ανάφλεξης, Btu/ft² min

ρ_{be} το ποσό καυσίμου ανα μονάδα όγκου του στρώματος καυσίμου που αναφλέγεται από την φωτιά, lb/ft³

Q_{ig} η θερμότητα που απαιτείται για να αναφλεχθεί μια μονάδα βάρους καυσίμου, Btu/lb

$\left(\frac{\partial l_z}{\partial z} \right)_{z_c}$ η κλίση της κάθετης έντασης εκτιμώμενη σε επίπεδο σταθερού βάθους z_c του

στρώματος καυσίμου, Btu/ft³ min

Ο οριζόντιος και κάθετος άξονας είναι x και z αντίστοιχα. Σε αυτή την ανάλυση η ζώνη διεπιφάνειας καυσίμου-αντίδρασης είναι σταθερή και η μονάδα όγκου κινείται σε σταθερό βάθος Z_c από $x = -\infty$ προς $x = 0$. Η μονάδα όγκου αναφλέγεται στη διεπιφάνεια. Η εξίσωση (1) δείχνει ότι η ταχύτητα διάδοσης της ημι-σταθερής κατάστασης είναι μια αναλογία μεταξύ θερμοροής από τη πηγή στον αριθμητή και τη θερμότητα που χρειάζεται για ανάφλεξη από το καύσιμο στο παρονομαστή. Λόγο της αδυναμίας πλήρους κατανόησης των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας εκείνη την εποχή, τα αποτελέσματα για την εξίσωση (1) λύνονταν συνδυαστικά με πειραματικά δεδομένα και αναλυτικές μεθόδους και την εισαγωγή νέων όρων[55].

Η θερμότητα που απαιτείται για ανάφλεξη καθορίζεται από τη θερμοκρασία ανάφλεξης, το ποσοστό υγρασίας του καυσίμου και το ποσό του καυσίμου που εμπλέκεται στην διαδικασία ανάφλεξης[55]. Η θερμότητα που απαιτείται για να αναφλεχθεί μια μονάδα βάρους καυσίμου ορίζεται ως,

$$Q_{ig} = f(M_f, T_{ig}) \quad (2)$$

όπου,

M_f το ποσοστό υγρασίας καυσίμου προς ξηρού βάρους

T_{ig} η θερμοκρασία ανάφλεξης

Το ποσό καυσίμου ανα μονάδα όγκου του στρώματος καυσίμου που αναφλέγεται απο την φωτιά είναι, ρ_{be} και ορίζεται επιπλέον μια απόδοση καύσης ως κλάσμα της αποτελεσματικής φαινομενικής πυκνότητας(effective bulk density) προς την πραγματική φαινομενική.

$$\varepsilon = \frac{\rho_{be}}{\rho_b} \quad (3)$$

η απόδοση αυτή θα είναι κοντά στο ένα για ψιλά καύσιμα και θα τείνει προς το μηδέν για μεγαλύτερα καύσιμα. Συνεπώς,

$$\rho_{be} = f(\text{φαινομενική πυκνότητα, μέγεθος καυσίμου}) \quad (4)$$

Ο αριθμητής στο δεξί μέλος της εξίσωσης (1) είναι η διαδιδόμενη ροή (propagation flux) και έχει μονάδες θερμότητα ανα επιφάνεια ανα μονάδα χρόνου, αναπαρίσταται ως

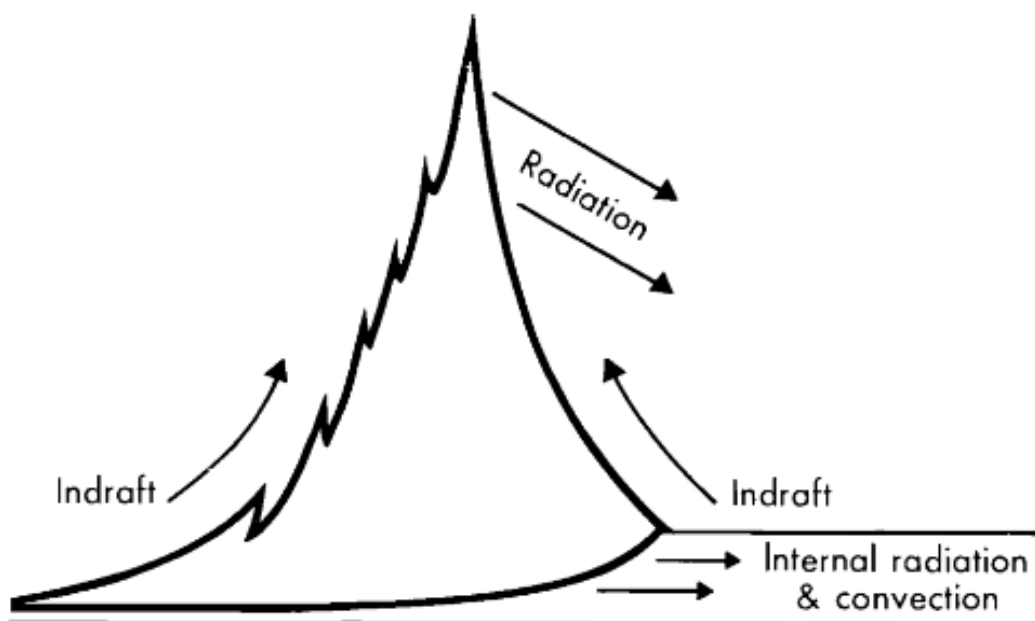
$$I_p = l_{xig} + \int_{-\infty}^0 \left(\frac{\partial l_z}{\partial z} \right)_{z_c} dx \quad (5)$$

χωρίζεται σε δύο όρους, την οριζόντια ροή και την κλίση κάθετης ροής σε ολοκλήρωμα απο $-\infty$ εως το σύνορο με τη φωτιά. Απο τις παραπάνω εξισώσεις, η κάθετη ροή είναι πιο σημαντική σε φωτιές σε υψηλή κλίση εδάφους και με ισχυρό άνεμο(Εικόνες 4.5,4.6), διότι οι φλόγες συγκλίνουν προς το πιθανό καύσιμο, αυξάνοντας την θερμική ακτινοβολία και την άμεση επαφή της φλόγας και τη θερμική συναγωγή στο πιθανό καύσιμο[55]. Θεωρείται ότι η κάθετη ροή είναι μικρή σε φωτιές μηδενικού ανέμου και $I_p = I_{po}$ όπου είναι η βασική θερμοροή στην οποία οι υπολειπόμενες επιδράσεις του ανέμου και της κλίσης εδάφους εμπλέκονται.

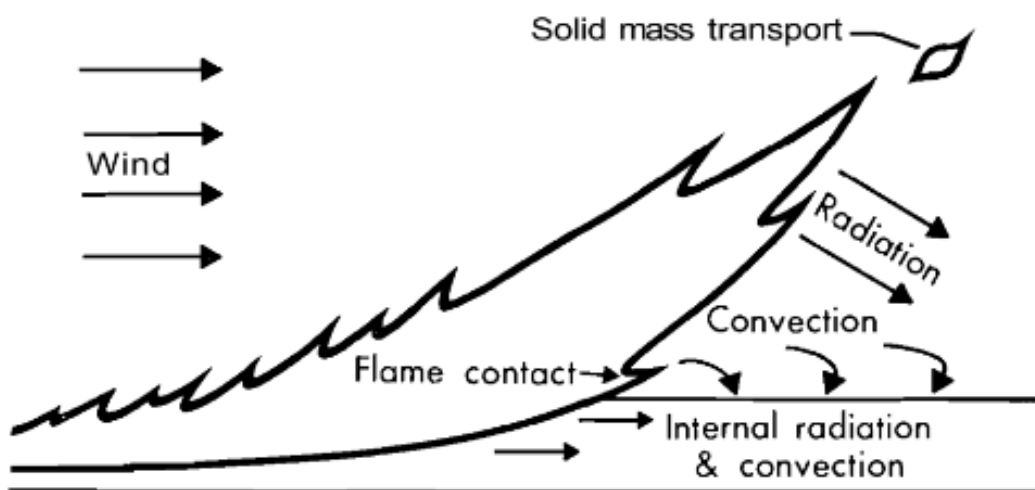
Εάν $R = R_o$ για την υπόθεση μηδενικού ανέμου (Εικόνα 4.4) και αντικαταστήσουμε τις (3),(5) τότε έχουμε

$$I_{po} = R_o \rho_b \varepsilon Q_{ig} \quad (6)$$

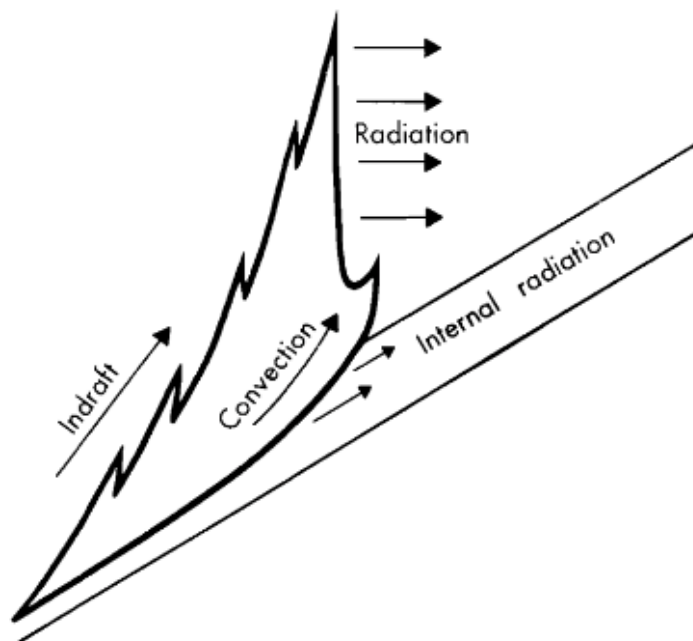
σε B.t.u/ ft² min



Εικόνα.4.4. Σχηματική αναπαράσταση φωτιάς μηδενικού ανέμου



Εικόνα.4.5. Σχηματική αναπαράσταση φωτιάς καθοδηγούμενης από άνεμο



Εικόνα.4.6. Σχηματική αναπαράσταση φωτιάς σε ανοδική κλίση εδάφους

Εικόνες από: Rothermel, Richard C. "A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels." Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 P., vol. 115, 1972, www.fs.usda.gov/research/treesearch/32533.

Η εξίσωση (6) επιτρέπει τη διαδιδόμενη ροή σε μηδενικό άνεμο I_{po} να εκτιμηθεί από πειράματα μετρώντας τη ταχύτητα διάδοσης R_o σε ένα εύρος καυσίμων.

Επειδή, η διαδιδόμενη ροή I_{po} συμβαίνει στο μέτωπο της φωτιάς, τότε είναι συνδεδεμένη με την ένταση της φωτιάς.

Ο ρυθμός απελευθέρωσης της ενέργειας του μετώπου της φωτιάς παράγεται από καύση αερίων που απελευθερώνονται από την οργανική ύλη στο καύσιμο. Έτσι, θεωρείται ότι ο ρυθμός αλλαγής φάσης του οργανικού υλικού από στερεό σε αέριο είναι μια καλή εκτίμηση στην αντίστοιχη απελευθέρωση θερμότητας της φωτιάς. Η ενέργεια που απελευθερώνεται ανα μονάδα επιφάνειας στο μέτωπο της φωτιάς λέγεται ένταση αντίδρασης και ορίζεται.[55]

$$I_R = -h \frac{dw}{dt} \quad (7)$$

σε Btu/ft² min όπου,

$\frac{dw}{dt}$ η ταχύτητα κατανάλωσης μάζας ανα μονάδα επιφάνειας lb/ft² min

h η θερμογόνο δύναμη το καυσίμου, Btu/lb

Η ένταση της αντίδρασης είναι συνάρτηση μεταβλητών του καυσίμου όπως μέγεθος σωματιδίου, φαινομενική πυκνότητα και χημική σύσταση. Είναι η πηγή της ροής διάδοσης

μηδενικού ανέμου. Μια επιπλέον θεώρηση του μοντέλου είναι ότι η ροή διάδοσης I_{po} και η ένταση αντίδρασης I_R είναι ανεξάρτητες και συσχετιζόμενες. Έτσι, η I_{po} μπορεί να βρεθεί από την I_R και που αυτή καθορίζεται από αντίστοιχες μεταβλητές καυσίμου[55].

$$I_{po} = f(I_R) \quad (8)$$

Εφόσον ο άνεμος και η κλίση εδάφους αλλάζει την διαδιδόμενη θερμότητα, εισάγονται στο μοντέλο φ_w και φ_s , που αναπαριστούν τις επιπλέον θερμότητες από τον άνεμο και τη κλίση. Είναι αδιάστατες σταθερές και είναι συναρτήσεις ανέμου, κλίσης και παραμέτρων καυσίμου και υπολογίζονται από πειραματικά δεδομένα[55]. Η συνολική διαδιδόμενη ροή αναπαρίσταται ως,

$$I_p = I_{po} (1 + \varphi_w + \varphi_s) \quad (9)$$

με την αντικατάσταση όλων των σχέσεων η εξίσωση (1) γίνεται

$$R = \frac{I_{po} (1 + \varphi_w + \varphi_s)}{\rho_{be} \varepsilon Q_{ig}} \quad (10)$$

Οι συναρτιζόμενες σχέσεις για να εκτιμηθεί η εξίσωση (1) χωρίζονται σε δύο ειδών, ως καταβόθρα και ως πηγή. Η θερμότητα που απαιτείται για να αναφλεχθεί μια μονάδα βάρους εκτιμάται αναλυτικά από τη σχέση

$$Q_{ig} = C_{pd} \Delta T_{ig} + M_F (C_{pw} \Delta T_B + V) \quad (11)$$

όπου

C_{pd} η ειδική θερμότητα ξηρού ξύλου

ΔT_{ig} θερμοκρασιακό εύρος ανάφλεξης

M_F ποσοστό υγρασίας lb νερού/ lb ξηρού ξύλου

C_{pw} ειδική θερμότητα νερού

ΔT_B θερμοκρασιακό εύρος βρασμού

V λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης

και μετά από υπολογισμούς καταλήγει η εξίσωση (11) στην εξίσωση

$$Q_{ig} = 250 + 1,116 M_F \quad (12)$$

σε Btu/lb

Έπειτα από πειράματα κατέληξαν ότι η απόδοση καύσης ε μπορεί να χαρακτηριστεί ως

$$\varepsilon = e^{(-138/\sigma)} \quad (13)$$

όπου σ είναι η αναλογία επιφάνειας προς όγκο του σωματιδίου σε 1/ft.

Κατα τη περαιτέρω ανάλυση της αντίδρασης έντασης που λόγω συντομίας δεν θα επεκταθούμε η ένταση αντίδρασης γίνεται

$$I_R = w_n h \Gamma' n_M n_S \quad (14)$$

όπου w_n το καθαρό φορτίο καύσης απαραίτητο για τη ένταση αντίδρασης

$$\text{με εξίσωση} \quad w_n = \frac{w_0}{1+S_T} \quad (15)$$

όπου w_0 ξηρό φορτίο καυσίμου σε lb/ft² και

S_T περιεχόμενο ιχνοστοιχείων καυσίμου lb στοιχείων/lb ξηρού καυσίμου

h η θερμογόνος δύναμη το καυσίμου, Btu/lb

Γ' η δυναμική ταχύτητα αντίδρασης, 1/min

n_M σταθερά υγρασίας, αδιαστατη απο 0 εως 1

n_S σταθερά μεταλλικών στοιχείων, αδιάστατη απο 0 εως 1

Από πειράματα και ανάλυση οι σταθερές n_M και n_S προσδιορίζονται ως

$$n_M = 1 - 2.59 \frac{M_f}{M_x} + 5.11 \left(\frac{M_f}{M_x} \right)^2 - 3.52 \left(\frac{M_f}{M_x} \right)^3 \quad (16)$$

$$n_S = 0.174 (S_e)^{-0.19} \quad (17)$$

M_f το ποσοστό υγρασίας καυσίμου προς ξηρού βάρους

M_x το ποσοστό υγρασίας όπου δεν διαδίδεται η φωτιά

S_e αποδοτική περιεκτικότητα ιχνοστοιχείων

Μια επόμενη μεταβλητή του μοντέλου είναι η αναλογία συμπαγούς καυσίμου και ορίζεται ως το κλάσμα της φαινομενικής πυκνότητας της στοιχισμένου του καυσίμου προς τη πυκνοτητα των σωματιδίων καυσίμου.

$$\beta = \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (18)$$

όπου

β αναλογία συμπαγούς καυσίμου, αδιάστατο

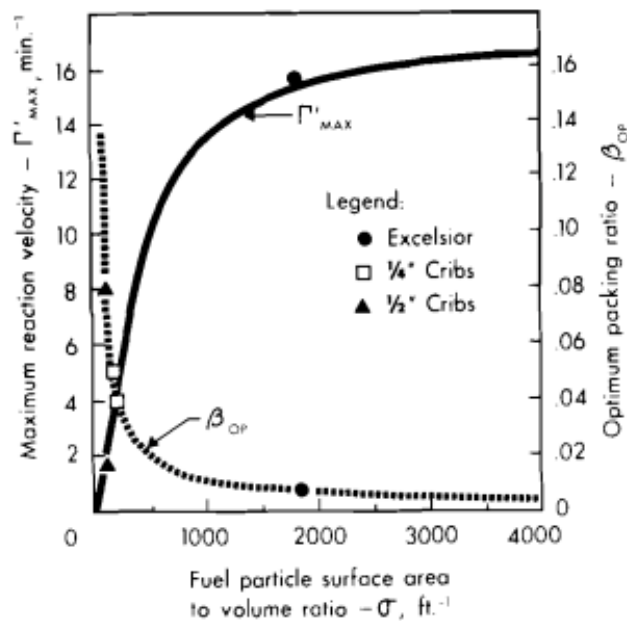
ρ_b φαινομενική πυκνότητα στοιχισμένου καυσίμου, lb/ft³

$$\text{και η εξίσωση του είναι } \rho_b = \frac{w_0}{\delta} \quad (19)$$

με δ να είναι το βάθος του καυσίμου

ρ_p πυκνότητα σωματιδιακού καυσίμου, lb/ft³

Έπειτα από επιπλέον πειράματα για τη συσχέτιση της μέγιστης δυναμικής αντίδρασης Γ'_{max} και της ιδανικής αναλογίας συμπαγούς καυσίμου β_{op} με την αναλογία επιφάνειας προς όγκο του σωματιδίου σ , (Εικόνα, 4.7), ο μαθηματικός τύπος που εφαρμόστηκε στα δεδομένα ήταν μια τροποποιημένη διασπορά poisson.



Εικόνα 4.7. Συσχέτιση μέγιστης δυναμικής αντίδρασης και ιδανικής αναλογίας συμπαγους καυσίμου.

Εικόνες από: Rothermel, Richard C. "A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels." Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 P., vol. 115, 1972, www.fs.usda.gov/research/treesearch/32533.

με τις εξισώσεις

$$\Gamma'_{max} = \sigma^{1.5} / (495 + 0,0594\sigma^{1.5}) \quad (20)$$

$$\beta_{op} = 3,348\sigma^{-0.8189} \quad (21)$$

και με συνδυασμό τους με μια αυθαίρετη μεταβλητή A μας δίνεται,

$$\Gamma' = \Gamma'_{max} (\beta / \beta_{op})^A e^{(A(1-\beta/\beta_{op}))} \quad (22)$$

$$\text{όπου} \quad A = 1/(4.77\sigma^{0.1} - 7.27) \quad (23)$$

Έπειτα εισάγεται μια αναλογία ξ και αναλογεί τη διαδιδόμενη ροή με τη ένταση της αντίδρασης

$$\xi = \frac{I_{po}}{I_R} \text{ και η σχέση που συσχετίζει τη } \xi \text{ συναρτήσει του } \beta \text{ και } \sigma \text{ βάση πειραμάτων είναι}$$

$$\xi = (192 + 0,259\sigma)^{-1} e^{(0.792 + 0.681\sigma^{0.5})(\beta+0.1)} \quad (24)$$

με αντικατάσταση του λόγου στην εξίσωση (6) καταλήγουμε στην

$$R_o = \frac{I_R \xi}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}} \quad (25)$$

και τέλος έμειναν οι σταθερές για άνεμο και κλίση εδάφους φ_w και φ_s και ομοίως με περαιτέρω ανάλυση και μαθηματική προσαρμογή των πειραμάτων κατέληξαν σε

$$\varphi_w = C U^B (\beta/\beta_{op})^{-E} \quad (26)$$

$$\text{όπου} \quad C = 7.47 \exp(0.133\sigma^{0.55}) \quad (27)$$

$$B = 0.02526\sigma^{0.54} \quad (28)$$

$$E = 0.715 \exp(-3.59 \times 10^{-4} \sigma) \quad (29)$$

ενω για τη κλίση

$$\varphi_s = 5.27\beta^{-0.3} \tan^2 \varphi \quad (30)$$

U η ταχύτητα ανέμου σε ένα μέσος ύψος ft/min
 $\tan \varphi$ η κλίση του εδάφους, απέναντι κάθετη της απόστασης που μετράμε τη κλίση προς την απόσταση και η τελική σχέση για τη ταχύτητα διάδοσης είναι

$$R_o = \frac{I_R \xi (1 + \varphi_w + \varphi_s)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}} \quad (31)$$

Συγκεντρωτικά οι εξισώσεις είναι,

$$(31) \quad R_o = \frac{I_R \xi (1 + \varphi_w + \varphi_s)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}} \quad (24) \quad \xi = (192 + 0,259\sigma)^{-1} e^{(0.792 + 0.681\sigma^{0.5})(\beta+0.1)}$$

$$(14) \quad I_R = w_n h \Gamma' n_M n_S \quad (15) \quad w_n = \frac{w_0}{1+S_T}$$

$$(21) \quad \beta_{op} = 3,348\sigma^{-0.8189} \quad (20) \quad \Gamma'_{max} = \sigma^{1.5} / (495 + 0,0594\sigma^{1.5})$$

$$(23) \quad A = 1/(4.77\sigma^{0.1} - 7.27) \quad (22) \quad \Gamma' = \Gamma'_{max} (\beta / \beta_{op})^A e^{(A(1-\beta/\beta_{op}))}$$

$$(26) \quad \varphi_w = C U^B (\beta/\beta_{op})^{-E}$$

$$(27) \quad C = 7.47 \exp(0.133 \sigma^{0.55})$$

$$(28) \quad B = 0.02526 \sigma^{0.54}$$

$$(29) \quad E = 0.715 \exp(-3.59 \times 10^{-4} \sigma)$$

$$(30) \quad \varphi_s = 5.27 \beta^{-0.3} \tan^2 \varphi$$

$$(13) \quad \varepsilon = e^{(-138/\sigma)}$$

$$(12) \quad Q_{ig} = 250 + 1,116 M_F$$

$$(18) \quad \beta = \frac{\rho_b}{\rho_p}$$

$$(16) \quad n_M = 1 - 2.59 \frac{M_f}{M_x} + 5.11 \left(\frac{M_f}{M_x} \right)^2 - 3.52 \left(\frac{M_f}{M_x} \right)^3$$

$$(17) \quad n_s = 0.174 (S_e)^{-0.19}$$

$$(19) \quad \rho_b = \frac{w_0}{\delta}$$

Με βασικές παραμέτρους εισαγωγής,

$w_0, \delta, \sigma, h, \rho_b, M_f, S_T, S_e, U, \tan \varphi, M_x$

Η εφαρμογή του μοντέλου από τον Rothermel προδιαγράφει τρεις προσεγγίσεις. Πρώτον, η χρήση υποθετικών πυρκαγιών στην εκτίμηση των καυσίμων, τη πυρόσβεση και το σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης. Δεύτερον, στη χρήση αξιολόγησης πιθανών πυρκαγιών, για την οποία απαιτείται προκαταρκτικός σχεδιασμός καταστολής και αξιολόγηση κινδύνου της φωτιάς. Η πιο χρήσιμη λειτουργία που μπορεί να είναι σε θέση να παρέχει η μοντελοποίηση της πυρκαγιάς είναι οι προβλέψεις της πιθανής σοβαρότητας της φωτιάς για διάφορες στρατηγικές διαχείρισης (όπως μείωση καυσίμου ή προδιαγεγραμμένες φωτιές). Μια τρίτη πιθανή χρήση, η πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ενεργών πυρκαγιών, θα απαιτήσει πολύ περισσότερη πολυπλοκότητα από ό, τι το μοντέλο αυτό. Οι μεταβολές του καιρού και του καυσίμου οδηγούν σε αποκλίσεις από την αναμενόμενη εξάπλωση και ένταση, δημιουργώντας κινδύνους που είναι ακατάλληλοι για χρήση σε πυροσβεστικές επιχειρήσεις [55]. Με αποτέλεσμα την ανάγκη μοντέλων με μεγαλύτερη λεπτομέρεια για ακριβέστερη εκτίμηση της συμπεριφοράς των πυρκαγιών.

Μοντέλα διάδοσης βασισμένα στην υπολογιστική ρευστομηχανική

Στο δεύτερο είδος μοντέλων για τη κατανόηση της συμπεριφοράς των πυρκαγιών εμπίπτουν τα μοντέλα διάδοσης βασισμένα στην υπολογιστική ρευστομηχανική. Ένα βασικό από αυτά μοντέλα είναι του Linn, το οποίο προσεγγίζεται από φαινόμενα μεταφοράς για να παραχθεί ένα μοντέλο με αυτοπροσδιοριζόμενη ταχύτητα διάδοσης. Επιπλέον δίνει τη δυνατότητα έκφρασης πολλών διαφορετικών ειδών εδαφοκάλυψης καθώς και μη ομογενή βλάστηση και έδαφος, σε αντίθεση με το μοντέλο του rothermel. Το μοντέλο εξηγεί τις μικροσκοπικές λεπτομέρειες μια φωτιάς με μακροσκοπική ανάλυση με τη διαίρεση ποσοτήτων σε μέσες και κυμαίνουσες. Αυτές οι ποσότητες συμπεριλαμβάνουν το καύσιμο, τον άνεμο και συγκεντρώσεις αερίων. Οι ταχύτητες αντιδράσεων καθορίζονται περισσότερο από τη διαδικασία ανάμιξης παρά από χημική κινητική. Το μοντέλο περιέχει μεταφορά πολλών ειδών αερίων, όπως οξυγόνο και ασταθών υδρογονανθράκων και τη μείωση διαφόρων καυσίμων και στάσιμων στερεών και υγρών. Από το μοντέλο εξάγονται χαρακτηριστικά του μετώπου της πυρκαγιάς όπως η επιτάχυνση σε έδαφος με άνω κλίση, επιβράδυνση σε έδαφος με κάτω κλίση και η κορύφωση (η φωτιά γίνεται επικόρυφος) του σε υψηλούς ανέμους[60].

Κατά τη φυσική εξήγηση του μοντέλου, ο σκοπός είναι να εξηγηθεί η μέση συμπεριφορά των αερίων και των καυσίμων. Παραδείγματος χάρη, ο ακριβής τοπικός άνεμος σε μια συγκεκριμένη δομή καυσίμου αναπαριστάται από ένα σύνολο συσχετισμένων ποσοτήτων στο μοντέλο. Οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες είναι γνωστές ως ένα σύνολο μέσων ποσοτήτων (μέση ποσότητα καυσίμου ανά μονάδα όγκου αντί για ακριβής τοποθέτηση δέντρων και μέσες ταχύτητες ανέμων αντί για στιγμιαίες τοπικές ταχύτητες. Ο ελάχιστος όγκος, που μπορούν να καταχωρηθούν μέσες ιδιότητες σε σχέση με γειτονικούς αντίστοιχους όγκους ονομάζεται κατά το σχηματισμό του μοντέλου “τελικός όγκος”(resolved volume). Κατά την εφαρμογή σε πεπερασμένη διαφορική μορφή χρησιμοποιείται η πεπερασμένη διαφορά των κυψελών ως τελικός όγκος. Δύο ειδών αναπαραστάσεις των διασπορών και συμπεριφορών των αερίων και στερεών θα χρησιμοποιούνται στο μοντέλο, η πρώτη τα διασπείρει ομοιόμορφα σε ένα τελικό όγκο και η δεύτερη τα τοποθετεί ως ξεχωριστούς θύλακες. Στη πραγματικότητα υπάρχει συνδυασμός των δύο και όχι μεμονωμένη εφαρμογή του καθενός αλλά χρησιμοποιούνται ως δύο ακραίες μορφές του μοντέλου όσο αυτό σχηματίζεται.[60]

Η πρώτη αναπαράσταση ονομάζεται “επικαλυπτόμενη” (smeared) και προσδίδει έναν απλοποιημένο τρόπο να εκτιμηθούν οι ποσότητες των αερίων και των διαφόρων καυσίμων που υπάρχουν σε έναν όγκο. Η επικαλυπτόμενη μάζα ανά μονάδα όγκου μιας ουσίας εκφράζεται ως $\hat{\rho}$ και γενικά αυτή η έκφραση είναι η συνολική μάζα ανά μονάδα τελικού όγκου και στις δύο αναπαραστάσεις. Για τα αέρια υπολογίζεται αυτή η επικαλυπτόμενη πυκνότητα από την εξίσωση[60].

$$\alpha_d p = (\gamma_d - 1) \hat{\rho}_d c_{v,d} T \quad (1)$$

όπου

d είναι ο δείκτης κάθε είδους αερίου όπως οξυγόνο, άζωτο κλπ

p είναι η πίεση

α είναι το κλάσμα του όγκου

c_p, c_v είναι οι ειδικές θερμότητες και

T είναι η θερμοκρασία του αερίου(θεωρείται ίδια για όλα τα είδη αερίου στον τελικό όγκο)

και
$$\gamma_d = \frac{c_{p,d}}{c_{v,d}} \quad (2)$$

Η δεύτερη αναπαράσταση αναφέρεται ως “διαμερισματοποιημένη” όπου ο τελικός όγκος αποτελείται από πολλούς θύλακες αερίων η στερεών ειδών και κάθε θύλακας περιέχει μόνο ένα είδος. Μεταξύ των θυλάκων αερίων δεν υπάρχει διαφορά πίεσης διότι η ονομαστική πίεση αναπτύσσεται με τη ταχύτητα του ήχου και όλες η ροές είναι υποηχητικές. Η μάζα μιας ουσίας ανα μονάδα όγκου σε ένα θύλακα εκφράζεται ως ρ . Για στερεά και υγρά είδη αυτή είναι η μικροσκοπική πυκνότητα του υλικού[60]. Για κάθε μεμονωμένο θύλακα αερίου

χρησιμοποιείται η σχέση
$$p = (\gamma_d - 1)\rho_d c_{v,d} T$$

και είτε οι θύλακες περιέχουν στερεά η αέρια, η πυκνότητα κάθε είδους συνδέεται στην διαμερισματοποιημένη αναπαράσταση με την πυκνότητα στην επικαλυπτόμενη στον τελικό όγκο με τη σχέση

$$\hat{\rho}_d = \alpha_d \rho_d \quad (3)$$

όπου το α_d είναι το κλάσμα όγκου των θυλάκων που περιέχουν την ουσία d .

Έτσι η ποσότητα $\hat{\rho}_d$ περιέχει τη ποσότητα της μάζας σε ένα συνολικό όγκο αλλά δεν δίνει τη πυκνότητα ενός συγκεκριμένου σημείου και είναι χρήσιμη για το σχηματισμό των εξισώσεων αερίων[60].

Σκοπός είναι να χαρακτηριστεί η πιο πιθανή συμπεριφορά των φωτιών απο ένα σετ μέσω συνθηκών. Οι συνθήκες έχουν λίγες λεπτομέρειες και μπορούν να χαρακτηρίσουν άπειρο αριθμό πραγματικών φωτιών. Για τις ταχύτητες αντιδράσεων χρησιμοποιείται η διαμερισματοποιημένη αναπαράσταση και οι χημικές αντιδράσεις θεωρούνται στιγμιαίες με τη ταχύτητα τους να εξαρτάται μόνο από τις ταχύτητες ανάμιξης[60].

Για την αναπαράσταση των αρχών της Φυσικής στις πυρκαγιές χρησιμοποιούνται τριών ειδών σκέλη μεγέθους A, B, C. Το μέγεθος A είναι το μεγαλύτερο για τη δομή των καυσίμων όπως ένα δάσος και μια καλή εκτίμηση για το μέγεθος A είναι η απόσταση μεταξύ των δέντρων. Αντίστοιχα τα μεγέθη B και C είναι μικρότερα όπου για το B είναι η απόσταση από κλαδί σε κλαδί και C είναι οι μικρότερες της τάξεως όπως απόσταση φύλλων και μικρότερων σωμάτων. Αυτά τα μεγέθη είναι σημαντικά κατα το σχηματισμό του μοντέλου λόγω ανομοιομορφίας σε κάποια μεγέθη που δεν επηρεάζουν τα άλλα. Θεωρείται ομοιομορφία σε θύλακες σε μεγέθη μικρότερα της B κατηγορίας όπου τα χαρακτηριστικά ανάμιξης συμβαίνουν σε μεγέθη τάξεως C. Επιπλέον, δίδεται μια συγκεκριμένη κρίσιμη θερμοκρασία σε κάθε αντίδραση όπου σηματοδοτεί το σημείο όπου υπάρχει αρκετή θερμότητα για να πραγματοποιηθεί η αντίδραση. Όταν μια ουσία αναφλέγεται θεωρείται ότι συνεχίζει έως ότου όσο τα αντιδρώντα είναι σε επαφή ή η κρίσιμη θερμοκρασία γίνει χαμηλότερη, αυτή η υπόθεση είναι απλοποίηση της πραγματικής διεργασίας αλλά χρησιμοποιείται για μια ακριβή υπόθεση της αρχής των αντιδράσεων. Επιπλέον, χρησιμοποιείται μια συνάρτηση κατανομής πιθανότητας για να εκφραστεί η κατανομή θερμοκρασίας σε έναν όγκο και με αυτό το τρόπο αναπαριστάται ότι κάποια σημεία του όγκου είναι υψηλότερα της κρίσιμης θερμοκρασίας[60].

Στο σχηματισμό του μοντέλου για τα καύσιμα χρησιμοποιείται ο όρος ενός μέσου καυσίμου και η χρήση πολλαπλών είναι μια εύκολη επέκταση. Κατα τη θεώρηση του καυσίμου σε έναν τελικό όγκο ορίζονται παράμετροι όπως η πυκνότητα και το κλάσμα όγκου. Το κλάσμα

όγκου είναι ο όγκος του καυσίμου προς τον τελικό όγκο στο οποίο το καύσιμο βρίσκεται. Δεν αναφλέγεται όλο το καύσιμο κατά τη καύση και για αυτό ορίζεται η αρχική μάζα που είναι διαθέσιμη προς μονάδα όγκου ως A [60]. Για τη διαθέσιμη ρητίνη είναι A_p και για το ξύλο A_w όπου $A = A_p + A_w$ κάθε καύσιμο έχει συγκεκριμένο λόγο ρητίνης προς συνολική μάζα καυσίμου, φ .

$$\varphi = \frac{\hat{\rho}_p}{\hat{\rho}} \quad (4)$$

Θερμότητα εισάγεται στο καύσιμο κοντά στην επιφάνεια και θεωρείται ότι αυξάνει τη θερμοκρασία χωρίς χημική αλλαγή μέχρι να φτάσει μια κρίσιμη. Επιπλέον, θεωρείται ότι το καύσιμο περιέχει ξύλο, ρητίνη και νερό[60].

Αρχή Διατήρησης Μάζας

Για τη περιγραφή της καύσης του ξύλου χρησιμοποιείται η εξίσωση (5)

$$N_{w(w)}(wood) + heat \rightarrow N_{h(w)}(hydrocarbons) + N_{n(w)}(inerts) + N_{c(w)}(char) + N_{H_2O(w)} \quad (5)$$

όπου $N_{d(w)}$ είναι ο λόγος της μάζας του κάθε αντιδρώντος ή προϊόντος d (wood, hydrocarbons, inerts, char, h₂o) προς τη συνολική μάζα των συνολικών προϊόντων. Οι δείκτες στις παρενθέσεις δηλώνουν το είδος που αφορά αυτή η αντίδραση π.χ w είναι η αντίδραση για το ξύλο. Οι ασταθείς οργανικές ύλες μεταφέρονται μέσω του αέρα και καίγονται σε μορφή αερίου ενώ το στερεό κάρβουνο μένει μετά την αρχική πυρόλυση και οξειδώνεται αν η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή και εκφράζεται με την εξίσωση (6)

$$N_{c(c)}(char) + N_{o(c)}(oxygen) \rightarrow N_{n(c)}(inerts) + heat \quad (6)$$

όπου $N_{c(c)} = .3$, $N_{o(c)} = .7$, $N_{n(c)} = 1$

Με τη χρήση των παραπάνω εξισώσεων μπορούμε να γράψουμε τις εξισώσεις διατήρησης των ειδών και εξισώσεις μεταφοράς για όλες τις ποσότητες καυσίμου και διαθέσιμου καυσίμου σε έναν τελικό όγκο. Επειδή το καύσιμο θεωρείται ότι δεν μεταγίγει(οριζόντια μεταφορά σωματιδίων) οι εξισώσεις συνέχειας γράφονται ως

$$\frac{\partial \hat{\rho}_w}{\partial t} = - F_{(w)} N_{w(w)} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \hat{A}_w}{\partial t} = - F_{(w)} N_{w(w)} + F_{(Aw)} N_{w(w)} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \hat{\rho}_c}{\partial t} = F_{(w)} N_{c(w)} - F_{(c)} N_{c(c)} \quad (9)$$

Οι όροι $F_{(w)}$ και $F_{(c)}$ είναι οι ρυθμοί αποαεροποίησης του ξύλου (αφαίρεση των ασταθών ενώσεων από υδρογονάνθρακες) και της αντίδρασης του κάρβουνου και οξυγόνου με μονάδες μάζα/όγκο/χρόνο.

Ο όρος $-F_{(w)}N_{w(w)}$ της εξίσωσης αναπαριστά τη καταβόθρα για τη συνολική ποσότητα του ξύλου ανα μονάδα όγκου ανα μονάδα χρόνου και

ο όρος $-F_{(w)}N_{w(w)}$ στην εξίσωση (8) αναπαριστά τη καταβόθρα του διαθέσιμου ξύλου ανα μονάδα όγκου ανα μονάδα χρόνου. Σε αυτές τις εξισώσεις που βρίσκονται σε όγκο τάξεως Β, όλες οι ανομοιογένειες χαρακτηρίζονται σε μικρο-μεγέθη καύσιμα και κλάσματα όγκου. Ο έμμεσος σχηματισμός σε μέσους όρους που γίνεται για αυτές τις εξισώσεις περιγράφεται ως μέσος όρος θυλάκων.

Ο όρος $F_{(Aw)}N_{w(w)}$ εκφράζει εμφάνιση νέου ξύλου. Η εξίσωση (8) σχεδιάστηκε ώστε να μην υπάρχει περισσότερο διαθέσιμο ξύλο από το συνολικό και θα μπορούσε να τροποποιηθεί ώστε να αλλάζει ο ρυθμός που είναι διαθέσιμο καύσιμο.

Ο όρος $F_{(w)}N_{c(w)}$ της εξίσωσης (9) αναπαριστά τη πηγή του κάρβουνου στη πυρόλυση και ο όρος $-F_{(c)}N_{c(c)}$ την οξείωση του κάρβουνου που παράγει διοξείδιο του άνθρακα με την υπόθεση ότι όλο το κάρβουνο είναι διαθέσιμο να αντιδράσει.[60]

Ο σκοπός είναι η περιγραφή της πιο πιθανής συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς σε ένα περιβάλλον με τις μέσες προδιαγεγραμμένες συνθήκες καυσίμου. Υπάρχουν άπειρες διατάξεις καυσίμου με ίδια μέση ποσότητα καυσίμου σε μεγάλα μεγέθη και για να εκφραστούν διαφορετικές πραγματοποιήσεις στα σύνολα διατάξεων γίνεται ένα μέσο των πιθανών διαμορφώσεων θυλάκων στον ίδιο τελικό όγκο. Πραγματοποιείται αποσύνθεση Reynolds(μια στιγμιαία ποσότητα αποσυντίθεται σε όρους χρονικά μέσους και διακυμανόμενους) στο τελικό όγκο,[60]

$$\hat{\rho}_w = \overline{\hat{\rho}_w} + \hat{\rho}'_w \quad (10)$$

$$\hat{A}_w = \overline{\hat{A}_w} + \hat{A}'_w \quad (11)$$

$$\hat{\rho}_c = \overline{\hat{\rho}_c} + \hat{\rho}'_c \quad (12)$$

Η παύλα δείχνει το συνολικό μέσο σε πολλές πραγματοποιήσεις(MRA) και οι τονούμενες είναι οι διακυμάνσεις από το μέσο και εν τέλη οι εξισώσεις (7),(8),(9) γράφονται,

$$\frac{\partial(\overline{\hat{\rho}_w} + \hat{\rho}'_w)}{\partial t} = -F_{(w)}N_{w(w)} \quad (13)$$

$$\frac{\partial(\overline{\hat{A}_w} + \hat{A}'_w)}{\partial t} = -F_{(w)}N_{w(w)} + F_{(Aw)} \quad (14)$$

$$\frac{\partial(\overline{\hat{\rho}_c} + \hat{\rho}'_c)}{\partial t} = F_{(w)}N_{c(w)} - F_{(c)}N_{c(c)} \quad (15)$$

οι διακυμάνσεις είναι οι συγκεκριμένες τοποθεσίες των δέντρων, κλαδιών και φύλλων και δεν μας ενδιαφέρουν σαν ποσότητες που προσπαθεί το μοντέλο να λύσει στις μέσες τιμές

των θυλάκων ή στο MRA. Αλλα στη συνολική μέση κατανομή καυσίμου του διαθέσιμου και συνολικού καυσίμου σε πολλές πραγματοποιήσεις.[60] Από τους παρακάτω κανόνες αποδεικνύεται το συνολικό μέσο ολόκληρων εξισώσεων

$$\overline{\overline{a}} = \overline{a} \quad (16)$$

$$\overline{\overline{a'}} = 0 \quad (17)$$

$$\overline{\overline{ab'}} = \overline{\overline{ab'}} = 0 \quad (18)$$

$$\overline{\overline{ab}} = \overline{(\overline{a} + \overline{a'})(\overline{b} + \overline{b'})} = \overline{\overline{ab}} + \overline{\overline{a'b}} + \overline{\overline{a} + \overline{b'}} + \overline{\overline{a'b'}} = \overline{\overline{ab}} + \overline{\overline{a'b'}} \quad (19)$$

και οι εξισώσεις (13)-(15) γίνονται

$$\frac{\partial(\overline{\widehat{\rho_w}})}{\partial t} = - \overline{F_{(w)}} N_{w(w)} \quad (20)$$

$$\frac{\partial(\overline{\widehat{A_w}})}{\partial t} = - \overline{F_{(w)}} N_{w(w)} + \overline{F_{(Aw)}} \quad (21)$$

$$\frac{\partial(\overline{\widehat{\rho_c}})}{\partial t} = \overline{F_{(w)}} N_{c(w)} - \overline{F_{(c)}} N_{c(c)} \quad (22)$$

ομοίως για τη ρητίνη γράφονται οι εξισώσεις διατήρησης και θεωρείται ότι όταν θερμαίνεται η ρητίνη πάνω από ένα σημείο εξατμίζεται στη μορφή ασταθών υδρογονανθράκων

$$\frac{\partial(\overline{\widehat{\rho_p}})}{\partial t} = - \overline{F_{(p)}} \quad (23)$$

$$\frac{\partial(\overline{\widehat{A_p}})}{\partial t} = - \overline{F_{(p)}} + \overline{F_{(Ap)}} \quad (24)$$

$F_{(p)}$ είναι ο ρυθμός εξάτμισης της ρητίνης και είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και της θερμοροής προς το υλικό και οι συντελεστές N_p είναι ένα γιατί υπάρχει μόνο ένα αντιδρών. Ο όρος πηγής στην εξίσωση διαθέσιμης ρητίνης (24) είναι εξαρτώμενος του υλικού και της θερμοκρασίας.[60]

Όσον αφορά την υγρασία του καυσίμου θεωρείται είτε ότι είναι ολή στην επιφάνεια του η διασπαρμένη σε όλη την έκταση του καυσίμου. Για οποιαδήποτε από τις δυο αναπαραστάσεις ο ρυθμός εξάτμισης του νερού, $\overline{F_{(h20)}}$, περιγράφεται από τις εξισώσεις.

$$\frac{\partial(\overline{\widehat{\rho_{water}}})}{\partial t} = - \overline{F_{(h20)}} \quad (25)$$

$$\frac{\partial(\widehat{A}_{water})}{\partial t} = -\overline{F}_{(h20)} + \overline{F}_{(Ah20)} \quad (26)$$

$\overline{F}_{(Ah20)}$ είναι ο ρυθμός κατα τον οποίο το νερό είναι διαθέσιμο για εξάτμιση και με αυτούς τους όρους ποσοτικοποιείται η μέση ποσότητα νερού στο καύσιμο $\widehat{A}_{water}$ και πόση ενέργεια απαιτείται για την εξάτμιση του νερού.

Με την άθροιση των εξισώσεων διατήρησης όλων των ειδών ρητίνης, ξύλου, κάρβουνου και νερού για μια εξίσωση διατήρησης για όλο το στερεό καύσιμο δεδομένου ότι θεωρούμε όλα τα στερεά σε μια περιοχή έχουν την ίδια θερμοκρασία T_s . [60] Συνδυάζοντας όλες τις εξισώσεις για να εισαχθεί μια του συνολικού στερεού ως

$$\frac{\partial(\widehat{\rho}_s)}{\partial t} = -\overline{F}_{(w)} + \overline{F}_{(w)}N_{c(w)} - \overline{F}_{(c)}N_{c(c)} - \overline{F}_{(H2O)} \quad (27)$$

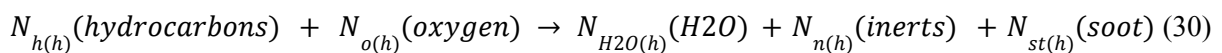
Για την ενέργεια του στερεού χρησιμοποιείται την εξίσωση

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\widehat{\rho}_s I_s)}{\partial t} = & q_{radiation from flame} + q_{radiation from fuel} + ha_v(T - T_s) \\ & + net energy source to solids \end{aligned} \quad (28)$$

Με την αφαίρεση της εξίσωσης διατήρησης ειδών για τη συνολική μάζα του στερεού ανα όγκο υπολογίζεται μια μαζικά σταθμισμένη ειδική θερμότητα του συνολικού στερεού

$$\begin{aligned} \widehat{\rho}_s \frac{\partial(I_s)}{\partial t} = & q_{radiation from flame} + q_{radiation from fuel} + ha_v(T_g - T_s) \\ & + net energy source to solids - I_s (net mass source to solids) \end{aligned} \quad (29)$$

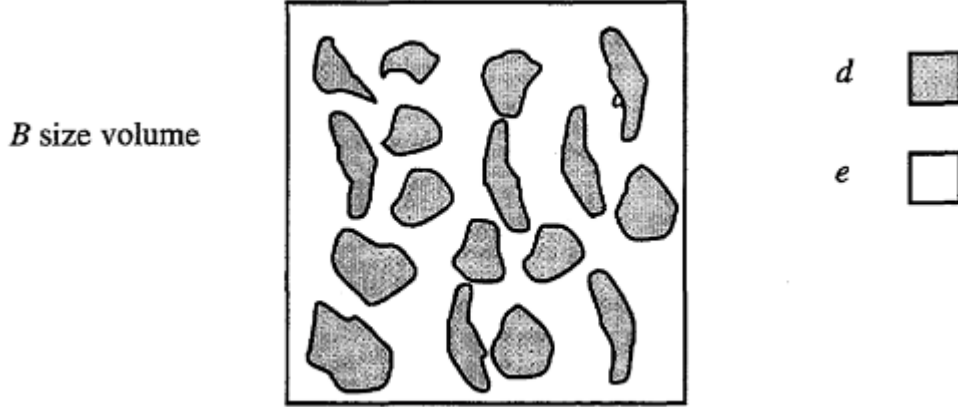
Σε επόμενο βήμα σχηματίζονται οι εξισώσεις για τα αέρια. Για τη διατήρηση της μάζας, στη καύση του ξύλου απελευθερώνονται αδρανή (inert) και ασταθή (volatile) αέρια και αναμυγνούνται στην ατμόσφαιρα. Επειδή οι ασταθής υδρογονάνθρακες είναι πιθανό να καούν, χωρίζεται ο αέρας σε δύο είδη, το αδρανές είδος και το οξυγόνο (που συμμετέχει στη καύση) [60]. Η χημική αντίδραση της καύσης των υδρογονανθράκων αναπαρίσταται ως



και με τιμές $N_{H2O(h)} = 0.1$, $N_{n(h)} = 0.65$, $N_{st(h)} = 0.25$, $N_{o(h)} = 0.49$, $N_{h(h)} = 0.51$ που δίνονται από τον melaaen στο μοντέλο πυρόλυσης του Glaister [62]. Θεωρείται ότι τα δυο είδη υπάρχουν σε θύλακες σε έναν τελικό όγκο και ο όγκος αναφοράς είναι τάξεως B και τα είδη σε τάξεως C. Οι θύλακες αριθμούνται από 1 έως l_d του είδους d και το κλάσμα όγκου του θύλακα l του είδους d είναι

$$\alpha_{d,l} \equiv \frac{V_{d,l}}{V} \quad (31)$$

όπου το V ο όγκος αναφοράς τάξεως B και το κλάσμα όγκου για κάθε είδος σε αυτο τον όγκο είναι το άθροισμα όλων των θυλάκων[60].(Εικόνα.4.8)



Εικόνα.4.8. Αναπαράσταση της διαμερισματοποίησης

Από: Linn, R. *A Transport Model for Prediction of Wildfire Behavior*; Los Alamos National Lab.: Los Alamos, NM, USA, 1997.

$$\alpha_{d,l} \equiv \frac{1}{V} \sum_{i=1}^{l_d} V_{d,l} \equiv \sum_{i=1}^{l_d} a_{d,l} \quad (32)$$

και δίνεται η δυνατότητα να οριστεί ένα μέσο θύλακος για μια αυθαίρετη ποσότητα q σε σχέση με είδος d

$$\langle q_d \rangle \equiv \frac{\sum_{i=1}^{l_d} q_{d,l}}{l_d} = \frac{\sum_{i=1}^{l_d} a_{d,l} \sum_{i=1}^{l_d} q_d}{l_d} = \frac{\langle a_d \rangle \sum_{i=1}^{l_d} q_d}{a_d} \quad (33)$$

και ορίζεται μια ροή κλάσμα όγκου είδος d

$$\frac{1}{V} \sum_{i=1}^{l_d} V_{d,l} u_{i,d,l} = \sum_{i=1}^{l_d} a_{d,l} u_{i,d,l} \equiv a_d \langle u_{d,l} \rangle \quad (34)$$

όπου $\langle u_{d,l} \rangle$ είναι η καθαρή ογκομετρική μαζικά σταθμισμένη ταχύτητα του είδους d σε έναν όγκο τάξεως B . Έπειτα χωρίζονται οι ποσότητες σε μέσα και κυμαινόμενα μέρη όπως στις προηγούμενες εξισώσεις, εκφράζεται αυτή η ταχύτητα ενός θύλακα ως η μέση ταχύτητα όλων των θυλάκων συν μια διακύμανση. Το άθροισμα όλων των διακυμάνσεων είναι μηδέν.

$$u_{i,d,l} = \langle u_{i,d} \rangle + u'_{i,d,l} \quad (35)$$

$$\rho_{d,l} = \langle \rho_d \rangle + \rho'_{d,l} \quad (36)$$

$$\alpha_{d,l} = \langle \alpha_d \rangle + \alpha'_{d,l} \quad (37)$$

Οι διακυμάνσεις της πυκνότητας είναι συσχετισμένες με τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας λόγω της σταθερότητας της πίεσης σε ροή με χαμηλό αριθμό mach. Η ποσότητα $\hat{\rho}_d$ χρησιμοποιείται με τον ίδιο τρόπο όπως και στις εξισώσεις των καυσίμων (μάζα διαιρεμένη σε ένα μακροσκελή όγκο V) και συνδέεται με τις μακροσκελείς πυκνότητες κάθε θύλακα ως

$$\hat{\rho}_d = \sum_{i=1}^{l_d} \rho_{d,l} \alpha_{d,l} \equiv a_d \langle \rho_d \rangle \quad (38)$$

και οι σχέσεις για a_d , $a_{d,l}$, $\langle \alpha_d \rangle$ είναι

$$a_d \equiv \sum_{i=1}^{l_d} \alpha_{d,l} = \sum_{i=1}^{l_d} \langle \alpha_d \rangle \equiv l_d \langle \alpha_d \rangle \quad (39)$$

συμπεραίνεται μια μαζικά σταθμισμένη ταχύτητα $\bar{u}_{i,d}$ για το κάθε θύλακα ως

$$\sum_{i=1}^{l_d} \rho_{d,l} \alpha_{d,l} u_{i,d} \equiv \hat{\rho}_d \bar{u}_{i,d} \quad (40)$$

Αν η πυκνότητα είδους d είναι ανεξάρτητη του l τότε $\bar{u}_{i,d} = \langle u_{i,d} \rangle$. Εάν η διαφορά θερμοκρασίας από ένα θύλακα σε ένα άλλο είναι σημαντική τότε απαιτείται ανάλυση της θερμοκρασίας βάση μιας συνάρτησης κατανομής πιθανότητας σε βάρος περισσότερης πολυπλοκότητας.

Έπειτα η εξίσωση μεταφοράς για οποιοδήποτε είδος d βάση των μέσων τιμών του θύλακα

$$\frac{\partial(\hat{\rho}_d)}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{\rho}_d \bar{u}_{i,d})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\sigma_m \frac{\partial(\hat{\rho}_d / \hat{\rho})}{\partial x_i} \right] + (\text{net species sources } d) \quad (41)$$

όπου το σ_m είναι συντελεστής μοριακής διάχυσης

Επιπλέον θεωρείται ότι η διαφορά ταχυτήτων μεταξύ των ειδών και του υπόλοιπου συνολικού αερίου οφείλεται σε τυχαίες κινήσεις των θυλάκων διαφόρων ειδών λόγω τύρβων διακυμάνσεων σε τάξη μεγέθους C και συνδέεται η ταχύτητα ενός είδους με τη συνδυαστική ταχύτητα των αερίων μέσω

$$\bar{u}_{i,d} = \bar{u}_i + \delta \bar{u}_{i,d} \quad (42)$$

όπου $\bar{u}_i$ είναι η μαζικά σταθμισμένη ταχύτητα των συνδυαστικών αερίων

Με επιπλέον ανάλυση σε απλό παράδειγμα διαχυτικής ροής που λόγω συντομίας θα παραληφθεί, ο ερευνητής στο μοντέλο συσχετίζει τη μαζική ροή ανα μονάδα όγκου ενός είδους d σε σχέση με τη μαζικά σταθμισμένη ταχύτητα των συνδυασμένων αερίων ως

$$\hat{\rho}_d \delta \bar{u}_{i,d} = C s_c \sqrt{K} \hat{\rho} \frac{\partial(\hat{\rho}_d / \hat{\rho})}{\partial x_j} \quad (43)$$

Με άλλα λόγια η αποτελεσματική ταχύτητα για κάθε είδος σχετικά με το συνολική $\bar{u}_i$ αναπαριστάται απο διαχυτική ροή. Ο διαχυτικός συντελεστής του μοντέλου $\sigma_{c,i,j}$ θεωρείται ανάλογος στον $s_c \sqrt{K}$ και η εξίσωση (42) γίνεται

$$\bar{u}_{i,d} = \bar{u}_i - \frac{\sigma_{c,i,j}}{\rho_d} \frac{\partial(\hat{\rho}_d/\hat{\rho})}{\partial x_j} \quad (44)$$

Αντικαθιστώντας την (44) στην (41)

$$\frac{\partial(\hat{\rho}_d)}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{\rho}_d \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} [(\sigma_{c,i,j} + \delta_{i,j} \sigma_m) \frac{\partial(\hat{\rho}_d/\hat{\rho})}{\partial x_i}] \quad (45)$$

+ (*net species sources d*)

Χωρίζοντας τις υπόλοιπες μεταβλητές για μια πραγματοποίηση σε μέσα και κυμαινόμενα μέρη. Οι μέσες αναπαριστώνται με παύλα και οι κυμαινόμενες με τόνο. Οι μέσες αναπαριστούν ένα μέσο σε ένα σύνολο πραγματοποιήσεων και οι κυμαινόμενες τις διαφορές μεταξύ του μέσου ενός θύλακα για μια πραγματοποίηση και τις μέσες τιμές.

$$\hat{\rho}_d = \overline{\hat{\rho}_d} + \hat{\rho}'_d \quad (46)$$

$$\bar{u}_i = \overline{\bar{u}_i} + \bar{u}'_i \quad (47)$$

$$\bar{u}_i = \overline{\bar{u}_i} + \bar{u}''_i \quad (48)$$

$$\bar{u}_{id} = \overline{\bar{u}_i} + \delta \bar{u}_{i,d} \quad (49)$$

$$\overline{\hat{\rho}_d \bar{u}_i} = \overline{\hat{\rho}_d} \overline{\bar{u}_i} \quad (50)$$

Εισάγοντας το μέσο πολλών πραγματοποιήσεων (MRA) στην γενική εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial(\overline{\hat{\rho}_d})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{\hat{\rho}_d \bar{u}_i})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} [(\sigma_{c,i,j} + \delta_{i,j} \sigma_m) \frac{\partial(\overline{\hat{\rho}_d/\hat{\rho}})}{\partial x_i}] + \overline{(\text{net species sources } d)} \quad (51)$$

Αμελούνται οι διακυμάνσεις του συντελεστή $\sigma_{c,i,j}$ και με ανάπτυξη των παραπάνω εξισώσεων στην (51)

$$\frac{\partial(\overline{\hat{\rho}_d})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{\hat{\rho}_d \bar{u}_i} + \overline{\hat{\rho}'_d \bar{u}'_i})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} [(\sigma_{c,i,j} + \delta_{i,j} \sigma_m) \frac{\partial(\overline{\hat{\rho}_d/\hat{\rho}})}{\partial x_i}] + \overline{(\text{net species sources } d)} \quad (52)$$

Για την μοντελοποίηση της συσχέτισης $\overline{\hat{\rho}'_d \bar{u}'_i}$ χρησιμοποιείται μια εκτίμηση δεδομένης ροής

εισάγοντας έναν επιπλέον διαχυτικό συντελεστή $\sigma_{b,ij}$ και τελικά

$$\frac{\partial(\widehat{\rho_d})}{\partial t} + \frac{\partial(\widehat{\rho_d} \overline{u_i})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} [(\sigma_{c,ij} + \sigma_{b,ij} + \delta_{ij} \sigma_m) \frac{\partial(\widehat{\rho_d}/\widehat{\rho})}{\partial x_i}] + \overline{(net\ species\ sources\ d)} \quad (53)$$

Ο όρος $\widehat{\rho_d}/\widehat{\rho}$ μοντελοποιείται ως

$$\overline{\widehat{\rho_d}/\widehat{\rho}} = \widehat{\rho_d}/\widehat{\rho} \quad (54)$$

με την υπόθεση ότι σε μια θερμή περιοχή αερίων, η θερμοκρασία των ειδών και των συνολικών αερίων θα αυξάνονται με την ίδια τάξη μεγέθους. Για απλοποίηση αμελείται η συσχέτιση των διακυμάνσεων της πυκνότητας του είδους d με τις διακυμάνσεις των συνολικών αερίων[60].

Σύμφωνα με τις στοιχειομετρικές εξισώσεις των χημικών αντιδράσεων και γραφόντας των ειδών που αναλύθηκαν σε αυτές τις παραπάνω εξισώσεις μεταφοράς, όπου n,h,o,st, h2O τα αδρανή, οι υδρογονάνθρακες, οξυγόνο, αιθάλη και νερό

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\widehat{\rho_n})}{\partial t} + \frac{\partial(\widehat{\rho_n} \overline{u_i})}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} [(\sigma_{c,ij} + \sigma_{b,ij} + \delta_{ij} \sigma_m) \frac{\partial(\widehat{\rho_n}/\widehat{\rho})}{\partial x_i}] \\ &+ \overline{(net\ species\ sources\ n)} \end{aligned} \quad (55)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\widehat{\rho_h})}{\partial t} + \frac{\partial(\widehat{\rho_h} \overline{u_i})}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} [(\sigma_{c,ij} + \sigma_{b,ij} + \delta_{ij} \sigma_m) \frac{\partial(\widehat{\rho_h}/\widehat{\rho})}{\partial x_i}] \\ &+ \overline{(net\ species\ sources\ h)} \end{aligned} \quad (56)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\widehat{\rho_o})}{\partial t} + \frac{\partial(\widehat{\rho_o} \overline{u_i})}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} [(\sigma_{c,ij} + \sigma_{b,ij} + \delta_{ij} \sigma_m) \frac{\partial(\widehat{\rho_o}/\widehat{\rho})}{\partial x_i}] \\ &+ \overline{(net\ species\ sources\ o)} \end{aligned} \quad (57)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\widehat{\rho_{st}})}{\partial t} + \frac{\partial(\widehat{\rho_{st}} \overline{u_i})}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} [(\sigma_{c,ij} + \sigma_{b,ij} + \delta_{ij} \sigma_m) \frac{\partial(\widehat{\rho_{st}}/\widehat{\rho})}{\partial x_i}] \\ &+ \overline{(net\ species\ sources\ st)} \end{aligned} \quad (58)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\widehat{\rho_{H20}})}{\partial t} + \frac{\partial(\widehat{\rho_{H20}} \overline{u_i})}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} [(\sigma_{c,ij} + \sigma_{b,ij} + \delta_{ij} \sigma_m) \frac{\partial(\widehat{\rho_{H20}}/\widehat{\rho})}{\partial x_i}] \\ &+ \overline{(net\ species\ sources\ H20)} \end{aligned} \quad (59)$$

Αυτό το σετ εξισώσεων αναπαριστά τις επιδράσεις των κινήσεων των ειδών σε μικρή και μεγάλη κλίμακα.

Με την άθροιση όλων των εξισώσεων των ειδών παράγεται μια εξίσωση διατήρησης μάζας

$$\frac{\partial(\widehat{\rho})}{\partial t} + \frac{\partial(\widehat{\rho} \overline{u_i})}{\partial x_i} = \overline{(net\ gas\ sources)} \quad (60)$$

Εφόσον οι διαχυτικοί όροι στις εξισώσεις των ειδών (n, h, o, st, h₂O) περιγράφουν κίνηση σε σχέση με το συνολικό αέριο τότε το άθροισμα των διαχυτικών όρων των ειδών είναι μηδεν.

Αρχή Διατήρηση Ορμής

Όσον αφορά την αρχή διατήρησης ορμής των συνολικών αερίων για μια πραγματοποίηση περιγράφεται από την εξίσωση,

$$\frac{\partial(\widehat{u_i} \widehat{\rho})}{\partial t} + \frac{\partial(\widehat{\rho} \overline{u_i u_j})}{\partial x_j} = - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \widehat{\rho} g_i - D \widehat{\rho} \overline{u_i} \quad (61)$$

Ο όρος $D \widehat{\rho} \overline{u_i}$ είναι η οπισθέλκουσα λόγω βλάστης που εμποδίζει τη ροή και εξαρτάται από το καύσιμο και γίνεται μηδέν σε περιοχές με μηδενικό καύσιμο [60]. Η εξίσωση σε ένα μέσο πολλαπλών πραγματοποιήσεων (MRA) για ένα συνολικό μέσο στου αερίου σε ένα όγκο τάξεως B γίνεται

$$\frac{\partial(\overline{\widehat{u_i} \widehat{\rho}})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{\widehat{\rho} \overline{u_i u_j}})}{\partial x_j} = - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \overline{\widehat{\rho} g_i} - D \overline{\widehat{\rho} \overline{u_i}} \quad (62)$$

με όμοιο τρόπο όπως προηγουμένως αποδεικνύεται ότι

$$\overline{\widehat{\rho} \overline{u_i u_j}} = \overline{\widehat{\rho} \overline{u_i} \overline{u_j}} + \overline{\widehat{\rho} \overline{u''_i u''_j}} \quad (63)$$

όπου οι όροι με τους διπλούς τόνους δείχνουν διακυμάνσεις από τη σταθμισμένη μέση ταχύτητα και ο όρος $\overline{\widehat{\rho} \overline{u''_i u''_j}}$ αναπαρίσταται ως ένας τανυστής τάσης Reynolds, R_{ij} και οι εξίσωση (62) γίνεται

$$\frac{\partial(\overline{\widehat{u_i} \widehat{\rho}})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{\widehat{\rho} \overline{u_i u_j} + R_{ij}})}{\partial x_j} = - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \overline{\widehat{\rho} g_i} - D \overline{\widehat{\rho} \overline{u_i}} \quad (64)$$

Για μια πρώτη εκτίμηση της οπισθέλκουσας, θεωρείται μια μέση οπισθέλκουσα δύναμη ενός στοιχείου καυσίμου είναι παρόμοια με μια σφαίρα

$$F = - 0.5 A_{sc} C_D \rho |u| u \quad (65)$$

όπου A_{sc} είναι η κάθετη επιφάνεια στη ροή, C_D ο συντελεστής οπισθέλκουσας, ρ η πυκνότητα του ρέοντος ρευστού, u η τοπική ταχύτητα [60]. Ο συνολικός αριθμός σφαιρών N ανα μονάδα όγκου ενδείκνυται από το ογκομετρικό κλάσμα α_s

$$\alpha_s = N(4\pi r^3/3) \quad (66)$$

και η δύναμη ανα μονάδα όγκου που ασκείται στα σώματα είναι

$$\frac{\text{Δύναμη}}{\text{Όγκο}} = -0.5 A_{sc} C_D \rho |\bar{u}| \bar{u} \frac{\alpha_s}{4\pi r^3/3} = - \frac{3\alpha_s}{8r} C_D \rho |\bar{u}| \bar{u} \quad (67)$$

Εάν θεωρήσουμε ότι r είναι στην ίδια τάξη μεγέθους για όλα τα στερεά ώστε να εκτιμηθεί ο συντελεστής οπισθέλκουσας και να γραφτεί

$$D = \frac{3\alpha_s}{8S_s} C_D |\bar{u}| \quad (68)$$

Αρχή Διατήρησης Ενέργειας

Αφού εφαρμόστηκαν οι αρχές διατήρησης της μάζας και ορμής, τελευταία έμεινε η αρχή διατήρησης ενέργειας. Αυτή η ενέργεια είναι αυτή που παράγεται από τις χημικές αντιδράσεις και μεταφέρεται με τη κίνηση στερεών, υγρών και αερίων. Στην ανάλυση της χωρίζεται σε εσωτερική ενέργεια του στερεού καυσίμου I_s , των συνολικών αερίων I και των ειδών των αερίων I_d . Ο ρυθμός αντίδρασης επηρεάζει το ρυθμό παραγωγής ενέργειας καθώς και τη παραγωγή ή κατανάλωση των ειδών παραπάνω (n, h, o, st, H₂O). Ενέργεια από τις αντιδράσεις με στερεά εμφανίζεται και στη στερεά αλλά και στην αέρια φάση. Χρησιμοποιούνται οι όροι $\theta_{s(l)}$ και $\theta_{g(l)}$ για να σημειωθεί το κλάσμα της συνολικής ενέργειας που παράγεται από αντίδραση l στη στερεά και αέρια φάση και περιορίζεται από $\theta_{s(l)} + \theta_{g(l)} = 1$ [60]. Για μια δεδομένη αντίδραση όπως η οξείδωση καρβουνού χωρίζεται η ενέργεια σε στερεά και αέρια από την εξίσωση και ο το μέγεθος είναι ενέργεια ανα μονάδα χρόνου,

$$\begin{aligned} (\text{Energy source}) &= (\text{Energy source to solid}) + (\text{Energy source to gas}) \\ &= \theta_s (\text{Energy source}) + \theta_g (\text{Energy source}) \end{aligned} \quad (69)$$

Οι εξισώσεις ενέργειας ξεκινούν για κάθε ξεχωριστό είδος σε έναν όγκο τάξεως B για μία πραγματοποιήσιμη. Θεωρείται ότι οι θερμοκρασίες των θυλάκων ενός είδος στον όγκο B είναι ίδιες και βοηθά στο σχηματισμό μέσω της έκφρασης

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\hat{\rho}_d I_d)}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{\rho}_d I_d \bar{u}_{d,i})}{\partial x_i} = & -p \left[\frac{\partial(a_d \bar{u}_{d,i})}{\partial x_i} + \frac{\partial(a_d)}{\partial t} \right] - q_d(\bar{x}, T_d) + (h a_s (T_s - T))_d \\ & + (\text{sources}_d) \end{aligned} \quad (70)$$

Ο όρος $\frac{\partial(\hat{\rho}_d I_d \bar{u}_{d,i})}{\partial x_i}$ είναι η κλίση της μεταγωγικής ροής της εσωτερικής ενέργειας (η κίνηση της ενέργειας λόγω κίνηση μάζας).

Ο όρος $-p \left[\frac{\partial(a_d \bar{u}_{d,i})}{\partial x_i} + \frac{\partial(a_d)}{\partial t} \right]$ είναι όρος έργου λόγω πίεσης

Ο όρος $q_d(\bar{x}, T_d)$ αναπαριστά την ενέργεια ανα μονάδα όγκου που μεταφέρεται από τα είδη στο περιβάλλον μέσω ακτινοβολίας.

Ο όρος $(h a_s (T_s - T))_d$ αφορά την συναγωγική μεταφορά θερμότητας όπου h είναι ο συντελεστής συναγωγής και a_s είναι η επιφάνεια επαφής ανα μονάδα όγκου μεταξύ αερίου και στερεού

Ο όρος $(sources)_d$ αναπαριστά τη θερμότητα που προσδίδεται στα είδη d λόγω χημικών αντιδράσεων

Ο συντελεστής h εκτιμάται από τη σχέση

$$h = .683 \frac{33.8 * 10^{-3} Re_{ss}^{.466}}{Ss} \quad (71)$$

Για την επιφάνεια επαφής ανα μονάδα όγκου a_s θεωρείται ότι τα στερεά (κλαδιά, κορμοί, φύλλα) έχουν ελάχιστη επαφή μεταξύ τους και η χρησιμοποιείται η παρακάτω ανάλυση. Θεωρείται το σχήμα ενός κυλινδρικού στερεού με ακτίνα r . Η συνολική επιφάνεια ανά μονάδα όγκου είναι ο αριθμός των στοιχείων επί την επιφάνεια ανα μονάδα όγκου για το κάθε στοιχείο.

$$a_s = n_e (2l\pi r) \quad (72)$$

όπου n_e ο αριθμός των στοιχείων ανά μονάδα όγκου

$$n_e = \frac{\alpha_{solid}}{\pi l r^2} = \frac{\hat{\rho}_s}{\pi l r^2 \rho_s} \quad (73)$$

με $\hat{\rho}_s$ και ρ_s τη μέση πυκνότητα θύλακος του στερεού και τη μικροσκοπική πυκνότητα αντίστοιχα και συνδυάζοντας τις δυο εξισώσεις

$$a_s = \frac{2 \hat{\rho}_s}{r \rho_s} \quad (74)$$

ο όρος $2/r$ αλλάζει ανάλογα με το σχήμα των στοιχείων, π.χ. $3/r$ για σφαίρα και $1/r$ για επίπεδες κυκλικές επιφάνειες.

Για την απλοποίηση του όρου του έργου πίεσης επικαλείται η εξίσωση των αερίων και δείχνει ότι οι όροι $\hat{\rho}_d I_d$ και $\hat{\rho} I$ δεν διαφέρουν με το χρόνο λόγω της υπόθεσης ότι η ονομαστική πίεση είναι σταθερή στο χρόνο για μεγέθη χώρου τάξεως B, συνεπώς

$$\hat{\rho}_d I_d (\gamma_d - 1) = p_d = a_d p \quad (75)$$

με χρήση της εξίσωσης (75) στον όρο έργου πίεσης και της εξίσωσης (70), η εξίσωση ενέργειας για ένα είδος d γίνεται

$$\frac{\partial(\hat{\rho}_d I_d)}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{\rho}_d I_d \bar{u}_{d,i})}{\partial x_i} = - \frac{1}{\gamma_d} (-q_d(\bar{x}, T_d) + (ha_s(T_s - T))_d) + (sources_d) \quad (76)$$

Ο όρος I_d χωρίζεται ως άθροισμα

$$I_d = I + \delta I_d \quad (77)$$

όπου I είναι η εσωτερική ενέργεια ανα μονάδα μάζας των συνολικών αερίων, Αθροίζοντας

το I_d σε όλα τα είδη τότε $\sum_{d \text{ all}} \delta I_d = 0$ και όταν αθροίζεται ο δεύτερος όρος από αριστερά όρος της (76) τότε

$$\sum_d \frac{\partial(\hat{\rho}_d I_d \bar{u}_{d,i})}{\partial x_i} = \sum_d \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\hat{\rho}_d I_d \bar{u}_{d,i} - \frac{p}{(\gamma_d - 1)} \frac{\sigma_{c,ij}}{\hat{\rho}_d} \frac{\partial(\hat{\rho}_d / \hat{\rho})}{\partial x_j} \right] \quad (77)$$

Αθροίζονται όλες οι εξισώσεις ενέργειας για όλα τα είδη για να εξαχθεί εξίσωση για την εσωτερική ενέργεια ανα μονάδα όγκου των συνολικών αερίων. Η ποσότητα I ορίζεται ως

$$\sum_d \hat{\rho}_d I_d = \hat{\rho} I \quad (78)$$

Έπειτα οι σχέσεις για τη προστιθέμενη θερμότητα των ειδών και των συνολικών αερίων από χημικές αντιδράσεις, συναγωγική και μέσω ακτινοβολίας μεταφορά θερμότητας είναι

$$(sources_d) = \frac{\hat{\rho}_d c_{vd}}{\hat{\rho} c_v} (net \ energy \ source) \quad (79)$$

$$(ha_s(T_s - T))_d = \frac{\hat{\rho}_d c_{vd}}{\hat{\rho} c_v} (ha_s(T_s - T)) \quad (80)$$

$$q_d(\bar{x}, T_d) = \frac{\hat{\rho}_d c_{vd}}{\hat{\rho} c_v} q_d(\bar{x}, T_d) \quad (81)$$

όπου c_v και c_{vd} είναι οι ειδικές θερμότητες των συνολικών αερίων και των ειδών d αντίστοιχα. Με ένα μαζικά σταθμισμένο μέσο εξάγεται η τιμή της ειδικής θερμότητας

Από

$$m I = \sum_d V_d \rho_d c_{vd} T \Rightarrow c_v = \frac{\sum_d \hat{\rho}_d c_{vd}}{\rho} \quad (82)$$

και ομοίως για το πολυτροπικό συντελεστή γ μιας κατάστασης για τα συνολικά αέρια

$$\begin{aligned} \text{Από } p = \sum_d p_d = (\gamma - 1) \rho c_{vd} T = \sum_d (\gamma_d - 1) \hat{\rho}_d c_{vd} T \Rightarrow \\ (\gamma - 1) = \frac{\sum_d (\gamma_d - 1) \hat{\rho}_d c_{vd}}{c_v \rho} \end{aligned} \quad (83)$$

και η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας των συνολικών αερίων γίνεται

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\hat{\rho} I)}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{\rho} I \bar{u}_i)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_d \frac{p}{(\gamma_d - 1)} \frac{\sigma_{c,ij}}{\hat{\rho}_d} \frac{\partial(\hat{\rho}_d / \hat{\rho})}{\partial x_j} = \\ - \sum_d \left[\frac{1}{\gamma_d} (-q_d(\bar{x}, T_d) + (h a_s(T_s - T))_d) \right] + (net\ energy\ source) \end{aligned} \quad (84)$$

Όπως με τις εξισώσεις συνέχειας και μάζας, η εξίσωση ενέργειας θα αναλυθεί σε μέσα και κυμαινόμενα μέρη απλοποιώντας σε ένα μέσο πολλαπλών πραγματοποιήσεων (MRA) και μετά από αντικατάσταση και περαιτέρω απλοποιήσεων για τα κυμαινόμενα μέρη η εξίσωση ενέργειας γίνεται

$$\begin{aligned} \frac{\hat{\rho}}{\partial t} \frac{\partial(\bar{I})}{\partial t} + \frac{\hat{\rho}}{\partial x_i} \frac{\partial(\bar{I} \bar{u}_i)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\sigma_{b,ij} \partial(\bar{I})}{\partial x_j} + \sum_d \frac{p}{(\gamma_d - 1)} \frac{\sigma_{c,ij}}{\hat{\rho}_d} \frac{\partial(\hat{\rho}_d / \hat{\rho})}{\partial x_j} \right] = \\ \sum_d \left[\frac{1}{\gamma_d} \frac{\hat{\rho}_d c_{vd}}{\hat{\rho} c_v} \right] (-q_d(\bar{x}, T_d) + (h a_s(T_s - T))_d) + \overline{(net\ energy\ source)} \\ - \overline{I(net\ mass\ source)} \end{aligned} \quad (85)$$

Η καταβόθρα της θερμοροής λόγω ακτινοβολίας είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο που επηρεάζει τη θερμοκρασία που μπορούν να φτάσουν οι φλόγες και αναπαριστάται σε αυτό το μοντέλο σε όγκο τάξης μεγέθους ως

$$\overline{q(x, T)} = \sigma(k/l) \varepsilon (T^4 - 300^4) \quad (86)$$

Ο όρος $(1/l)$ είναι ανάλογος της επιφάνειας που ακτινοβολεί ανα μονάδα όγκου, ε είναι αποτελεσματική συντελεστής εκπομπής των θυλάκων. σ ο συντελεστής boltzmann και ένας επιπλέον διορθωτικός συντελεστής K . Αυτή η έκφραση της ακτινοβολίας στο μοντέλο δεν αναπαριστά την ακτινοβολία που απορροφάται από το καύσιμο μπροστά στο μέτωπο της φωτιάς και αυτός είναι ένας κεντρικός παράγοντας που επηρεάζει τη ταχύτητα διάδοσης

ειδικά σε πυρκαγιές χαμηλού ανέμου και είναι ένα ελαττωματικό σημείο του συνολικού μοντέλου[60].

Συλλογή των τριών βασικών εξισώσεων και σύνοψη περαιτέρω ανάλυσης

Σε αυτό το σημείο είναι μια καλή αρχή για να γίνει μια σύνοψη της μέχρι τώρα μοντελοποίησης, η κύρια βάση της μοντελοποίησης είναι τρεις βασικές αρχές της Φυσικής, Αρχή Διατήρησης Μάζας, Αρχή Διατήρησης Ορμής και Αρχή Διατήρησης Ενέργειας. Με τις ακόλουθες εξισώσεις μετά από εκτενή ανάλυση και αποδίδονται στη μορφή μέσου πολλαπλών πραγματοποιήσεων (MRA)

$$A\Delta M : \frac{\partial(\bar{\rho})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \overline{(net\ gas\ sources)} \quad (60)$$

$$A\Delta O : \frac{\partial(\bar{u}_i \bar{\rho})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j + R_{ij})}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \bar{\rho} g_i - D \bar{\rho} \bar{u}_i \quad (64)$$

$$A\Delta E : \frac{\hat{\rho}}{\partial t} \frac{\partial(\bar{I})}{\partial t} + \frac{\bar{\rho} \bar{u}_i \partial(\bar{I})}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\sigma_{b,ij} \partial(\bar{I})}{\partial x_j} + \sum_d \frac{p}{(\gamma_d - 1)} \frac{\sigma_{c,ij}}{\bar{\rho}_d} \frac{\partial(\bar{\rho}_d / \bar{\rho})}{\partial x_j} \right] =$$

$$\sum_d \left[\frac{1}{\gamma_d} \frac{\hat{\rho}_d c_{vd}}{\bar{\rho} c_v} \right] (-q_d(\bar{x}, T_d) + (h a_s (T_s - T))_d + \overline{(net\ energy\ source)})$$

$$- \bar{I} \overline{(net\ mass\ source)} \quad (85)$$

Το υπόλοιπο του σχηματισμού του μοντέλου αφορά εκτενή ανάλυση συγκεκριμένων μελών των παραπάνω εξισώσεων για τη καλύτερη φυσική και μαθηματική εξήγηση τους στο μοντέλο. Αυτά αφορούν τη περαιτέρω ανάλυση του τανυστή R_{ij} όπου είναι οι διακυμάνσεις της ταχύτητας των αερίων από τη σταθμισμένη μέση ταχύτητα. Πιο συγκεκριμένα, χωρίζεται ο τανυστής σε τρία μέρη για να εκφράσει τις διαφορετικές αλληλεπιδράσεις των ταχυτήτων στα διαφορετικής τάξης μεγέθη A, B, C δηλαδή

$$R_{ij} = R_{ij,A} + R_{ij,B} + R_{ij,C} \quad (87)$$

και παράγονται 6 εξισώσεις ορμής ως αποτέλεσμα για τα έξι ανεξάρτητα μέρη του τανυστή.

Η επόμενη ανάλυση στο σχηματισμό του μοντέλου αφορά τις ταχύτητες αντιδράσεων και τις χωρίζει σε τρία είδη. Τις αντιδράσεις μεταξύ δύο αερίων, τις αντιδράσεις μεταξύ ενός αερίου

και ενός στερεού και τις αντιδράσεις με ένα αντιδρών όπως η πυρόλυση του ξύλου. Αφου αναλύεται το κάθε είδος αντιδράσεων μετά συνδυάζονται για μια αποτελεσματική ταχύτητα αντίδρασης. Η λεπτομερή ανάλυση των ταχυτήτων αντίδρασης και των υποθέσεων τους θα συντομεφθεί μιας και είναι μια πολύ εξειδικευμένη πτυχή της μοντελοποίησης των πυρκαγιών. Ωστοσο ενδεικτικά, για τις αντιδράσεις δυο αερίων χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις από την ενότητα της αρχής διατήρησης της μάζας σε μια τάξη μεγέθους C ,

$$N_a a + N_b b \rightarrow p \quad (87)$$

$$\frac{\partial(\hat{\rho}_a)}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{\rho}_a \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\sigma_{c,jk} + \sigma_m \hat{\rho} \delta_{jk}) \frac{\partial(\hat{\rho}_a / \hat{\rho})}{\partial x_k}] - N_a F_{(p)} \quad (88)$$

$$\frac{\partial(\hat{\rho}_b)}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{\rho}_b \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\sigma_{c,jk} + \sigma_m \hat{\rho} \delta_{jk}) \frac{\partial(\hat{\rho}_b / \hat{\rho})}{\partial x_k}] - N_b F_{(p)} \quad (89)$$

$$\frac{\partial(\hat{\rho}_p)}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{\rho}_p \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\sigma_{c,jk} + \sigma_m \hat{\rho} \delta_{jk}) \frac{\partial(\hat{\rho}_p / \hat{\rho})}{\partial x_k}] - F_{(p)} \quad (90)$$

$$F_{(p)} = \frac{\hat{\rho}_a \hat{\rho}_b}{\hat{\rho} \hat{\rho}} \hat{\rho} \lambda_{ab} E_{(p)} \quad (91)$$

όπου $F_{(p)}$ ανάλογο στη μέση πυκνότητα θύλακος επί τη συνάρτηση θερμοκρασίας $E_{(p)}$. $E_{(p)}$ περιγράφει τη εξάρτηση της ταχύτητας αντίδρασης για κάθε αντίδραση και ένας συντελεστής λ_{ab} που συσχετίζει τις μέσες ποσότητες των αντιδρώντων στο μίγμα ειδών και δίνει τη μέγιστη ταχύτητα αντίδρασης.

Για το δεύτερο είδος αντίδρασης ένα αέριο και ένα στερεό και εξισώσεις από την ενότητα της αρχής διατήρησης της μάζας σε μια τάξη μεγέθους C έχουμε

$$N_a a + N_q q \rightarrow e \quad (92)$$

$$\frac{\partial(\hat{\rho}_a)}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{\rho}_a \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\sigma_{c,jk} + \sigma_m \hat{\rho} \delta_{jk}) \frac{\partial(\hat{\rho}_a / \hat{\rho})}{\partial x_k}] - N_a F_{(e)} \quad (93)$$

$$\frac{\partial(\hat{\rho}_q)}{\partial t} = - N_q F_{(p)} \quad (94)$$

$$\frac{\partial(\hat{\rho}_e)}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{\rho}_e \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\sigma_{c,jk} + \sigma_m \hat{\rho} \delta_{jk}) \frac{\partial(\hat{\rho}_e / \hat{\rho})}{\partial x_k}] - F_{(e)} \quad (93)$$

και στο τρίτο είδος αντίδρασης που είναι η πυρόλυση του ξύλου χρησιμοποιείται για τη ταχύτητα αντίδρασης συσχετίσεις με συνάρτηση κατανομής πιθανότητας και αντί ο κύριος παράγοντας να είναι η ταχύτητα ανάμιξης, θα είναι η ταχύτητα μετάδοσης θερμότητας με τις εξισώσεις

$$\bar{F}_{(p)} = c_{pr} \bar{\hat{A}}_p \bar{\Psi}_{(p)} \quad (94)$$

$$\bar{F}_{(H2O)} = c_{H2Or} \bar{\hat{A}}_{H2O} \bar{\Psi}_{(H2O)} \quad (95)$$

όπου $\bar{F}$ η ταχύτητα αντίδρασης για την εξάτμιση της ρητίνης και του νερού αντίστοιχα, Ψ είναι συναρτήσεις του πιθανού κλάσματος του χώρου που είναι πάνω από τη θερμοκρασία αντίδρασης και $\bar{\hat{A}}$ είναι η διαθέσιμη μάζα ανα μονάδα όγκου ρητίνης και νερού αντίστοιχα.

Όσο για το ξύλο η πυρόλυση μοντελοποιείται [62]ως

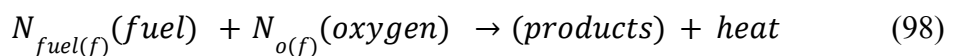
$$\bar{F}_{(w)} = (J_1 + J_2 + J_3) \bar{\hat{A}}_{(w)} \quad (96)$$

$$J_i = J_i^0 \exp(-E_i/R_o T_s) \quad (97)$$

όπου E_i ενέργεια αντίδρασης, R_o η σταθερά των αερίων, T_s θερμοκρασία αντίδρασης και οι τιμές j είναι δεδομένες.

Απλοποίηση και Προσομοίωση

Για τη πρώτη χρήση του μοντέλου, απλοποιήθηκαν μέρη τα οποία συνέβαλαν λιγότερο στη ταχύτητα διάδοσης ώστε να ελαχιστοποιηθεί το υπολογιστικό φορτίο. Η πρώτη απλοποίηση είναι ότι περιορίζεται η αντίδραση στη περιοχή που υπάρχει στερεό ξύλο(αυτο στη πραγματικότητα δεν ισχύει διότι φλόγες από καμένη αιθάλη και υδρογονάνθρακες εξαπλώνεται και μακριά από το τοπικό καύσιμο). Για το περιορισμό μεταφοράς αιθάλης και υδρογονανθράκων περιγράφεται η καύση μόνο από την αντίδραση,



Με αυτή τη παραδοχή χάνεται η πληροφορία για τις πιο αργές αντιδράσεις όπως η καύση του κάρβουνου, το οποίο θεωρείται ότι δεν συμβάλλει τόσο στη ταχύτητα διάδοσης πυρκαγιών με άνεμο. Επιπλέον, η έλλειψη της υγρασίας στο απλοποιημένο μοντέλο θα οδηγήσει σε γρηγορότερες ταχύτητες διάδοσης διότι η υγρασία έχει ισχυρή ανασταλτική επιρροή στις πυρκαγιές.

Όσον αφορά την διατήρηση μάζας για το καύσιμο, χρησιμοποιείται,

$$\frac{\partial(\hat{\rho}_{fuel})}{\partial t} = - N_{fuel(f)} F_{(f)} \quad (99)$$

και δίνει τη ταχύτητα κατανάλωσης του διαθέσιμου καυσίμου και για το οξυγόνο από (57) είναι $(\sigma_{c,ij} + \sigma_{b,ij} + \delta_{i,j} \sigma_m)$

$$\frac{\partial(\overline{\widehat{\rho}})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{\widehat{\rho}}\overline{\widehat{u}}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}[(\sigma_{c,ij} + \sigma_{b,ij} + \delta_{ij}\sigma_m)\frac{\partial(\overline{\widehat{\rho}}/\widehat{\rho})}{\partial x_i}] - N_{o(f)}F_{(f)} \quad (100)$$

Η ταχύτητα αντίδρασης $F_{(f)}$ είναι συνδυασμός των αντιδράσεων οξυγόνου που συμβαίνουν ταυτόχρονα. Η $F_{(f)}$ αναπαριστά το συνδυασμό της πυρόλυσης του ξύλου και τη καύση υδρογονανθράκων που απελευθερώνονται από το ξύλο κατά τη πυρόλυση του. Έπειτα από περαιτέρω ανάλυση για αντίδραση τύπου αερίου-αερίου, η $F_{(f)}$ δίνεται από

$$F_{(f)} = c_F \frac{\overline{\widehat{\rho}}_f \overline{\widehat{\rho}}_o \sigma_{cm} \overline{\widehat{\psi}}_s}{\rho_{ref} s_x^2} \lambda_{of} \quad (101)$$

με σωστή επιλογή c_F , τότε $\rho_{ref} = 1 \text{ kg/m}^3$ και s_x το μέγεθος των μικρότερων στοιχείων καυσίμων. Από πειράματα με $c_F = 0.07$ μια φωτιά με ταχύτητα ανέμου 1 m/s μπορεί οριακά να αυτο διατηρηθεί. Ο όρος λ_{of} ορίζεται ως

$$\lambda_{of} = \frac{\overline{\widehat{\rho}}_f \overline{\widehat{\rho}}_o}{(\widehat{\rho}_f/N_f + \widehat{\rho}_o/N_o)} \quad (102)$$

Η συνάρτηση θερμοκρασίας ψ_s επικεντρώνεται σε μια κρίσιμη θερμοκρασίας 500K

Για να επιλυθούν οι μέσες ταχύτητες και το ενεργειακό περιεχόμενο του αερίου χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις μάζας, ορμής και ενέργειας για το συνολικό αέριο από (60,64,85) ως

$$\frac{\partial(\overline{\widehat{\rho}})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{\widehat{\rho}}\overline{\widehat{u}}_i)}{\partial x_i} = N_{fuel(f)}F_{(f)} \quad (103)$$

$$\frac{\partial(\overline{\widehat{u}}_i \overline{\widehat{\rho}})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{\widehat{\rho}}\overline{\widehat{u}}_i \overline{\widehat{u}}_j + R_{ij})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \overline{\widehat{\rho}} g_i - D \overline{\widehat{\rho}} \overline{\widehat{u}}_i \quad (104)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\widehat{\rho}}{\partial t} \frac{\partial(\overline{\widehat{I}})}{\partial t} + \frac{\overline{\widehat{\rho}} \overline{\widehat{u}}_i \partial(\overline{\widehat{I}})}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\sigma_{c,ij} \partial(\overline{\widehat{I}})}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{1}{(\gamma_o - 1) \overline{\widehat{\rho}}_o} - \frac{1}{(\gamma - 1)(1 - \overline{\widehat{\rho}}_o)} \right) \frac{p \sigma_{c,ij} \partial(\overline{\widehat{\rho}}_d / \widehat{\rho})}{\partial x_j} \right] = \\ & \left[\frac{1}{\gamma_o} \frac{\widehat{\rho}_o c_{vo}}{\widehat{\rho} c_v} + \frac{1}{\gamma} \frac{\widehat{\rho} - \widehat{\rho}_o}{\widehat{\rho}} \right] (-q_d(\bar{x}, T_d) + (ha_s(T_s - T))_d + \overline{(net\ energy\ source)}) \\ & - \overline{\widehat{I}}(\overline{net\ mass\ source}) \end{aligned} \quad (105)$$

Μία επιπλέον απλοποίηση είναι ότι το γ και c_v για το συνολικό αέριο είναι περίπου όμοια και η εξίσωση απλοποιείται ως

$$\begin{aligned} & \frac{\hat{\rho}}{\partial t} \partial(\bar{I}) + \frac{\overline{\hat{\rho} u_i} \partial(\bar{I})}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\sigma_{c,ij} \partial(\bar{I})}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{1}{(\gamma_o - 1) \hat{\rho}_o} - \frac{1}{(\gamma - 1)(\hat{\rho} - \hat{\rho}_o)} \right) \frac{p \sigma_{c,ij} \partial(\hat{\rho}_d / \hat{\rho})}{\partial x_j} \right] = \\ & \left[\frac{1}{\gamma_o} \frac{\hat{\rho}_o c_{vo}}{\hat{\rho} c_v} + \frac{1}{\gamma} \frac{\hat{\rho} - \hat{\rho}_o}{\hat{\rho}} \right] (-q_d(\bar{x}, T_d) + (h a_s (T_s - T))_d + \overline{(net\ energy\ source)}) \\ & - \overline{I(net\ mass\ source)} \end{aligned} \quad (105)$$

Ο συναγωγικός όρος περιγράφεται στην ενότητα με την εξίσωση ενέργειας ενώ ο όρος ακτινοβολίας αναπαρίσταται ως μια θερμική καταβόθρα μέλανος σώματος από τα καυτά αέρια που διαμορφώνονται ως

$$q_d(\bar{x}, T_d) = \frac{k\sigma}{s_b} (\bar{T}^4 - T_{ambient}^4) \quad (106)$$

s_b είναι συντελεστής που συσχετίζει το μέγεθος μιας περιοχής τάξεως B και το τελικό όγκο.

Ο k περιγράφει την ικανότητα εκπομπής του υλικού, σε αυτή τη περίπτωση θεωρείται το $k = 1$ και σ σταθερά boltzmann.

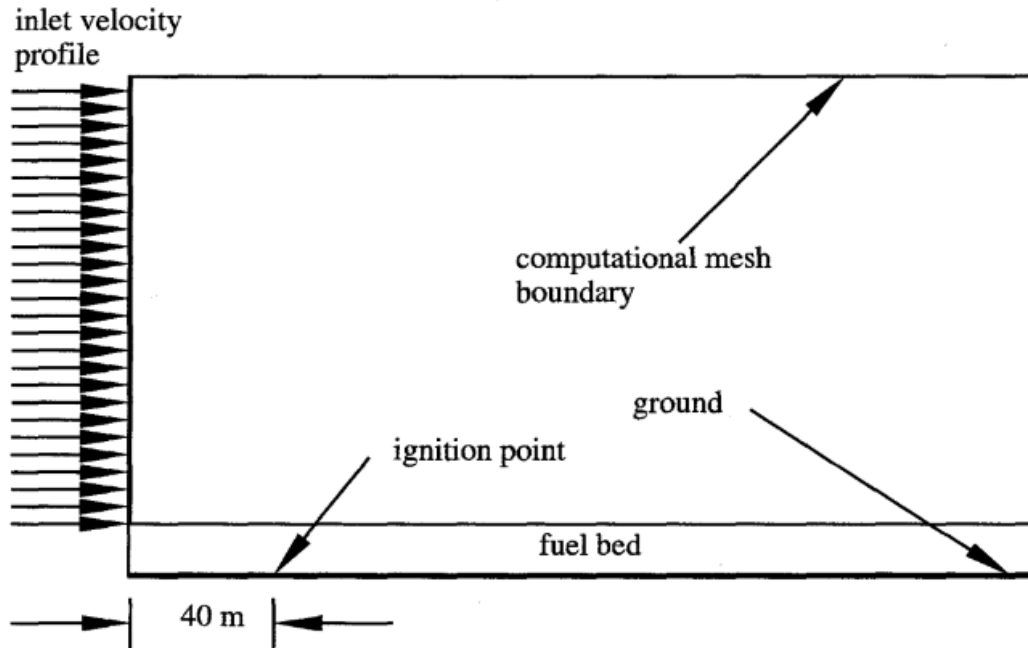
Ενώ τέλος οι όροι $\overline{(net\ energy\ source)}$ και $\overline{(net\ mass\ source)}$ ορίζονται από

$$\overline{(net\ energy\ source)} = c_F \frac{\overline{\hat{\rho}_f \hat{\rho}_o \sigma_{cm} \Psi_s}}{\rho_{ref} s_x^2} \lambda_{of} H_{(f)} \quad (107)$$

$$\overline{(net\ mass\ source)} = c_F \frac{\overline{\hat{\rho}_f \hat{\rho}_o \sigma_{cm} \Psi_s}}{\rho_{ref} s_x^2} \lambda_{of} N_{fuel(f)} \quad (108)$$

με $H_{(f)}$ η ενέργεια που απελευθερώνεται λόγω καύσης του καυσίμου.

Κατά τη προσομοίωση αυτού του απλοποιημένου μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, εδάφους και διασπορά καυσίμου. Το υπολογιστικό πλέγμα έχει ανάλυση 2m και η διαίρεση είναι ομοιόμορφη και ορθογώνια. Οι διαστάσεις είναι 320 m οριζόντια και 120-160m στη κάθετη διάσταση, σε όλες τις προσομοιώσεις η ανάφλεξη γίνεται στα 40 m από την αρχή και θερμοκρασία 400K(Εικόνα.4,9).



Εικόνα.4.9 . Διάγραμμα τυπικών αρχικών συνθηκών των προσομοιώσεων
 Από: Linn, R. *A Transport Model for Prediction of Wildfire Behavior*; Los Alamos National Lab.: Los Alamos, NM, USA, 1997.

Το προφίλ ταχυτήτων από τη αριστερή μεριά είναι ως εξής

$$u_{x=0} = 0 \quad \text{if } z < 10 \text{ m}$$

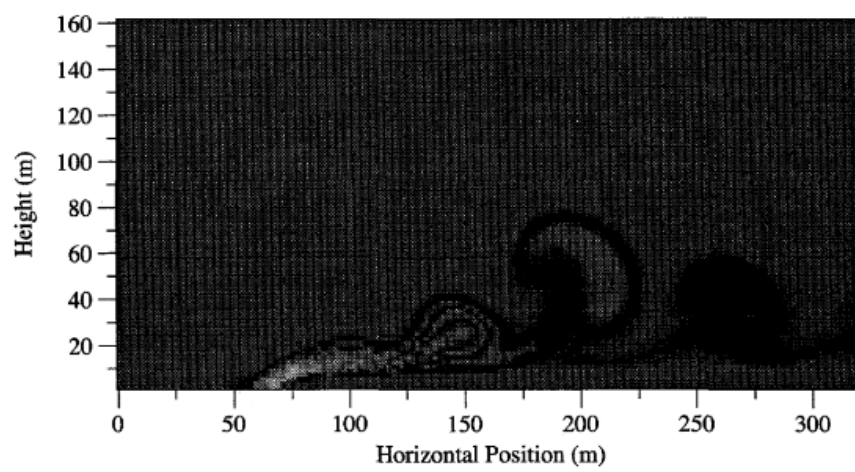
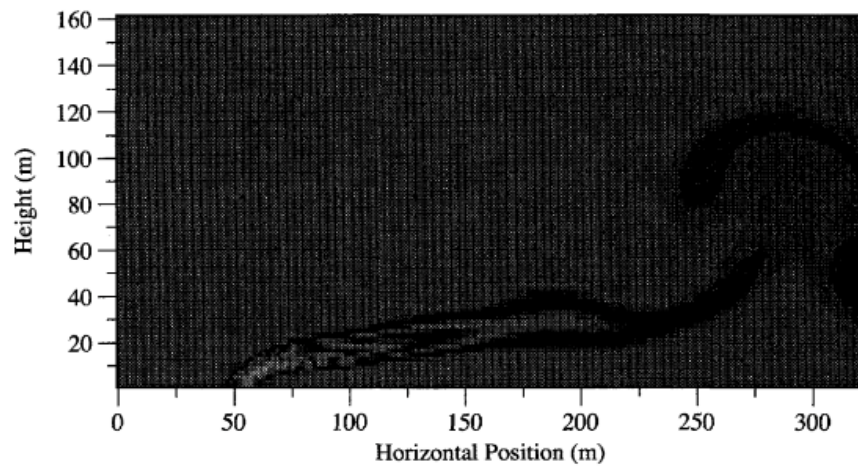
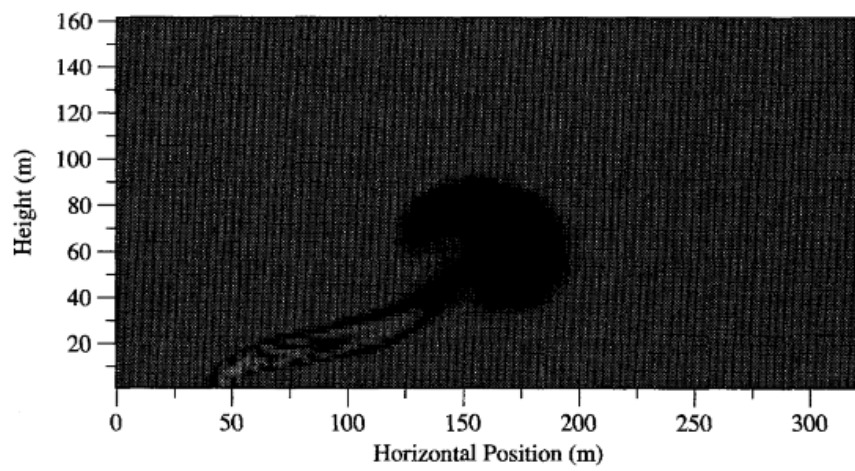
$$u_{x=0} = u_{inlet} \quad \text{if } z \geq 10 \text{ m}$$

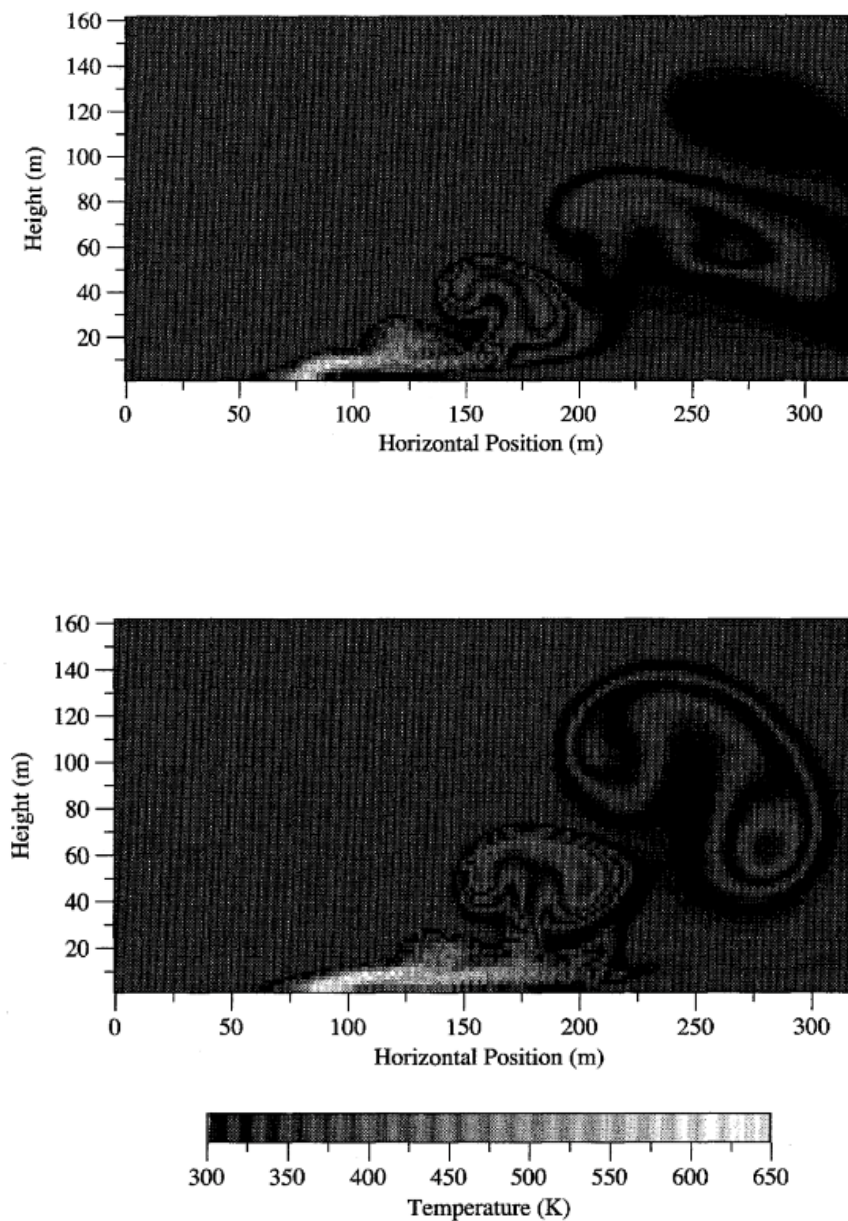
Πραγματοποιούνται πολλές προσομοιώσεις στο μοντέλο και λόγω συντομίας θα παρουσιαστεί η βασική προσομοίωση (εικόνα.4.10) όπου χρησιμοποιείται επίπεδο έδαφος με ομοιόμορφη ταχύτητα 2 m/s και η κατανομή καυσίμου κυμαίνεται από 2 - 0 kg/m³ μέσω της σχέσης

$$\hat{\rho}_f = 2. (1 - \bar{z}/10) \quad \text{if } \bar{z} < 10 \text{ meters}$$

$$\hat{\rho}_f = 0 \quad \text{if } \bar{z} \geq 10 \text{ meters}$$

όπου $\bar{z}$ είναι το ύψος πάνω από το έδαφος και δεν είναι η ίδια με το κατακόρυφο ύψος του πλέγματος.





Εικόνα.4.10 . Η προσομοίωση του απλοποιημένου μοντέλου στη βασική περίπτωση μετά από 50,100,150,200,250s

Από: Linn, R. A Transport Model for Prediction of Wildfire Behavior; Los Alamos National Lab.: Los Alamos, NM, USA, 1997.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παράγοντες ανάφλεξης

Έπειτα από την εκτενή βιβλιογραφική ανάλυση για την ανάφλεξη, διάδοση και τρόπους μοντελοποίησης των πυρκαγιών, οδηγούμαστε προς τα συμπεράσματα. Παρόλο που έχει καλυφθεί ένα αρκετά μεγάλο μέγεθος βιβλιογραφίας, επισημαίνονται οι σημαντικότερες παρατηρήσεις από αυτή τη βιβλιογραφία. Σίγουρα η δυσκολία του φαινομένου λόγω της ανάμιξης διαφορετικών πεδίων Φυσικής και Χημείας, συμβάλλει στην ύπαρξη ανεξερευνητών πτυχών των πυρκαγιών και απαιτείται περισσότερη έρευνα στο μέλλον δεδομένου της αυξητικής τάσης του φαινομένου.

Όσον αφορά την ανάφλεξη και πιο συγκεκριμένα για τους ανθρωπογενείς παράγοντες της, όταν η εστία ανάφλεξης είναι κοντά σε κατοικημένη περιοχή της πυρκαγιάς τόσο πιο πιθανό είναι το αίτιο του εμπρησμού. Αντιθέτως όσο πιο δύσβατη και απόμακρη η περιοχή τότε το φαινόμενο της ανάφλεξης από αστραπή είναι όλο και πιο πιθανό. Οι αναφλέξεις πυρκαγιών είναι κυρίως ανθρωπογενές ζήτημα, κατά τη περίοδο 2006-2010 για όλη την ευρώπη, οι φωτιές που προκλήθηκαν από ανθρώπινο παράγοντα(αμέλεια ή εμπρησμό) ήταν 97,1 τα εκατό. Οι αιτίες σε αυτή τη παρατήρηση έγκειται σε κοινωνικούς-οικονομικούς λόγους όπως ανεργία αλλά και ότι οι αλλαγές στα κοινωνικά πρότυπα και τον τρόπο ζωής κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα οδήγησαν στην εγκατάλειψη των παραδοσιακών χρήσεων δασικών εκτάσεων, με αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη αύξηση βλάστησης και κατ' επέκταση καυσίμου για τις πυρκαγιές. Παράλληλα, άλλαξε και ο τρόπος αλληλεπίδρασης του ανθρώπου με τη φύση από συμβιωτικός σε ψυχαγωγικός με κατ' επέκταση τη απώλεια της άμεσης προστασίας του από τον άνθρωπο. Για παράδειγμα υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ αριθμού προβάτων και κατσίκων και μειωμένη ανάφλεξη πυρκαγιάς. Ενώ με την μείωση της κτηνοτροφίας φαίνεται μια αύξηση της. Η αύξηση της ανάφλεξης πιθανότατα οφείλεται στη μετάβαση από τη συμβατική κτηνοτροφία σε ψυχαγωγικές δραστηριότητες, οι οποίες συνδέονται με την ευρύτερη ανθρώπινη δραστηριότητα.

Παρατηρείται ότι περιοχές με υψηλότερη πυκνότητα οδών, υψηλότερο πληθυσμό και μικρότερες αποστάσεις από μη δασικές περιοχές βρέθηκαν να έχουν αυξημένο κίνδυνο πυρκαγιάς. Η άμεση συσχέτιση είναι προφανής εφόσον η ευκολότερη πρόσβαση του ανθρώπου προς τη φύση επιτρέπει πυρογενείς δραστηριότητες. Ωστόσο η συσχέτιση των οδών στην ανάφλεξη των πυρκαγιών δεν είναι ξεκάθαρη διότι λειτουργούν ως διαχωριστές της περιοχής(διαχωρίζοντας τη καύσιμη ύλη και περιορίζοντας την εξάπλωση) ή ως δίοδοι καταστολής(με την ταχύτερη άφιξη πυροσβεστικών μέσων) και συμπεραίνεται ότι υπάρχει σχέση μεταξύ της μείωσης της οδικής πυκνότητας και της αυξημένης πιθανότητας πυρκαγιάς σε περιοχές όπου οι πυρκαγιές δεν προκαλούνται κυρίως από ανθρώπινη δραστηριότητα. Όσον αφορά τη πυκνότητα των ανθρώπων σε μια περιοχή επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο υλοποιείται η ανάφλεξη και το οποίο καθορίζει τον κίνδυνο ανάφλεξης. Επηρεάζει επίσης την πιθανότητα να αναφερθεί πυρκαγιά και συνδέεται με έμμεσες μεταβλητές όπως η πυκνότητα των δρόμων. Επιπρόσθετα, η συμβολή της πυκνότητας πληθυσμού έχει φθίνουσα επίδραση όταν μειώνεται η ανθρώπινη δραστηριότητα προς τη φύση και συμπεραίνεται ότι λιγότερες πυρκαγιές μπορεί να συμβούν εάν οι άνθρωποι συγκεντρώνονται σε πολλές μικρές κοινωνίες παρα να είναι αποκομμένοι σε διάφορα μέρη. Ένα πλεονέκτημα των μεγάλων αστικών κέντρων ως προς την ανάφλεξη πυρκαγιών είναι ότι οι υψηλά ανεπτυγμένες αστικές περιοχές βελτιώνουν την κινητικότητα λόγω της εύκολης προσβασιμότητας τους και της υψηλής πυκνότητας του πληθυσμού. Αυτά τα στοιχεία επιτρέπουν την αυξημένη ανταπόκριση, η οποία βοηθά στην ταχεία αναγνώριση και καταστολή των πυρκαγιών.

Ο παράγοντας της εδαφοκάλυψης είναι εξίσου σημαντικός διότι διαφορετικοί τύποι εδαφοκάλυψης είναι πιο εύφλεκτοι από άλλους. Σε γενικές γραμμές, οι γεωργικές και αστικές κατοικίσιμες περιοχές δείχνουν χαμηλότερη προδιάθεση για πυρκαγιά, ενώ οι θαμνώδεις και οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις δείχνουν μεγαλύτερη πιθανότητα για πυρκαγιά. Ενώ τα δάση είναι σε μια ενδιάμεση πιθανότητα ανάφλεξης. Ανακαλύφθηκε ότι στις περιοχές της Μεσογείου, οι θάμνοι και τα κωνοφόρα δάση ήταν πιο πιθανόν σε ανάφλεξη, ενώ οι καλλιεργητικές εκτάσεις, τα βοσκοτόπια και τα πλατύφυλλα δάση επηρεάζεται λιγότερο από τις πυρκαγιές. Λόγω των φυσικών τους χαρακτηριστικών, οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις και οι θάμνοι είναι εγγενώς πιο επιρρεπείς σε πυρκαγιές. Με αυτά τα δεδομένα, η λιγότερο ευαίσθητη εδαφοκάλυψη μπορεί να λειτουργήσει ως φυσικός πυροσβέστης σε περιοχές υψηλής πιθανότητας εμφάνισης φωτιάς. Η ποικιλομορφία της κάλυψης γης έχει αναγνωριστεί ως δυνητικός παράγοντας για τη μείωση του κινδύνου πυρκαγιάς, επηρεάζοντας την εξάπλωση και την ένταση της φωτιάς με τη δημιουργία διακοπόμενων περιοχών (fuel breaks). Όσον αφορά την αγρό-αστική διεπαφή (Wildland Urban Interface). Όταν οι χάρτες τύπου καυσίμου επικαλύπτονται με ιστορικούς χάρτες καθεστώτος πυρκαγιάς, καθίσταται προφανές ότι το 80% των περιοχών με μικρές ανάφλεξης φωτιάς καλύπτεται από δάση υψηλού ή μέτριου εύφλεκτου χαρακτήρα. Ενώ τύποι όπως υγρά δάση σκληρού ξύλου, θάμνοι, υγρότοποι και γεωργικές περιοχές είναι λιγότερο εύφλεκτοι τύποι. Επισημαίνοντας τη σημασία του τύπου εδαφοκάλυψης για το κίνδυνο ανάφλεξης πυρκαγιάς.

Σε μια επόμενη κλίμακα, για τη πιθανότητα ανάφλεξης έχει σημασία και το είδος της βλάστησης. Τα είδη που αποτελείται από ένα δάσος διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της συχνότητας των πυρκαγιών, ειδικά όταν υπάρχουν είδη κωνοφόρων με υψηλή περιεκτικότητα σε ρητίνες. Ο κίνδυνος πυρκαγιάς είναι χαμηλότερος σε δέντρα που είναι ώριμα, αραιά δάση από ό, τι σε πυκνά και πολυεπίπεδα δέντρα. Αυτά τα χαρακτηριστικά συνδέονται με μεταβλητές όπως η υγρασία και η φαινομενική πυκνότητα. Παρατηρήθηκε ότι η μειωμένη ευφλεκτότητα και ο μεγαλύτερος χρόνος ανάφλεξης οφείλονται σε αύξηση της φαινομενικής πυκνότητας και της περιεκτικότητας σε υγρασία του καυσίμου. Η περιεκτικότητα σε υγρασία και η φαινομενική πυκνότητα έχουν σημαντικό αντίκτυπο στο μέγιστο ύψος της φλόγας, το μέσο ύψος της φλόγας και το ποσοστό εξάπλωσης των προσαναμμάτων. Η περιεκτικότητα σε υγρασία του καυσίμου (FMC), η ροή αέρα και το είδος του καυσίμου επηρεάζουν την πιθανότητα ανάφλεξης. Η βιωσιμότητα της καύσης για τα δέντρα ποικίλλει ανάλογα με την περιεκτικότητα σε υγρασία. καύση δεν τείνει να συμβεί με υγρασία πάνω από 70%, πλήρη καύση συμβαίνει κάτω από 30% και μερική καύση συμβαίνει μεταξύ 30% και 70%

Έπειτα ακολουθούν οι κλιματικοί παράγοντες όπου επισημαίνεται η συμβολή των εποχιακά ξηρών ατμοσφαιρικών μαζών στην εξάπλωση των πυρκαγιών. Τα επεισόδια ξηρασίας έχουν σημαντική επίδραση στη δραστηριότητα των πυρκαγιών στο περιβάλλον και οι συνθήκες καυσίμων επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τα πρότυπα βροχοπτώσεων καθώς η ξηρασία συνδέεται με την περιεκτικότητα σε υγρασία των καυσίμων. Στον ελληνικό χώρο έχει αποδειχθεί για ιστορικά δεδομένα από 1894 έως το 2010 μια σημαντική αντίστροφη σχέση μεταξύ της συνολικής έκτασης που καίγεται και των βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια της εποχής των πυρκαγιών. Επιπλέον, υπάρχει μια θετική σύνδεση με τις βροχοπτώσεις των προηγούμενων δύο ετών, υπογραμμίζοντας τη μακροπρόθεσμη επίδραση των βροχών στη ρύθμιση της υγρασίας και της εξέλιξης των καυσίμων. Όσον αφορά την εποχικότητα των αναφλέξεων, η εμφάνιση πυρκαγιάς διέπεται από φυσικούς κύκλους που εκτείνονται από καθημερινά έως ετήσια πρότυπα και συνδέονται με περιβαλλοντικούς παράγοντες και φαινολογία βλάστησης. Οι ανθρωπογενείς πυρκαγιές είναι πιο ομοιόμορφα διαδεδομένες όλο

το χρόνο, ενώ οι αναφλέξεις που προκαλούνται από κεραυνούς συγκεντρώνονται μέσα σε λίγες ημέρες

Στη Γαλλία, οι πυρκαγιές εκδηλώνονται κατά κύριο λόγο όλο το καλοκαίρι, συνήθως αργά το απόγευμα ή το βράδυ, ενώ οι γεωργικές ή δασικές φωτιές εμφανίζονται πιο συχνά κατά τη διάρκεια της ημέρας το φθινόπωρο και το χειμώνα. Παρόμοιες τάσεις παρατηρούνται στη Γερμανία, τη Βουλγαρία και τη Σλοβακία, όπου υπάρχουν δύο υψηλές τάσεις για πυρκαγιές το καλοκαίρι (συνήθως τον Αύγουστο) και την άνοιξη (Μάρτιος-Απρίλιος), οι οποίες και οι δύο σχετίζονται κυρίως με τους αγρότες που καίνε για αγροτικούς σκοπούς. Η Ευρωπαϊκή Βάση Δεδομένων για τις Πυρκαγιές των Δασών (EFD) δείχνει ότι, στα ευρωπαϊκά μεσογειακά έθνη, το ποσοστό των αιτιών πυρκαγιάς από το μεσημέρι μέχρι τα μεσάνυχτα είναι περίπου ίσο μεταξύ των περιστατικών που προκαλούνται από αμέλεια/ατυχήματα και με πρόθεση φωτιές (φωτιές που δεν είναι από αμέλεια και μπορεί να οδηγήσουν σε πυρκαγιά αλλά δεν αναφέρεται και ως εμπρησμός). Κατά τη διάρκεια της υπόλοιπης ημέρας, και ειδικά τη νύχτα, υπάρχουν πολύ περισσότερες εκούσιες φωτιές. Γύρω στις 3 το απόγευμα είναι όταν η συχνότητα των πυρκαγιών για ανθρωπογενείς αιτίες κορυφώνεται, με μια πιο έντονη αύξηση για τα γεγονότα που προκύπτουν από ατυχήματα και αμέλεια. Η κορυφή είναι λίγο αργότερα από το συνηθισμένο, στις 5 μ.μ., λόγω φυσικών λόγων.

Τέλος, για τη τοπογραφία βρέθηκε ότι οι περιοχές με πλαγιές μεγαλύτερες από 25% κλίση ήταν ουσιαστικά λιγότερο πιθανό να βιώσουν πυρκαγιές από ό, τι τα μέρη με χαμηλότερες κλίσεις. Η συσχέτιση αυτή ήταν ανεξάρτητη από το είδος της εδαφοκάλυψης γης σε αυτή την κατηγορία. Ο προσανατολισμός είναι ο βασικός παράγοντας που δείχνει πόσο εκτεθειμένη η πλαγιά είναι στον ήλιο. Οι νότιες εκθέσεις επηρεάζονται περισσότερο από τον ήλιο και τον άνεμο. Λόγω των αυξημένων ευαίσθητων σημείων εκκίνησης καύσης, οι περιοχές με νότιες πλευρές αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 40% όλων των δασικών πυρκαγιών. Πάνω από εξήντα τοις εκατό των δασικών πυρκαγιών συμβαίνουν στις νότιες και νοτιοδυτικές πτυχές, σε πλαγιές που κυμαίνονται από μηδέν έως είκοσι μοίρες. Καθώς η κλίση αυξάνεται, υπάρχει μια αξιοσημείωτη μείωση στη συχνότητα των δασικών πυρκαγιών. Όσον αφορά το υψόμετρο, περισσότερο από το 90% των δασικών πυρκαγιών συμβαίνουν σε υψόμετρο 100 μέτρων πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, κυρίως σε χαμηλότερες περιοχές, αποδεικνύοντας τον κρίσιμο αντίκτυπο που παίζει η υψομέτρηση σε αυτά τα γεγονότα. Τα υψηλότερα υψόμετρα βλέπουν λιγότερο σοβαρές πυρκαγιές λόγω των περισσότερων βροχοπτώσεων. Είναι ζωτικής σημασίας να ληφθούν υπόψη οι μεταβολές του υψομέτρου πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας σε σχέση με τη γύρω τοπογραφία.

Παράγοντες διάδοσης

Στη προσπάθεια κατανόησης του φαινομένου των πυρκαγιών το επόμενο λογικό βήμα είναι, η κατανόηση της συμπεριφοράς διάδοσης των πυρκαγιών. Στη πραγματικότητα μετά από μια ανάφλεξη, κατά την οποία είναι πιο συχνή να είναι από ανθρώπινο παράγοντα, οι τοπικές κλιματικές και περιβαλλοντικές συνθήκες καθορίζουν την διάδοσή της και την εξέλιξη της σε μια σοβαρή πυρκαγιά. Όσον αφορά τους ανθρωπογενείς παράγοντες, οι οδοί είναι πάντα σημαντικοί για τον καθορισμό των ορίων των πυρκαγιών σε διαφορετικές οικολογικές περιοχές και μεγέθη, αλλά έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση σε πυρκαγιές που είναι μεταξύ 102 και 104 εκταρίων σε μέγεθος. Σε αυτό το εύρος μεγέθους, η συμβολή των οδών στην πυρόσβεση είναι αρκετά σημαντική. Οι οδοί έχουν ισχυρό έλεγχο περιορισμού εξάπλωσης σε μικρές και μεσαίες πυρκαγιές, και η επιρροή τους είναι εμφανής ακόμη και για

μεγαλύτερου μεγέθους φωτιάς, αν και με μικρότερη αποτελεσματικότητα. Έρευνες έχουν δείξει ότι τα όρια πυρκαγιάς συχνά συμπίπτουν με περιοχές που έχουν ήδη καεί, αλλά σχετικά λίγοι είναι οι γνωστοί παράγοντες και οι διαδικασίες που ελέγχουν τη φυσική πυρόσβεση μιας φωτιάς. Δηλώνοντας ότι την ιδιότητα μείωσης διάδοσης μπορεί να μην την έχουν μόνο ανθρωπογενή παράγοντες αλλά και το καύσιμο ή το κλίμα

Η εδαφοκάλυψη κατά τη διάδοση των πυρκαγιών συχνά δεν είναι ομοιογενής και αποτελείται από διαφορετικά είδη βλάστησης. Διαφορετικά είδη βλάστησης έχουν διαφορετικά σημεία ανάφλεξης και ταχύτητες καύσης λόγω αυτών των διαφορών. Επιπλέον, το νεκρό καύσιμο, το οποίο περιλαμβάνει νεκρή βλάστηση, είναι σημαντικός παράγοντας για την καύση των πυρκαγιών. Λόγω των ευρύτερων διαστάσεων μεταξύ των υλικών και επειδή τα επιφανειακά καύσιμα (όπως νεκρά χόρτα) έχουν χαμηλή πυκνότητα και επιτρέπουν την άφθονη αποθήκευση οξυγόνου, γίνονται πολύ εύφλεκτα καύσιμα. Επιπρόσθετα, είναι πορώδη και απορροφούν και απελευθερώνουν νερό σαν ένα σφουγγάρι, με το μηχανισμό της διάχυσης. Αντιθέτως, μεγαλύτερη πυκνότητα επιφανειακών καυσίμων αναστέλλει την εκτεταμένη εξάπλωση των πυρκαγιών, μειώνοντας την αποθήκευση οξυγόνου και δημιουργώντας μικρότερα κενά. Η βλάστηση τείνει να μοιράζεται προσαρμοστικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη δυναμική πυρκαγιάς σε περιοχές με παρόμοια κλίματα. Για παράδειγμα, τα φυτά στις περιοχές της Μεσογείου έχουν αναπτύξει μηχανισμούς για να διατηρήσουν την υγρασία κατά τη διάρκεια παρατεταμένων περιόδων ξηρασίας, και η βλάστηση βιώνει ανάπτυξη την άνοιξη. Με παρόμοιο τρόπο, τα κωνοφόρα δάση έχουν αναπτυχθεί σε όλες τις βορειοδυτικές περιοχές του κόσμου ως αποτέλεσμα της προσαρμογής στους μακρύς χειμώνες και τις σύντομες καλοκαιρινές περιόδους ανάπτυξης που βρίσκονται σε κρύα κλίματα. Τα αγροδοσικά καύσιμα αποτελούνται από κλαδιά και φύλλα και διατηρούν την κυτταρική τους δομή μέχρι να καταρρεύσουν

Όσον αφορά την υγρασία, έχει αποδειχθεί ότι σχετίζεται με την έκταση των πυρκαγιών σε διεθνές επίπεδο και χρησιμοποιείται συνήθως σε συστήματα εκτίμησης κινδύνου φωτιάς. Η υγρασία του εδάφους είναι ένας τρόπος αποθήκευσης της βροχόπτωσης και έχει σημαντική επίδραση στην περιεκτικότητα υγρασίας των επιφανειακών καυσίμων. Σε πιο λεπτομερές επίπεδο για την εδαφοκάλυψη, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία είναι δύο σημαντικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απαίτηση των φυτών για διατήρηση του νερού. Η νεκρή βλάστηση προκαλείται από την ξηρασία και όχι μόνο αυξάνει τον κίνδυνο διάδοσης πυρκαγιών λόγω της αύξησης της ποσότητας των νεκρών καυσίμων των αγροδοσικών περιοχών, αλλά και αυξάνει επίσης τον κίνδυνο των ξηρών ζωντανών φυτών. Επιπρόσθετα, τα λεπτά καύσιμα, αυτά με διάμετρο μικρότερη από 0,63 cm, αντιδρούν γρήγορα σε αλλαγές στη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία, γι' αυτό και είναι κύριοι πολλαπλασιαστές των αγροδοσικών πυρκαγιών. Είναι εμφανές ότι το ποσοστό διάδοσης της φωτιάς σχετίζεται αρνητικά με την περιεκτικότητα σε υγρασία των φυτών, ενώ το φορτίο καυσίμου επηρεάζει άλλα στοιχεία της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς, όπως ένταση της πυρκαγιάς. Η παροχή καυσίμου και οι δομικές αλλαγές έχουν συσχετιστεί με την ηλικία των φυτών, υποδεικνύοντας ότι αυτά τα στοιχεία επηρεάζουν τη συμπεριφορά πυρκαγιάς. Πιο συγκεκριμένα για την ηλικία στο παράδειγμα των θάμνων. Σε σύγκριση με τους νεότερους θάμνους, οι ώριμοι θάμνοι έδειξαν υψηλότερο φορτίο καυσίμου, ένταση πυρκαγιάς και ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς.

Σε μελέτη για τις πυρκαγιές τύρφης στην Ινδονησία, οι δείκτες βλάστησης και νερού ήταν πιο χρήσιμοι για την εξήγηση των πυρκαγιών στην περιοχή από ό, τι οι θερμοκρασίες της επιφάνειας και του αέρα, αν και συνέβαλαν στην κατανόηση της ευαισθησίας των δασών. Αξιοσημείωτο επίσης είναι σε έρευνα στη βορειοανατολική Ισπανία, το ποσοστό κάλυψης κομοστέγης (canopy cover) και η διαθεσιμότητα καυσίμου έχουν αρνητική συσχέτιση, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι εκτάσεις με υψηλότερο ποσοστό κάλυψης κομοστέγης

(canopy cover) είχαν μικρότερες διαφορές στη διαθεσιμότητα καυσίμου, οι οποίες αποτελούν ένδειξη λιγότερο έντονων πυρκαγιών, και αντίστροφα. Ομοίως άλλη μελέτη προσδιόρισε σημαντική σχέση με παράγοντες που σχετίζονται με την εδαφοκάλυψη όπως το μέγεθος των δέντρων ή τη βιομάζα της έκτασης, το μέσο όρο κάλυψης κομοστέγης και της ετήσιας διαθεσιμότητας υγρασίας. Αυτά τα ευρήματα έρχονται σε σύγκριση με τα αποτελέσματα προηγούμενων μελετών όπου η παρουσία μεγάλων δέντρων συνδέθηκε με χαμηλότερα έντονη πυρκαγιά. Το ποσοστό κάλυψης κομοστέγης αποδείχθηκε ότι είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την εξήγηση της διαφοράς στη διαθεσιμότητα καυσίμου, υποδεικνύοντας ότι οι εκτάσεις με ένα υψηλότερο ποσοστό καλύψεως κομοστέγης εμφανίζουν λιγότερο σοβαρές πυρκαγιές. Η συμβολή της κομοστέγης εξηγείται στο ότι η κομοστέγη αναστέλλει την ανάπτυξη ενός πυκνού υποστρώματος θάμνων ή νεαρών δέντρων, αυτό το πυκνό υπόστρωμα αυξάνει την κατακόρυφη συνέχεια καυσίμου και την ευκολία καύσης τους σε μια πυρκαγιά.

Όσον αφορά τον τύπο της εδαφοκάλυψης και την συμβολή του στην διάδοση πυρκαγιάς. Σε έρευνα στην γαλλία η σκληροφυλλική βλάστηση υπήρξε η κυρίαρχη αιτία των καμένων εκτάσεων, αποδεικνύοντας τον σημαντικό ρόλο της στη διάδοση των πυρκαγιών. Τα δεδομένα δείχνουν πώς, κατά τη διάρκεια των καθορισμένων περιόδων, άλλαξαν τα πρότυπα των πυρκαγιών σε διάφορους τύπους καυσίμων. Κατά τη διάρκεια της μελέτης, η σκληροφυλλική βλάστηση αποτελούσε συνεχώς το μεγαλύτερο ποσοστό της καμένης έκτασης και παρέμεινε κυρίαρχη, τα κωνοφόρα δάση έδειξαν μέτρια αύξηση, ενώ τα μικτά δάση έδειχναν μια τάση μείωσης. Οι πληροφορίες υπογραμμίζουν τον τρόπο με τον οποίο η δυναμική των επιπτώσεων της φωτιάς σε διάφορους τύπους βλάστησης έχουν αλλάξει με την πάροδο των ετών. Παρόλο που το γρασίδι είναι η λιγότερο διαδεδομένη μορφή και έχει ελαφρώς μικρότερη κάλυψη συνολικά, το μερίδιό του στην περιοχή που κάηκε είναι είτε ίσο ή υψηλότερο από εκείνο των άλλων τύπων καυσίμων που ακολουθούν σκληροφυλλική. Οι φυσικές χορτολιβαδικές περιοχές είχαν υψηλή ευαισθησία σε πυρκαγιά, λόγω του λεπτού καυσίμου αδυναμία διατήρησης υγρασία κλπ. Αντίθετα, ακόμη και σε χρόνια που υπάρχουν μεγάλες πυρκαγιές, τα κωνοφόρα εκθέτουν ένα χαμηλό ποσοστό καμένων εκτάσεων. Τα κωνοφόρα δάση είναι η λιγότερο επιρρεπής σε πυρκαγιά, παρά το γεγονός ότι ταξινομείται ως πυροφιλική εδαφοκάλυψη. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η πλειοψηφία των κωνοφόρων δασών βρίσκονται σε ζώνες υψηλού υψομέτρου όπου υπάρχουν λιγότερες πυρκαγιές

Έπειτα ακολουθούν οι κλιματικοί παράγοντες. Η ταχύτητα του ανέμου έχει σημαντική επίδραση στο μήκος, το ποσοστό εξάπλωσης και την κάλυψη των πυρκαγιών. Τα ποσοστά διάδοσης πυρκαγιάς σε πραγματικό χρόνο και η απόδοση μεταφοράς θερμότητας επηρεάζονται άμεσα από τη συνδυασμένη επίδραση της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου. Ο άνεμος επιταχύνει την ξήρανση του καυσίμου, παρέχει οξυγόνο και επιταχύνει της διάδοση πυρκαγιών. Λόγω της ορμής που φέρει ο άνεμος, καύτρες μπορούν να μεταφερθούν σε μέρη του δάσους που δεν έχουν καεί και τη δημιουργία νέων πηγών ανάφλεξης κατά μήκος της άκρης της φωτιάς. Αυτό το φαινόμενο παίζει ρόλο στην ταχεία εξάπλωση των πυρκαγιών. Επειδή η ταχύτητα του ανέμου έχει σημαντική επίδραση στη μετάδοση θερμότητας και επιταχύνει την εξάπλωση της πυρκαγιάς, είναι γενικά αποδεκτό ότι η ταχύτητα ανέμου είναι το βασικό στοιχείο που ελέγχει τη συμπεριφορά της φωτιάς.

Υπάρχουν τρεις τύποι πυρκαγιάς: κατευθυνόμενη πυρκαγιά (heading fire), η οποία εξαπλώνεται με τον άνεμο, έναντι πυρκαγιά (backing fire), η οποία εξαπλώνεται εναντίον του ανέμου, και πλευρική φωτιά (flanking fire). Οι κατευθυνόμενες πυρκαγιές είναι πιο σοβαρές από τις πλευρικές και έναντι πυρκαγιές λόγω της αυξημένης ταχύτητας του ανέμου ή της κλίσης. Οι ισχυρές, μαζικές πυρκαγιές προκαλούνται κυρίως από μετεωρολογικούς παράγοντες, ιδιαίτερα όταν ξεκινούν ως κατευθυνόμενες φωτιές (heading) που επεκτείνονται κατά μήκος της κύριας κλίσης και της κατεύθυνσης του ανέμου ή κατά τη διάρκεια της

ημέρας σε εξαιρετικά ευνοϊκές συνθήκες. Από την άλλη πλευρά, οι μικρές κλιματολογικές διακυμάνσεις που προκαλούνται από την τοπογραφία και τη δομή της βλάστησης συνδέονται με το μοτίβο της πυρκαγιάς σε περιοχές όπου η συμπεριφορά πυρκαγιάς δεν ταιριάζει με αυτές τις ακραίες συνθήκες. Σύμφωνα με μελέτη, η εστίαση των προσπαθειών εξάλειψης στις βόρειες πτυχές και στις περιοχές όπου η πυρκαγιά προχωρεί ως πλευρική ή έναντι φωτιά ενδέχεται να έχει μεγαλύτερες πιθανότητες επιτυχίας από ό, τι στις νότιες πλευρές και τις κατευθυνόμενες πυρκαγιές, δεδομένης της ακραίας δυσκολίας και συχνά της αδυναμίας καταπολέμησης φωτιών υπό σοβαρές μετεωρολογικές συνθήκες και υψηλής έντασης.

Μια σημαντική πτυχή που επηρεάζει το πόσο γρήγορα εξαπλώνονται οι πυρκαγιές είναι η καθίζηση (precipitation). Η αύξηση των βροχοπτώσεων την ημέρα της πυρκαγιάς και κατά τη διάρκεια της εβδομάδας προκαλεί το περιβάλλον να γίνει πιο υγρό και εύφλεκτα υλικά για να περιέχουν περισσότερη υγρασία, η οποία επιβραδύνει την εξάπλωση της φωτιάς. Για να κατανοήσουμε την επίδρασή της στην εξάπλωση των πυρκαγιών, η θερμοκρασία είναι μια άλλη σημαντική μετεωρολογική συνιστώσα που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Ενώ παράλληλα, ειδικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι ημερήσιες και εβδομαδιαίες μέσες θερμοκρασίες. Επιπρόσθετα, υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους η θερμοκρασία επηρεάζει το πόσο γρήγορα εξαπλώνονται οι πυρκαγιές. Από τη μία πλευρά, οι αυξανόμενες θερμοκρασίες επιταχύνουν την ανάπτυξη των πυρκαγιών με τη μείωση της υγρασίας και τη γρήγορη μείωση των υγρών εύφλεκτων υλικών. Από την άλλη πλευρά, άλλες έρευνες δείχνουν ότι οι ασυνήθιστα υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να αποτρέψουν την εξάπλωση των πυρκαγιών. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί από μια σχέση κατώτατου ορίου μεταξύ της θερμοκρασίας και των εύφλεκτων υλικών, όπου η θερμοκρασία έχει περιορισμένη επίδραση σε αυτά τα υλικά πέρα από ένα ορισμένο όριο.

Ο συνδυασμός διαφορετικών συνθηκών της βλάστησης και κλιματικής μεταβλητότητα δημιουργούν μοναδικά κλιματολογικά πρότυπα σε διαφορετικά μέρη. Η περίοδος των πυρκαγιών τόσο στο Βόρειο όσο και στο Νότιο ημισφαίριο ξεκινάει σε περιοχές χαμηλότερου γεωγραφικού πλάτους και κινείται προς τα πάνω προς τα υψηλότερα πλάτη καθώς η ζεστή εποχή προχωρά κατά τη διάρκεια της τροχιάς της Γης γύρω από τον ήλιο. Σημαντικές ετήσιες κλιματικές διακυμάνσεις που επηρεάζουν τη διάρκεια των εποχών καλλιέργειας, τις παραλλαγές χιονιού και το λιώσιμο του χιονιού έχουν σημαντικό αντίκτυπο στο πότε αρχίζουν και τελειώνουν οι περίοδοι κινδύνου και διάδοσης πυρκαγιάς. Επίσης, η συχνότητα και η συμπεριφορά των πυρκαγιών επηρεάζονται σημαντικά από τις καθημερινές ακραίες συνθήκες στο ιστορικό κλίμα. Είναι ευρέως γνωστό ότι τα ακραία καιρικά φαινόμενα που επηρεάζουν το παγκόσμιο κλίμα συνδέονται με μαζικές πυρκαγιές που απαιτούν σημαντικά μέτρα ελέγχου. Παρόμοια, η μικρής χρονικής κλίμακας χωρικές ανωμαλίες στα πρότυπα καθίζησης προκύπτουν από την σχεδόν τυχαία κατανομή των θερμών εποχιακών συμπυκνωτικών βροχοπτώσεων. Αλλά σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες, όπως οι εποχές, μπορεί να εμφανιστούν πιο έντονα πρότυπα, τα οποία στη συνέχεια θα συμβάλλουν σε γεγονότα όπως ξηρασία ή πλημμύρες. Είναι εμφανές ότι οι συνθήκες κλίμα και εδάφους είναι αλληλένδετες διότι η υγρασία της εδαφοκάλυψης ελέγχεται από μεταβλητές όπως ξηρασία η πλημμύρες

Παράλληλα, η ατμοσφαιρική υγρασία, η οποία παίρνει τη μορφή υδρατμών και καθίζησης, επειδή επηρεάζει την υγρασία του καυσίμου τόσο της ζωντανής όσο και της νεκρής βλάστησης έχει κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό της εμφάνισης και της συμπεριφοράς των πυρκαγιών. Έχει σημειωθεί ότι τα υψηλότερα επίπεδα υγρασίας των καυσίμων εμποδίζουν την καύση όπως αναφέρθηκε στους παράγοντες εδαφοκάλυψης, μειώνουν την θέρμανση των καυσαερίων και καθιστούν δυσκολότερη την ανάφλεξη. Μέσω της εξάτμισης, τα καύσιμα απελευθερώνουν υγρασία στην ατμόσφαιρα σε περιοχές που είναι επιρρεπείς σε πυρκαγιές, όπου η συχνότητα εξάτμισης συχνά υπερβαίνει τη συχνότητα συμπύκνωσης

Όσον αφορά τη τοπογραφία, η κλίση επηρεάζει την περιεκτικότητα σε υγρασία των εύφλεκτων υλικών, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει τον τρόπο συμπεριφοράς των πυρκαγιών. Επειδή υπάρχει λιγότερος χρόνος για την κατακράτηση νερού μετά από βροχές, τα υλικά στεγνώνουν πιο γρήγορα σε απότομες πλαγιές ενώ οι ήπιες πλαγιές, από την άλλη πλευρά, διατηρούν περισσότερο νερό από βροχοπτώσεις, γεγονός που αυξάνει την υγρασία και μειώνει τον κίνδυνο πυρκαγιών. Οι αλλαγές στην κλίση επηρεάζουν τη χωρική σχέση μεταξύ καμένων επιφανειών και άκαυστων εύφλεκτων υλικών, η οποία επηρεάζει τον ρυθμό με τον οποίο εξαπλώνεται μια πυρκαγιά. Μεγαλύτερες περιοχές ταξινομούνται ως με μέτρια ή υψηλή ευαισθησία στην εξάπλωση των πυρκαγιών όταν λαμβάνεται υπόψη η κλίση του εδάφους. Λαμβάνοντας υπόψη και τις τρεις μεταβλητές μαζί (κλίση, υψόμετρο, προσανατολισμός), προκύπτει μια αξιόπιστη εκτίμηση της πιθανής εξάπλωσης των πυρκαγιών, ακόμη και μόνη της η κλίση δεν μπορεί να είναι επαρκής για τον προσδιορισμό των τόπων που είναι ευαίσθητα σε πυρκαγιές. Έρευνα έχει δείξει ότι η κλίση εδάφους έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς (Rate of spread). Επιπλέον, παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας κατά 0,5 βαθμούς Κελσίου για κάθε 100 μέτρα αύξησης ύψους\

Η τοπογραφία λειτουργεί ως ένα σταθερό πρότυπο που επηρεάζει μια σειρά μεταβλητών, συμπεριλαμβανομένων των καιρικών συνθηκών, της συμπεριφοράς πυρκαγιάς και της δυναμικής της βλάστησης. Οι βόρειες πλαγιές βιώνουν μεγαλύτερα διαστήματα ανάκαμψης και ηπιότερη πυρκαγιά, καθώς είναι συχνά πιο δροσερές, υγρότερες από τις νότιες, λόγω της χαμηλότερης ηλιακής ακτινοβολίας τους. Επιπρόσθετα, ο προσανατολισμός μιας πλαγιάς επηρεάζει το πόσο φως του ήλιου λαμβάνει. Μελέτες υποδεικνύουν ότι η χλωρίδα και το έδαφος στις νότιες πλαγιές είναι ξηρότερη από εκείνες τις πλαγιές που στρέφονται προς άλλες κατευθύνσεις. Η ισχυρότερη ηλιακή ακτινοβολία στις ηλιόλουστες πλαγιές προκαλεί χαμηλότερη υγρασία και ξηρότερες συνθήκες, γεγονός που επιταχύνει την εξάπλωση των πυρκαγιών. Σε αντίθεση με τις ηλιόλουστες πλαγιές, οι σκιασμένες πλαγιές έχουν χαμηλότερο επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας, υψηλότερα επίπεδα υγρασίας και χαμηλότερα ποσοστά εξάπλωσης της πυρκαγιάς

Τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά, όπως οι δίοδοι κρύου αέρα, παράγουν μικροκλίματα όπου η συμπεριφορά της πυρκαγιάς μπορεί να ποικίλει δραματικά. Σε αντίθεση, η τοπογραφία μπορεί να λειτουργεί και ως εμπόδιο στην εξάπλωση της πυρκαγιάς, όπως οι πλαγιές, ή οι βράχοι, προκαλώντας τη συμπυκνωτική προθέρμανση των καυσίμων προς τα πάνω από το μέτωπο της φλόγας. Πυρανθεκτικές εστίες – περιοχές με παρατεταμένα διαστήματα χωρίς πυρκαγιά – μπορούν να παραχθούν από αυτά τα χαρακτηριστικά, τα οποία μπορούν να αφήσουν το τοπίο με ξεχωριστά και ανθεκτικά μοτίβα βλάστησης. Επειδή η συναγωγική θέρμανση εμφανίζεται σε απότομες πλαγιές, οι πυρκαγιές συνήθως εξαπλώνονται πιο γρήγορα προς τα πάνω. Οι κορυφογραμμές μπορούν φυσικά να εμποδίσουν την εξάπλωση της πυρκαγιάς δημιουργώντας διακοπές πτυχών και αλλάζοντας τις συνθήκες βλάστησης και καυσίμου. Οι λόφοι δεν χρησιμεύουν πάντα ως αδιαπέραστα εμπόδια. Οι πυρκαγιές μπορούν να περάσουν πάνω τους και να κατεβούν, ειδικά σε περίπτωση μείωσης των ανέμων. Υπό ορισμένες συνθήκες ανέμου και καυσίμου, οι κορυφογραμμές μπορεί να έχουν έμμεση επίδραση στο πόσο αποτελεσματικοί είναι οι γειτονικοί πυθμένες της κοιλάδας σε αυτή την κατάσταση.

Σε μεγάλη έρευνα στη νότια γαλλία, τα δεδομένα δείχνουν ότι οι νότιες πλαγιές (νοτιοανατολική και νοτιοδυτική) είναι εκεί όπου βρίσκεται πιο συχνά καμένη περιοχή, με χαμηλότερη επικράτηση στις βορειοδυτικές και βορειοανατολικές. Οι βορειοανατολικές και νοτιοδυτικές πλευρές καίγονται λιγότερο, ενώ οι πλαγιές που στρέφονται προς το βορρά καίγονται αναλογικά περισσότερο κάθε δεκαετία, σε αντίθεση με τις προσδοκίες. Σε γενικές γραμμές, οι αναλογικές τιμές όλων των νότιων πλαγιών τείνουν να ισοδυναμούν ή ακόμη και να υπερβαίνουν εκείνες των βορειο προσανατολισμένων στη πάροδο του χρόνου. Επιπλέον,

οι πλαγιές μικρότερες των 30° παρουσιάζουν ξεκάθαρες διαφορές από εκείνες άνω των 30° , ενώ οι πλαγιές μικρότεροι από 30° δεν παρουσιάζουν διακριτές διακυμάνσεις. Το κλάσμα των καμένων περιοχών μειώνεται απότομα σε 30° . Αν και αποτελούν ένα πολύ μικρό ποσοστό της δασικής γης, πολύ απότομες δασικές πλαγιές -κυρίως στο ανατολικό τμήμα της περιοχής έρευνας- βιώνουν μεγαλύτερο ποσοστό πυρκαγιάς από τις ήπιες. Ως αποτέλεσμα, η συγκέντρωση είναι στην περιοχή $0-40^\circ$. Με εξαίρεση το 2010-2019, η πλειονότητα καμένης περιοχής συμβαίνει σε ενδιάμεσες πλαγιές $20^\circ-30^\circ$. Οι αυξημένες ταχύτητες εξάπλωσης και η ένταση πυρκαγιάς είναι τα άμεσα αποτελέσματα της προώθησης της κλίσης των πλαγιών της πιο αποτελεσματικής μεταφοράς θερμότητας ακτινοβολίας. Η κλίση της πλαγιάς επηρεάζει επίσης έμμεσα την καταστολή πυρκαγιάς και την ανάφλεξη μέσω στοιχείων όπως η πυκνότητα καυσίμων, η υγρασία, η προσβασιμότητα και οι διακυμάνσεις στην ηλιακή ακτινοβολία. Σύμφωνα με την ανάλυση, οι πλαγιές με χαμηλότερες κλίση έχουν μικρότερη αναλογική καμένη περιοχή, με εξαίρεση την περίοδο 2010-2019. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι τα πρώτα μέτρα καταστολής ήταν πιο επιτυχημένα λόγω της λιγότερο αποδοτικής μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας στις επίπεδες πλαγιές, της μεγαλύτερης πυκνότητας ανθρώπινων οικισμών και της ευκολότερης προσβασιμότητας.

Μοντελοποίηση διάδοσης πυρκαγιών

Η μοντελοποίηση των πυρκαγιών είναι ένα αρκετά δύσκολο εγχείρημα για τους ερευνητές λόγω της πολυπλοκότητας Φυσικής, Χημείας και υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεων για την επίλυση των φυσικών μοντέλων και την δυσκολία για τη διεκρίνιση των παραμέτρων εισαγωγής. Η μετάδοση θερμότητας και η ανάφλεξη των διαδοχικών καυσίμων στις πυρκαγιές δεν είναι πλήρως γνωστές παρόλο που βασίζονται σε βασικές αλληλεπιδράσεις καύσης στερεάς και αέριας φάσης. Λόγω της πολυπλοκότητας, η εμπειριστατωμένη εκτίμηση πάνω στο φαινόμενο είναι απαραίτητη για τις αποφάσεις την πρόληψη και πυρόσβεση των πυρκαγιών. Μια κεντρική παράμετρος υπολογισμού στις πυρκαγιές είναι η ταχύτητα διάδοσης (rate of spread) ως συνάρτηση πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων καύσης, παροχής ανέμου και ατμοσφαιρικών συνθηκών. Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενα κεφάλαια, παράγοντες εδαφοκάλυψης(είδος, σύσταση, ποσότητα), τοπογραφίας(όπως κλίση) και καιρικών φαινομένων(άνεμος) είναι από τις κύριες μεταβλητές για αυτο το φαινόμενο

Οι βασικοί τρόποι μοντελοποίησης διάδοσης πυρκαγιάς είναι οι εξής: μοντέλα με μεθόδους κατηγοριοποίησης σε κυψέλες ενός χώρου, μαθηματικά μοντέλα και συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών(GIS), τα μοντέλα διάδοσης περιμέτρου φωτιάς, τα βασισμένα σε αρχές υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Στα μοντέλα κατηγοριοποίησης σε κυψέλες, μια περιοχή διακριτοποιείται σε ένα πλέγμα όπου διατίθενται όλα τα δεδομένα εισαγωγής, έπειτα υπολογισμοί και εμπειρικές ή φυσικές σχέσεις ανανεώνουν τη κατάσταση του πλέγματος σύμφωνα με κατεύθυνση ανέμου, ένταση και άλλων παραμέτρων σε βάθος χρόνου.

Παραδείγματα είναι το FireStation και FIREMAP όμως αυτά του είδους τα μοντέλα είναι ελλιπή μπροστα στα διάδοσης περιμέτρου διότι η διακριτοποίηση παραμορφώνει το πραγματικό σχήμα φωτιάς. Όσον αφορά τα μαθηματικά μοντέλα, περιγράφουν ένα σύστημα που χρησιμοποιεί μαθηματικές έννοιες για να περιγράψει ένα φαινόμενο όπως η ταχύτητα διάδοσης, η βασική τους χρήση είναι στην ανάπτυξη λογισμικού για προσομοίωση διάδοσης φωτιάς σε διαφορετικές ρυθμίσεις εδάφους και περιβάλλοντος όπως το BEHAVE και FARSITE. Τέλος, τα μοντέλα γεωγραφικών πληροφοριών αποθηκεύουν, αναπαράγουν και επεξεργάζονται χωρικά δεδομένα τα οποία αποθηκεύονται σε μια δομή πλέγματος και κάθε κελί αντιστοιχεί σε ένα ομοιογενές οικόπεδο

Όσον αφορά, τα μοντέλα διάδοσης περιμέτρου, τα οποία εφαρμόζουν εμπειρικές εξισώσεις για τη ταχύτητα διάδοσης όπως το μοντέλο του Rothermel, για τη προσομοίωση της

διάδοσης της περιμέτρου της φωτιάς. Τα μοντέλα αυτά προσομοιώνουν διάδοση φωτιάς σε μεγάλη κλίμακα σε μία έκταση αντί να λύνουν απευθείας φυσικές και χημικές αρχές των πυρκαγιών.

Τα μοντέλα βασισμένα σε υπολογιστική ρευστομηχανική, τα οποία προσπαθούν στη προσέγγιση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς βάσει αρχών καύσης και διαδικασιών μεταφοράς θερμότητας. Βασίζονται στις εξισώσεις Navier-Stokes με επικουρικές σχέσεις για παράγοντες όπως χημικές αντιδράσεις, φαινόμενα τύρβης και μετάδοσης θερμότητας. Επιπλέον βασίζονται σημαντικά λιγότερο σε πειραματικές σχέσεις και το μοντέλο του Linn είναι ένα πολύ καλό πρότυπο. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται για να λύσει εξισώσεις τυπικής ατμόσφαιρας μέσω ενός πλήρως συμπιεστού ρευστού ως μέσο για αναπαράσταση συνδυαστικών αλληλεπιδράσεων καύσης, ρευστομηχανικής, μετάδοσης θερμότητας των πυρκαγιών σε ένα πεδίο και χρησιμοποιεί το λογισμικό HIGRAD//FIRETEC. Εν κατακλείδι, η μελλοντική προσπάθεια των ερευνητών στοχεύεται σε αμφισυνδεδεμένα μοντέλα πρόβλεψης καιρού και διάδοσης πυρκαγιών

Πιο συγκεκριμένα, για το μοντέλο του Rothermel, η εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης (rate of spread) και ένταση της φωτιάς γίνεται σε ένα συνεχές στρώμα καυσίμου. Σημαντική παρατήρηση και πρώτο ελάττωμα του μοντέλου είναι ότι δεν εφαρμόζεται σε επικόρυφες πυρκαγιές (crown fires) αλλά εφαρμόζεται για επιφανειακές (ground fires). Θεώρηση του μοντέλου είναι ότι αφορά νεκρά καύσιμα σε ομοιογενές στρώμα ενωμένο με το έδαφος. Το μοντέλο είναι χρήσιμο για καύσιμα όπως το γρασίδι, πευκοβελόνες και θαμνώδη πεδία ενώ είναι προφανές ότι το μοντέλο υστερεί σε πιο περίπλοκες περιπτώσεις του φαινομένου. Η εφαρμογή του μοντέλου από τον Rothermel προδιαγράφει τρεις προσεγγίσεις. Πρώτον, η χρήση υποθετικών πυρκαγιών στην εκτίμηση των καυσίμων, τη πυρόσβεση και το σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης. Δεύτερον, στη χρήση αξιολόγησης πιθανών πυρκαγιών, για την οποία απαιτείται προκαταρκτικός σχεδιασμός καταστολής και αξιολόγηση κινδύνου της φωτιάς. Η πιο χρήσιμη λειτουργία που μπορεί να είναι σε θέση να παρέχει η μοντελοποίηση της πυρκαγιάς είναι οι προβλέψεις της πιθανής σοβαρότητας της φωτιάς για διάφορες στρατηγικές διαχείρισης (όπως μείωση καυσίμου ή προδιαγεγραμμένες φωτιές). Μια τρίτη πιθανή χρήση, η πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ενεργών πυρκαγιών, θα απαιτήσει πολύ περισσότερη πολυπλοκότητα από ό, τι το μοντέλο αυτό. Οι μεταβολές του καιρού και του καυσίμου οδηγούν σε αποκλίσεις από την αναμενόμενη εξάπλωση και ένταση, δημιουργώντας κινδύνους που είναι ακατάλληλοι για χρήση σε πυροσβεστικές επιχειρήσεις

Εν αντιθέση, το μοντέλο του Linn είναι σημαντικά πιο περίπλοκο καθώς σκοπεύει να επιτύχει τον αυτοπροσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης της φωτιάς πέραν εισαγωγής κάποιον βασικών συνοριακών συνθηκών όπως κατανομή καυσίμου και αρχικών συνθηκών ταχύτητας. Το μοντέλο βασίζεται σε φαινόμενα μεταφοράς με εφαρμογή εξισώσεων διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας, συνδυαστικά με χημικές εξισώσεις καύσης. Το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα έκφρασης πολλών διαφορετικών ειδών εδαφοκάλυψης καθώς και μη ομογενή βλάστηση και έδαφος, σε αντίθεση με το μοντέλο του Rothermel ενώ επιπλέον είναι ικανό να μοντελοποιήσει και επικόρυφες πυρκαγιές (crown fires). Το μειονέκτημα του είναι ότι με τη διευκόλυνση για μικρότερη ανάγκη από πειραματικές εξισώσεις απαιτείται μεγαλύτερος όγκος υπολογισμού. Η αξιοποίηση του μοντέλου είναι παρόμοια με του μοντέλου του Rothermel για εκτίμηση της πυρόσβεσης, την αξιολόγηση πιθανών πυρκαγιών και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενεργών πυρκαγιών. Εν κατακλείδι, η μελλοντική προσπάθεια των ερευνητών στοχεύεται σε αμφισυνδεδεμένα μοντέλα πρόβλεψης καιρού και διάδοσης πυρκαγιών για τη μεγιστή αποτελεσματικότερη περιγραφή του φαινομένου.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. “What Are the Differences between a Ground Fire and a Surface Fire?” WorldAtlas, 3 Oct. 2018, www.worldatlas.com/articles/what-are-the-differences-between-a-ground-fire-and-a-surface-fire.html/.
2. “Understanding the Different Types of Wildfires.” WFCAs, 5 July 2022, wfca.com/wildfire-articles/types-of-wildfire/. Accessed 9 Nov. 2023.
3. Snow, Meghan. “How Does Wildfire Impact Wildlife and Forests? | U.S. Fish & Wildlife Service.” FWS.gov, 7 Oct. 2022, www.fws.gov/story/2022-10/how-does-wildfire-impact-wildlife-and-forests.
4. Thomson, Freya. “Record-Breaking Amount of Carbon Dioxide Emissions from Wildfires in 2021.” Open Access Government, 7 Mar. 2023, www.openaccessgovernment.org/record-breaking-amount-carbon-dioxide-emissions-wildfires-2021/154310/.
5. Borgschulte, Mark, et al. Air Pollution and the Labor Market: Evidence from Wildfire Smoke. 1 Apr. 2022, <https://doi.org/10.3386/w29952>. Accessed 22 June 2023.
6. Aguilera, Rosana, et al. “Wildfire Smoke Impacts Respiratory Health More than Fine Particles from Other Sources: Observational Evidence from Southern California.” *Nature Communications*, vol. 12, no. 1, 5 Mar. 2021, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21708-0>.
7. Xu, Rongbin, et al. “Wildfires, Global Climate Change, and Human Health.” *New England Journal of Medicine*, vol. 383, no. 22, 9 Oct. 2020, www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMSr2028985, <https://doi.org/10.1056/nejmsr2028985>.
8. Bramwell, Lincoln. *The History of Wildland Firefighting*. National Interagency Fire Center.
9. United Nations Environment Programme. “Number of Wildfires to Rise by 50% by 2100 and Governments Are Not Prepared, Experts Warn.” UN Environment, 23 Feb. 2022, www.unep.org/news-and-stories/press-release/number-wildfires-rise-50-2100-and-governments-are-not-prepared.
10. “Wildfire Risk Has Increased, but We Can Still Influence Where and How Fires Strike.” World Economic Forum, 7 July 2022, www.weforum.org/agenda/2022/07/climate-change-wildfire-risk-has-grown-nearly-everywhere-but-we-can-still-influence-where-and-how-fires-strike/.
11. Jordan, Rob. “Wildfire Solutions.” Stanford News, 23 Mar. 2021, news.stanford.edu/2021/03/23/wildfire-solutions/.
12. Ganteaume, A.; Camia, A.; Jappiot, M.; San-Miguel-Ayán, J.; Long-Fournel, M.; Lampin, C. A Review of the Main Driving Factors of Forest Fire Ignition Over Europe. *Environ. Manag.* 2013, 51, 651–662. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9961-z>
13. Badia-Perpinya, A.; Pallares-Barbera, M. Spatial distribution of ignitions in Mediterranean periurban and rural areas: The case of Catalonia. *Int. J. Wildl. Fire* 2006, 15, 187–196.
14. Romero-Calcerrada, R.; Novillo, C.J.; Millington, J.D.A.; Gomez-Jimenez, I. GIS Analysis of Spatial Patterns of Human-Caused Wildfire Ignition Risk in the SW of Madrid (Central Spain). *Landsc. Ecol.* 2008, 23, 341–354. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9190-2>.
15. Cardille, J.A.; Ventura, S.J.; Turner, M.G. Environmental and social factors influencing wildfires in the Upper Midwest, United States. *Ecol. Appl.* 2001, 11, 111–127.
16. Setiawan, I.; Mahmud, A.R.; Mansor, S.; Shariff, A.R.M.; Nuruddin, A.A. GIS-grid-based and multi-criteria analysis for identifying and mapping peat swamp forest fire hazard in Pahang, Malaysia. *Disaster Prev. Manag. Int. J.* 2004, 13, 379–386.
17. Dickson BG, Prather JW, Xu Y, Hampton HM, Aumack EN, Sisk TD

- (2006) Mapping the probability of large fire occurrence in northern Arizona. USA Landsc Ecol 2:747–761
18. Mitchell, Joseph W. “Power Line Failures and Catastrophic Wildfires under Extreme Weather Conditions.” *Engineering Failure Analysis*, vol. 35, Dec. 2013, pp. 726–735, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.07.006>.
 19. Oliveira, S.; Moreira, F.; Boca, R.; San-Miguel-Ayanz, J.; Pereira, J.M.C. Assessment of fire selectivity in relation to land cover and topography: A comparison between southern European countries. *Int. J. Wildl. Fire* 2014, 23, 620–630.
 20. Moreira F, Viedma O, Arianoutsou M, Curt T, Koutsias N, Rigolot E, Barbati A, Corona P, Vaz P, Xanthopoulos G, Mouillot F, Bilgili E (2011) Landscape – wildfire interactions in southern Europe: implications for landscape management. *Journal of Environmental Management* 92, 2389–2402. doi:10.1016/J.JENVMAN.2011.06.028
 21. Mermoz M, Kitzberger T, Veblen TT (2005) Landscape influences on occurrence and spread of wildfires in Patagonian forests and shrublands. *Ecology* 86, 2705–2715. doi:10.1890/04-1850
 22. Haight, R.G.; Cleland, D.T.; Hammer, R.B.; Radeloff, V.C.; Rupp, T.S. Assessing fire risk in the wildland-urban interface. *J. Forest* 2004, 102, 41–48.
 23. Gonzalez, J.R.; Palahi, M.; Trasobares, A.; Pukkala, T. A fire probability model for forest stands in Catalonia (north-east Spain). *Ann. Forest Sci.* 2006, 63, 169–176.
 24. Anne Ganteaume A D; Corinne Lampin-Maillet A , Mercedes Guijarro B , Carmen Hernando B, Marielle Jappiot A 18 ; Teresa Fonturbel C , Pedro Pérez-Gorostiaga C and José A. Vega C Spot fires: Fuel bed flammability and capability of firebrands to ignite fuel beds
 25. Paschalidou, A.K.; Kassomenos, P.A. What are the most fire-dangerous atmospheric circulations in the Eastern-Mediterranean? Analysis of the synoptic wildfire climatology. *Sci. Total Environ.* 2016, 539, 536–545.
 26. Koutsias, N., Arianoutsou, M., Kallimanis, A.S., Mallinis, G., Halley, J.M., Dimopoulos, P., 2012. Where did the fires burn in Peloponnisos, Greece the summer of 2007? Evidence for a synergy of fuel and weather. *Agric. For. Meteorol.* 156, 41–53.
 27. Ganteaume, A.; Camia, A.; Jappiot, M.; San-Miguel-Ayanz, J.; Long-Fournel, M.; Lampin, C. A Review of the Main Driving Factors of Forest Fire Ignition Over Europe. *Environ. Manag.* 2013, 51, 651–662. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9961-z>
 28. Vazquez A, Moreno JM (2001) Spatial distribution of forest fires in Sierra de Gredos (Central Spain). *Forest Ecol Manag* 147:55–65
 29. Chuvieco, E. and Congalton, R.G. (1989), “Application of remote sensing and geographic information system to forest fire hazard mapping”, *Journal of Remote Sensing Environment*, Vol. 29, pp. 147-59.
 30. Jo, M.H., Lee, M.B., Lee, S.Y., Jo, Y.W. and Baek, S.R. (2000), “The development of forest fire forecasting system using internet GIS and satellite remote sensing”, www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ps3/ps310.shtml
 31. Qiu, Linghua, et al. “High-Resolution Mapping of Wildfire Drivers in California Based on Machine Learning.” *Science of the Total Environment*, vol. 833, Aug. 2022, p. 155155, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155155>.
 32. Tong, Qi, and Thomas Gernay. “Mapping Wildfire Ignition Probability and Predictor Sensitivity with Ensemble-Based Machine Learning.” *Natural Hazards*, vol. 119, no. 3, 12 Sept. 2023, pp. 1551–1582, <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06172-x>.
 33. Christos Bountzouklis, et al. “Predicting Wildfire Ignition Causes in Southern France Using EXplainable Artificial Intelligence (XAI) Methods.” *Environmental Research Letters*, vol. 18, no. 4, 1 Apr. 2023, pp. 044038–044038, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acc8ee>.

- 34..Holsinger, Lisa, et al. "Weather, Fuels, and Topography Impede Wildland Fire Spread in Western US Landscapes." *Forest Ecology and Management*, vol. 380, Nov. 2016, pp. 59–69, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.035>. Accessed 11 Dec. 2019.
- 35.Povak, Nicholas, et al. *Article E02443*. Vol. 9, no. 10, 2018
www.fs.fed.us/pnw/pubs/journals/pnw_2018_povak001.pdf,<https://doi.org/10.1002/ecs2.244>
- 36.Narayanaraj, Ganapathy, and Michael C. Wimberly. "Influences of Forest Roads and Their Edge Effects on the Spatial Pattern of Burn Severity." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 23, Aug. 2013, pp. 62–70, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.12.006>. Accessed 6 Apr. 2021.
- 37.Price, Owen F., et al. "Role of Weather and Fuel in Stopping Fire Spread in Tropical Savannas." *Austral Ecology*, vol. 39, no. 2, 29 Jan. 2013, pp. 135–144, <https://doi.org/10.1111/aec.12021>. Accessed 16 Oct. 2020.
- 38.Sun, Jingjing, et al. "Facing the Wildfire Spread Risk Challenge: Where Are We Now and Where Are We Going?" *Fire*, vol. 6, no. 6, 1 June 2023, p. 228, www.mdpi.com/2571-6255/6/6/228, <https://doi.org/10.3390/fire6060228>.
39. Benson, Randall P., et al. "Chapter 2 Climatic and Weather Factors Affecting Fire Occurrence and Behavior." *ScienceDirect*, Elsevier, 1 Jan. 2008, www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474817708000028.
- 40.Baeza, M.J, et al. "Factors Influencing Fire Behaviour in Shrublands of Different Stand Ages and the Implications for Using Prescribed Burning to Reduce Wildfire Risk." *Journal of Environmental Management*, vol. 65, no. 2, June 2002, pp. 199–208, <https://doi.org/10.1006/jema.2002.0545>.
- 41.Chmarycz, Victoria, and K. Wayne Forsythe. "Examining Wildfire Spread Variables for Assessing Forest Burn Vulnerability." *GI Forum*, vol. 1, 2021, pp. 94–107, https://doi.org/10.1553/giscience2021_02_s94. Accessed 24 Feb. 2022.
- 42.Ferster, Colin, et al. "Vegetation Mortality within Natural Wildfire Events in the Western Canadian Boreal Forest: What Burns and Why?" *Forests*, vol. 7, no. 12, 26 Aug. 2016, p. 187, <https://doi.org/10.3390/f7090187>. Accessed 8 Jan. 2020.
- 43..Oliveras, Imma, et al. "Factors Influencing the Pattern of Fire Severities in a Large Wildfire under Extreme Meteorological Conditions in the Mediterranean Basin." *International Journal of Wildland Fire*, vol. 18, no. 7, 2009, p. 755, <https://doi.org/10.1071/wf08070>. Accessed 9 Oct. 2021.
- 44.Román-Cuesta RM (2002) Human and environmental factors influencing fire trends in different forest ecosystems. PhD dissertation, Autonomous University of Barcelona.
- 45.Cruz, Miguel G., et al. "Wildfire Rates of Spread in Grasslands under Critical Burning Conditions." *Fire*, vol. 5, no. 2, 14 Apr. 2022, p. 55, <https://doi.org/10.3390/fire5020055>. Accessed 22 Apr. 2022.
- 46.Wu, Zechuan, et al. "Simulation of Forest Fire Spread Based on Artificial Intelligence." *Ecological Indicators*, vol. 136, Mar. 2022, p. 108653, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108653>.
- 47.Bountzouklis, Christos, et al. "Environmental Factors Affecting Wildfire-Burned Areas in Southeastern France, 1970–2019." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 22, no. 4, 6 Apr. 2022, pp. 1181–1200, <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1181-2022>.
- 48.Stephens, S.L. 2005. Forest fire causes and extent on United States Forest Service lands. *Int. J. Wildland Fire* 14, 213–222
49. Sugihara, N. G. 2006. Fire in California's ecosystems. University of California Press, Berkeley, California, USA
- 50.Krawchuk, M. A., S. L. Haire, J. Coop, M.-A. Parisien, E. Whitman, G. Chong, and C. Miller. 2016. Topographic and fire weather controls of fire refugia in forested ecosystems of northwestern North America. *Ecosphere*.

- 51.Silva, João, et al. "A SystSematic Review and Bibliometric Analysis of Wildland Fire Behavior Modeling." *Fluids*, vol. 7, no. 12, 5 Dec. 2022, p. 374,
<https://doi.org/10.3390/fluids7120374>.
- 52.Lopes, A.M.G.; Cruz, M.G.; Viegas, D.X. FireStation—An integrated software system for the numerical simulation of fire spread on complex topography. *Environ. Model. Softw.* 2002, 17, 269–285. [CrossRef]
- 53.Vasconcelos, M.; Guertin, P. FIREMAP-Simulation of Fire Growth With a Geographic Information System. *Int. J. Wildland Fire* 1992, 2, 87.
- 54.Johnston, P.; Kelso, J.; Milne, G. Efficient simulation of wildfire spread on an irregular grid. *Int. J. Wildland Fire* 2008, 17, 614.
- 55.Rothermel, Richard C. "A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels." *Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 P.*, vol. 115, 1972,
www.fs.usda.gov/research/treesearch/32533.
- 56.Tolhurst, K.; Shields, B.; Chong, D. Phoenix: Development and Application of a Bushfire Risk Management Tool. *Aust. J. Emerg. Manag.* 2008, 23, 47–54.
57. Tymstra, C.; Bryce, R.W.; Wotton, B.M.; Taylor, S.W.; Armitage, O.B. Development and Structure of Prometheus: The Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model; Natural Resources Canada: Edmonton, AL, Canada, 2010.
58. Johnston, P.; Kelso, J.; Milne, G. Efficient simulation of wildfire spread on an irregular grid. *Int. J. Wildland Fire* 2008, 17, 614.
59. Finney, M. FARSITE: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: Ogden, UT, USA, 1998.
60. Linn, R. A Transport Model for Prediction of Wildfire Behavior; Los Alamos National Lab.: Los Alamos, NM, USA, 1997.
- 61.Frandsen, William H. "Fire Spread through Porous Fuels from the Conservation of Energy." *Combustion and Flame*, vol. 16, no. 1, 1 Feb. 1971, pp. 9–16,
[https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(71\)80005-6](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(71)80005-6).
- 62.Melaaen, M. C. "NUMERICAL ANALYSIS of HEAT and MASS TRANSFER in DRYING and PYROLYSIS of POROUS MEDIA." *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 29, no. 4, Mar. 1996, pp. 331–355,
<https://doi.org/10.1080/10407789608913796>.