FIREURISK - DEVELOPING A HOLISTIC, RISK-WISE STRATEGY FOR EUROPEAN WILDFIRE MANAGEMENT

Grant Agreement Number: 101003890 **Call identifier:** H2020-LC-CLA-2018-2019-2020	
Topic:	LC-CLA-15-2020 Forest Fires risk reduction: towards an integrated fire management approach in the E.U.
Instrument:	RIA

D2.6 Handbook with guidelines for fire fighters to face to extreme fires, fires in WUI and fires in high latitudes/ altitudes

(version in Greek language)

Deliverable Identifier:	D2.6
Deliverable Due Date:	30/03/2024
Deliverable Submission Date:	29/05/2024
Deliverable Version:	final
Lead partner:	SAFE
Authors:	Sébastien Lahaye, Domingos Xavier Viegas, Luis Mario Ribeiro, Miguel Almeida, Tiago Rodrigues, Antonio Jorge Ferreira, Ana Isabel Miranda, Diogo Lopes, Tobias Osswald, Johan Sjöström, Rick McRae, Kiki Yunianti, Fanny Verhilac.
Translation to Greek language	George Eftychidis, Vassiliki Varela, Ioannis Gitas
Work Package:	WP2 -
Task:	Task 2.3
Dissemination Level:	☒ PU: Public CO: Confidential, only for members of the Consortium (including the Commission Services)

Copyright FirEURisk Consortium. All rights reserved. 1

Revision History

Version	Date	Edited by	Description
V0.1	25/01/2024	SAFE & ADAI	Initial contributions
V0.2	23/02/2024	SAFE, ADAI, RISE & UAVR	First draft version
V0.3	26/02/2024	SAFE	Second draft version
V0.4	18/03/2024	SAFE, ADAI	Final version for review
V0.5	18/05/2024	SAFE	Final after internal review
V0.6	07/02/2025	AUTH	Greek (translated) version

Quality Control

Type	Date	Reviewed by	Approved/Comment
Internal & Peer	06/05/2024	Patricia OLIVA and Stefan DOERR	Approved with minor changes suggested
Final approval	28/05/2024	Stefan DOERR	Approved

Επιτελική σύνοψη

Ο κίνδυνος δασικών πυρκαγιών έχει μεταβληθεί σημαντικά στην Ευρώπη τα τελευταία χρόνια, δημιουργώντας νέες προκλήσεις για τις δυνάμεις πυρόσβεσης:

- Ακραίες πυρκαγιές με απρόβλεπτη συμπεριφορά.
- Πυρκαγιές στις διεπαφές άγριας φύσης – αστικού περιβάλλοντος.
- Πυρκαγιές σε μεγαλύτερα υψόμετρα και γεωγραφικά πλάτη που στο παρελθόν δεν επηρεάζονταν σε τέτοιο βαθμό.

Η συνεχής παρατήρηση και πρόβλεψη αυτών των φαινομένων έχει οδηγήσει την επιστημονική κοινότητα στην παραγωγή σημαντικής γνώσης για τον κίνδυνο των δασικών πυρκαγιών. Ωστόσο, η μεταφορά αυτής της γνώσης στις επιχειρησιακές δυνάμεις πυρόσβεσης και η αξιοποίησή της για την ανάπτυξη επιχειρησιακών κατευθυντήριων γραμμών παραμένει ανεπαρκής, λόγω του υφιστάμενου χάσματος μεταξύ των ερευνητικών και επιχειρησιακών φορέων.

Επιπλέον, το επιχειρησιακό δυναμικό πυρόσβεσης στην Ευρώπη είναι κατακερματισμένο σε τοπικό, νομαρχιακό, περιφερειακό και εθνικό επίπεδο, με αποτέλεσμα την ανομοιογένεια στην εκπαίδευση και την κατάρτιση. Αυτό έχει ως συνέπεια την ελλιπή ενημέρωση και προετοιμασία των πυροσβεστών για την αντιμετώπιση των σύγχρονων προκλήσεων που συνδέονται με τις δασικές πυρκαγιές, επηρεάζοντας τόσο την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα όσο και την ασφάλειά τους.

Το παρόν παραδοτέο συγκεντρώνει τα αποτελέσματα της έρευνας για τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς, που πραγματοποιήθηκε από τους εταίρους του **FirEUrisk**. Η έρευνα παρουσιάζεται σε απλουστευμένη μορφή, ώστε να είναι εύκολα προσβάσιμη στους επιχειρησιακούς φορείς.

Τα πρώτα κεφάλαια αναλύουν τα θεμελιώδη στοιχεία της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς και τις συνθήκες που οδηγούν σε ακραία συμπεριφορά. Στη συνέχεια, εξετάζονται ειδικές κατηγορίες πυρκαγιών, όπως:

- Οι πυρκαγιές στις διεπαφές άγριας φύσης – αστικού περιβάλλοντος.
- Οι πυρκαγιές που εκδηλώνονται σε μεγάλα υψόμετρα και γεωγραφικά πλάτη.
- Ο μηχανισμός εκπομπής και διασποράς καπνού.

Τα τελευταία κεφάλαια εστιάζουν στις μεθοδολογίες καταστολής των πυρκαγιών σε διάφορα επιχειρησιακά περιβάλλοντα, παρέχοντας παράλληλα κατευθύνσεις για την ενίσχυση της ασφάλειας του προσωπικού και αναλύσεις πραγματικών επιχειρησιακών περιστατικών (μελέτες περιπτώσεων).

Για τη μέγιστη αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης, η κοινοπραξία **FirEUrisk** θα διερευνήσει τρόπους ένταξης και προσαρμογής της σε εθνικά επιχειρησιακά εγχειρίδια και προγράμματα εκπαίδευσης.

Αποποίηση Ευθυνών

Το περιεχόμενο της παρούσας δημοσίευσης αποτελεί αποκλειστική ευθύνη των συντακτών της και δεν αντικατοπτρίζει απαραίτητα τις απόψεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής ή των υπηρεσιών της.

Παρόλο που οι πληροφορίες που περιέχονται στο παρόν έγγραφο θεωρούνται ακριβείς, οι συγγραφείς και οποιοδήποτε άλλο μέλος της κοινοπραξίας **FirEUrisk** δεν παρέχουν καμία εγγύηση οποιουδήποτε είδους για το περιεχόμενο, συμπεριλαμβανομένων – αλλά όχι περιοριστικά – των σιωπηρών εγγυήσεων εμπορευσιμότητας και καταλληλότητας για συγκεκριμένο σκοπό.

Ούτε η κοινοπραξία **FirEUrisk**, ούτε οποιοδήποτε από τα μέλη της, ή οι εκπρόσωποί της φέρουν ευθύνη ή υποχρέωση – είτε λόγω αμέλειας είτε για οποιονδήποτε άλλο λόγο – σχετικά με τυχόν ανακρίβειες ή παραλείψεις στο παρόν έγγραφο. Κατά συνέπεια και χωρίς να περιορίζεται η γενικότητα των ανωτέρω, ούτε η κοινοπραξία **FirEUrisk** ούτε τα μέλη της ή οι εκπρόσωποί της φέρουν ευθύνη για οποιαδήποτε άμεση, έμμεση ή επακόλουθη απώλεια ή ζημία που μπορεί να προκληθεί ή να προκύψει από τις πληροφορίες, τις συστάσεις, τις ανακρίβειες ή τις παραλείψεις που περιλαμβάνονται στο παρόν έγγραφο.

Μήνυμα Πνευματικών Δικαιωμάτων

© Κοινοπραξία FirEUrisk, 2021-2025. Αυτό το παραδοτέο περιέχει πρωτότυπο αδημοσίευτο έργο εκτός αν αναφέρεται σαφώς διαφορετικά. Η αναγνώριση προηγουμένως δημοσιευμένου υλικού και του έργου άλλων έχει γίνει μέσω κατάλληλης αναφοράς, παράθεσης ή και των δύο. Η αναπαραγωγή επιτρέπεται υπό την προϋπόθεση ότι αναφέρεται η πηγή

Πίνακας Περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 7

1.1. Μελλοντικες τασεις του κινδυνου πυρκαγιων στην Ευρωπη 7
1.2. Συμμετοχες και Συνεργασιες 9

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ 10

2.1. Παραγοντες που επηρεαζουν την εξαπλωση της πυρκαγιας 10
2.2. Μετεωρολογία πυρκαγίων 10
2.2.1. Μετεωρολογικοί παράγοντες 10
2.2.2. Κίνδυνος πυρκαγιάς 12
2.2.3. Κίνδυνος πυρκαγιάς και περιεκτικότητα υγρασίας νεκρών καυσίμων 14
2.3. Ιδιότητες καυσιμων 17
2.3.1. Σωματίδια καυσίμου 18
2.3.2. Στρώματα καυσίμων και τύποι καυσίμων 19
2.3.3. Μοντέλα καυσίμων 22
2.4. Ρόλος της τοπογραφίας 25
2.4.1. Κλίση εδάφους 26
2.4.2. Προσανατολισμός Τοπίου: Έκθεση στο Ηλιακό Φως και τον Άνεμο 27
2.4.3. Υψόμετρο: Μοτίβα Θερμοκρασίας και Ανέμου 27
2.4.4. Καμπυλότητα εδάφους 27
2.4.5. Κορυφογραμμές 27
2.4.6. Σύνθετη Τοπογραφία 28
2.5. Τυποι και τροποι διαδοσης πυρκαγιας 29
2.5.1. Τύποι πυρκαγιών 29
2.5.2. Τρόποι διάδοσης επιφανειακής πυρκαγιάς 30

3. ΑΚΡΑΙΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ (EXTREME FIRE BEHAVIOR) 32

3.1. Χαρακτηρισμος της ακραιας συμπεριφορας πυρκαγιας (ΑΣΠ) 32
3.1.1. Δυναμική Συμπεριφορά Πυρκαγιάς 32
3.1.2. Ένταση πυρκαγιάς 33
3.2. Δυσμενεις εξελιξεις της ΑΣΠ για τους ανταποκριτες 34
3.2.1. Κηλιδώσεις 34
3.2.2. Επικόρυφες Πυρκαγιές 36
3.2.3. Εκρηκτικές πυρκαγιές 38
3.2.4. Πυρκαγιές σύζευξης (Junction fires) 38
3.2.5. Μεγάλες Πυρκαγιές (Conflagrations) 40
3.2.6. Πυροστρόλιβοι (Fire Whirls) 41
3.2.7. Συμβάντα έκρηξης πυρκαγιάς (Blow-up fire) 42

4. ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ 47

4.1. Πυρκαγιες στη Ζωνη Μιξης Δασων-Οικισμων (WUI) 47
4.1.1. Φυσικά καύσιμα – βλάστηση 48
4.1.2. Ανθρωπογενή καύσιμα 49
4.1.3. Ανθρώπινη παρουσία 50
4.2. Πυρκαγιες σε περιοχες μεγαλου υψομετρου 51
4.2.1. Συμπεριφορά πυρκαγιάς που καθοδηγείται από την τοπογραφία 51

4.2.2. Ζήτημα ασφάλειας *52*
4.2.3. Προβλήματα πρόσβασης και αντιμετώπισης *52*
4.2.4 Επιπτώσεις των πυρκαγιών σε μεγάλο υψόμετρο *53*
4.3. ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ 53
4.3.1 Καύσιμα και τοπία *54*
4.3.2 Δημογραφικά *54*
4.3.3 Ζητήματα και βελτιώσεις των τελευταίων δεκαετιών *56*
4.3.4 Παράγοντες που θα επηρεάσουν το μέλλον των δασικών πυρκαγιών στη Βόρεια Ευρώπη *57*

5. ΕΚΠΟΜΠΉ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΆ ΚΑΠΝΟΎ 58

5.1. ΕΚΠΟΜΠΉ ΚΑΠΝΟΎ 58
5.2. ΔΙΑΣΠΟΡΆ ΚΑΠΝΟΥ 61

6. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΊΕΣ ΠΥΡΌΣΒΕΣΗΣ 65

6.1. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΈΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΈΣ ΚΑΤΑΣΤΟΛΉΣ ΠΥΡΚΑΓΙΆΣ 65
6.1.1 Στρατηγική καταστολής πυρκαγιάς *66*
6.1.2. Τεχνική καταστολής πυρκαγιάς *68*
6.2. ΚΑΤΑΠΟΛΕΜΗΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΜΙΞΗΣ ΔΑΣΩΝ-ΟΙΚΙΣΜΩΝ 71
6.2.1. Καταστολή πυρκαγιάς στη ΖΜΔΟ *72*
6.2.2. Προστασία πληθυσμού και κτιρίων *73*
6.3. ΚΑΤΑΠΟΛΕΜΗΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΜΕ ΑΚΡΑΙΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ 73

7. ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΣΤΟ ΜΕΤΩΠΟ 76

7.1. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΛΥΠΛΕΥΡΗ ΑΠΟΔΟΣΗ 76
7.2. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΑΠΝΟΥ ΣΤΗΝ ΟΡΑΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΥΓΕΙΑ 77
7.2.1. Αιτιοπαθογένεια *77*
7.2.2. Διαγνωστική *79*
7.2.3. Θεραπεία *81*
7.2.4. Συμπεράσματα *82*
7.3. ΚΑΝΌΝΕΣ ΑΣΦΑΛΕΊΑΣ 82
7.3.1. Τυποποιημένες εντολές δασοπυρόσβεσης και Καταστάσεις προειδοποίησης *82*
7.3.2. LCES - LACES *86*
7.3.3. Πρόσθετες συστάσεις για πυρκαγιές σε πλαγιές *89*

8. ΜΕΛΈΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΏΣΕΩΝ 91

8.1. ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ 91
8.1.1. Πυρκαγιά Pedrógão Grande *91*
8.1.2. Πυρκαγιά Garrocho (Serra da Estrela) *94*
8.2. ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ 97
8.2.1 - Ατύχημα του Freixo de Espada a Cinta *97*
8.2.2 - Ατύχημα του Famalicão da Serra (Πορτογαλία) 2006 ..... *99*

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 102

ΔΊΓΛΩΣΣΟ ΓΛΩΣΣΆΡΙ ΌΡΩΝ ΔΙΑΧΕΊΡΙΣΗΣ ΔΑΣΙΚΏΝ ΠΥΡΚΑΓΙΏΝ 114

Πίνακας συντομογραφιών

English term	Ελληνικός όρος	Abbreviation
Airway, Breathing, Circulation	Αεραγωγός, Αναπνοή, Κυκλοφορία	ABC
Agency for Toxic Substances and Disease Registry	Οργανισμός Τοξικών Ουσιών και Μητρώου Νοσημάτων	ATSDR
Body Mass Index	Δείκτης Μάζας Σώματος	BMI
Blow-Up Fire Event	Συμβάν Έκρηξης Πυρκαγιάς	BUFE
Centers for Disease Control and Prevention	Κέντρα Ελέγχου και Πρόληψης Νοσημάτων	CDC
Canadian Fire Weather Index System	Καναδικό Σύστημα Δείκτη Καιρού Πυρκαγιάς	CFWIS
Drought Code	Κώδικας Ξηρασίας	DC
Duff Moisture Code	Κώδικας Υγρασίας υποστρώματος	DMC
Extreme Fire Behaviour	Ακραία Συμπεριφορά Πυρκαγιάς	EFB
Eruptive Fire Behaviour	Εκρηκτική Συμπεριφορά Πυρκαγιάς	EFB
European Forest Fire Information System	Ευρωπαϊκό Σύστημα Πληροφόρησης για τις Δασικές Πυρκαγιές	EFFIS
Equilibrium Moisture Content	Περιεχόμενο Υγρασίας Ισορροπίας	EMC
Environmental Protection Agency	Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος	EPA
Extreme Wildfire Event	Ακραίο Συμβάν Δασικής Πυρκαγιάς	EWE
Fire Danger Index	Δείκτης Κινδύνου Πυρκαγιάς	FDI
Forest Fire Danger Index	Δείκτης Κινδύνου Δασικής Πυρκαγιάς	FFDI
Fine Fuel Moisture Code	Κώδικας Υγρασίας Λεπτού Καυσίμου	FFMC
Fire Weather Index	Δείκτης Καιρού Πυρκαγιάς	FWI
Grassland and Forest Fire Danger Index	Δείκτης Κινδύνου Πυρκαγιάς σε Χορτολιβαδικές και Δασικές Εκτάσεις	GFDI
Heart Rate	Καρδιακός Ρυθμός	HR
Incident Action Plan	Σχέδιο Δράσης για το Συμβάν	IAP
Initial Spread Index	Δείκτης Αρχικής Εξάπλωσης	ISI
Lookouts, Communications, Escape routes, and Safety zones	Παρατηρητές, Επικοινωνίες, Διαδρομές Διαφυγής και Ζώνες Ασφαλείας	LCES
Material Safety Data Sheet	Δελτίο Δεδομένων Ασφαλείας Υλικού	MSDS
National Fire Danger Rating System	Εθνικό Σύστημα Αξιολόγησης Κινδύνου Πυρκαγιάς	NFDRS
Northern Forest Fire Laboratory	Εργαστήριο Πυρκαγιάς Βορείων Δασών	NFFL
National Institute of Standards and Technology	Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας	NIH
National Institute for Occupational Safety and Health	Εθνικό Ινστιτούτο για την Επαγγελματική Ασφάλεια και Υγεία	NIOSH
National Public Radio	Εθνικό Δημόσιο Ραδιόφωνο	NPR
National Wildfire Coordination Group	Εθνική Ομάδα Συντονισμού Δασικών Πυρκαγιών	NWCG
Occupational Safety and Health Administration	Διοίκηση Επαγγελματικής Ασφάλειας και Υγείας	OSHA
Particulate Matter	Σωματιδιακή Ύλη	PM
Rate of Spread	Ταχύτητα Εξάπλωσης	ROS
Surface Area to Volume	Λόγος Επιφάνειας προς Όγκο	SAV
Safety Data Sheet	Δελτίο Δεδομένων Ασφαλείας	SDS
Safe Separation Distance	Ασφαλής Απόσταση Διαχωρισμού	SSD
Time of Spread	Χρόνος Εξάπλωσης	TOS
United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization	Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών για την Εκπαίδευση, την Επιστήμη και τον Πολιτισμό	UNESCO
United States Department of Agriculture	Υπουργείο Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών	USDA
United States	Ηνωμένες Πολιτείες	US
Urban forest interface	Διασύνδεση Αστικού Δάσους	UFI
Coordinated Universal Time	Συντονισμένη Παγκόσμια Ώρα	UTC
Wildland Urban Interface	Διασύνδεση Άγριας Γης - Αστικού Περιβάλλοντος	WUI

1. Εισαγωγή

1.1. Μελλοντικές τάσεις του κινδύνου πυρκαγιών στην Ευρώπη

Τα τελευταία χρόνια, η συχνότητα και η ένταση των δασικών πυρκαγιών έχουν αυξηθεί, προκαλώντας σοβαρές επιπτώσεις στις κοινότητες και τα οικοσυστήματα.

Οι τάσεις αυτές αναμένεται να συνεχιστούν και να ενταθούν στο μέλλον, με τις ακριβείς προβλέψεις να διαμορφώνονται στο πλαίσιο των δραστηριοτήτων του **Πακέτου Εργασίας 3** του έργου **FirEUrisk** (FIREURISK, 2024).

Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες:

- Ο κίνδυνος δασικών πυρκαγιών θα επεκταθεί σε μεγαλύτερες περιοχές της ευρωπαϊκής επικράτειας, επηρεάζοντας ευρύτερες γεωγραφικές ζώνες (**Jones et al., 2022**).
- Η περιοχή της Μεσογείου, που ήδη πλήττεται περισσότερο, θα αντιμετωπίσει ακόμη πιο ακραία συμβάντα δασικών πυρκαγιών (**Turco et al., 2018**).
- Οι **Περιοχές Μείξης Δασών-Οικισμών (WUI)**, που γίνονται όλο και πιο ευάλωτες, θα εκτεθούν σε αυξημένο κίνδυνο (**Almeida et al., 2023; Zikeloglou et al., 2023**).

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, οι εξελίξεις αυτές συνεπάγονται σημαντικές προκλήσεις για τις δυνάμεις πυρόσβεσης. Οι πυροσβέστες ενδέχεται να μην διαθέτουν την απαραίτητη γνώση, καθώς και τις κατάλληλες στρατηγικές και τακτικές για την αντιμετώπιση:

- Πυρκαγιών σε νέες περιοχές που δεν θεωρούνταν παραδοσιακά πυρόπληκτες.
- Ακραίων συμπεριφορών πυρκαγιάς, οι οποίες εξελίσσονται ταχύτερα και με μεγαλύτερη ένταση.
- Πυρκαγιών στις **Περιοχές Μείξης Δασών-Οικισμών (WUI)**, όπου οι σύνθετες επιχειρησιακές συνθήκες καθιστούν την καταστολή πιο δύσκολη.

Πέρα από τις επιχειρησιακές προκλήσεις, η έλλειψη κατάλληλης εκπαίδευσης, στρατηγικών και τακτικών ενδέχεται να θέσει σε κίνδυνο την ασφάλεια του προσωπικού, αυξάνοντας τον κίνδυνο τραυματισμών ή απωλειών κατά τη διάρκεια των επιχειρήσεων πυρόσβεσης.

Ανάγκη για Κατευθυντήριες Γραμμές Πυρόσβεσης

Από επιχειρησιακή άποψη, οι φορείς που είναι υπεύθυνοι για την αντιμετώπιση των δασικών πυρκαγιών στην Ευρώπη και πέρα από αυτήν αποτελούν ένα κατακερματισμένο σύστημα (**Lahaye et al., 2018a**). Ανάλογα με τη χώρα, οι δασικές και πυροσβεστικές υπηρεσίες σε εθνικό, περιφερειακό ή τοπικό επίπεδο διαχειρίζονται τους διαθέσιμους πόρους ακολουθώντας δικές τους διαδικασίες. Αυτές οι διαδικασίες, αν και μπορεί να ευθυγραμμίζονται με τα εθνικά πρότυπα, βασίζονται επίσης σε τοπικά επιχειρησιακά πλαίσια και στην εμπειρία από προηγούμενες πυρκαγιές. Ωστόσο, αυτή η εμπειρία παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των περιοχών. Επιπλέον, οι διαθέσιμοι οικονομικοί και ανθρώπινοι πόροι διαφέρουν, με αποτέλεσμα σημαντική ανομοιογένεια στο επίπεδο γνώσης, εκπαίδευσης και επιχειρησιακής προσέγγισης.

Από ερευνητική άποψη, πολλές επιστημονικές ομάδες εργάζονται ήδη στην Ευρώπη και διεθνώς για την προώθηση της γνώσης σχετικά με τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών και τη διαχείριση του κινδύνου πυρκαγιάς σε όλα τα στάδια του κύκλου του. Το έργο **FirEUrisk** αξιοποιεί αυτή τη δυναμική, συγκεντρώνοντας σημαντικές ερευνητικές ομάδες και δημιουργώντας ένα δίαυλο επικοινωνίας και συνεργασίας με τις επιχειρησιακές δυνάμεις πυρόσβεσης.

Ο σκοπός του παρόντος εγγράφου είναι να συγκεντρώσει ένα σύνολο θεμελιωδών εννοιών και κατευθυντήριων γραμμών που θα πρέπει να ενσωματωθούν στα εκπαιδευτικά προγράμματα των πυροσβεστικών δυνάμεων και άλλων σχετικών φορέων που εμπλέκονται

στη διαχείριση του κινδύνου δασικών πυρκαγιών. Δεδομένης της επιτακτικής ανάγκης ενίσχυσης της εκπαίδευσης σε θέματα που σχετίζονται με την αυξανόμενη ένταση και έκταση των δασικών πυρκαγιών, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην καταστολή πυρκαγιών υπό ακραίες συνθήκες. Η βελτιωμένη εκπαίδευση και η ενίσχυση της επιχειρησιακής επίγνωσης αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την ασφάλεια των πυροσβεστών και μπορούν να συμβάλουν στη μείωση των θανάτων και των τραυματισμών κατά τη διάρκεια επιχειρήσεων καταστολής πυρκαγιών.

Η αντιμετώπιση ακραίων πυρκαγιών ενέχει εξαιρετικά υψηλούς κινδύνους για το προσωπικό πυρόσβεσης. Οι καταστάσεις αυτές χαρακτηρίζονται από:

- Έντονη θερμότητα και υψηλές φλόγες.
- Μαζική εκτόξευση καύτρων.
- Ταχέως μεταβαλλόμενη και απρόβλεπτη συμπεριφορά της φωτιάς, η οποία μπορεί να δημιουργήσει εξαιρετικά επικίνδυνες συνθήκες.

Οι πυρκαγιές στις **Περιοχές Μείξης Δασών-Οικισμών (WUI)** αποτελούν ιδιαίτερη πρόκληση, καθώς οι πυροσβέστες καλούνται να προστατεύσουν ανθρώπινες ζωές και περιουσίες, συχνά ανεξάρτητα από το επίπεδο κινδύνου ή τη δυναμική εξέλιξη της φωτιάς. Η συμπεριφορά της πυρκαγιάς σε αυτές τις περιοχές καθορίζεται από τη διάταξη της βλάστησης, τις υποδομές και την παρουσία εύφλεκτων ή εκρηκτικών υλικών, όπως δεξαμενές υγραερίου, οχήματα και άλλα επικίνδυνα αντικείμενα.

Η διαχείριση του κινδύνου πυρκαγιών στις **Περιοχές Μείξης Δασών-Οικισμών (WUI)** έχει μελετηθεί εκτενώς στο πλαίσιο του **FirEUrisk**, μέσω:

- Ανάλυσης προηγούμενων πυρκαγιών.
- Εκτίμησης της έκθεσης πληθυσμού και περιουσιακών στοιχείων.
- Αξιολόγησης της ευπάθειας των κοινοτήτων, των οικιών και των υποδομών.

Ως αποτέλεσμα, το παρόν παραδοτέο αξιοποιεί τα πορίσματα αυτής της έρευνας για να προσφέρει καθοδήγηση στις επιχειρησιακές διαδικασίες αντιμετώπισης πυρκαγιών στις **WUI**.

Παράλληλα, οι συγγραφείς του εγγράφου έχουν συμβουλευτεί δίκτυα επιχειρησιακών φορέων προκειμένου να αξιολογήσουν ποιες τεχνικές απόκρισης είναι πιο αποτελεσματικές σε διαφορετικά επιχειρησιακά πλαίσια, συμπεριλαμβανομένων των περιοχών υψηλότερου γεωγραφικού πλάτους και μεγαλύτερου υψομέτρου, όπου ο κίνδυνος πυρκαγιάς επεκτείνεται.

Τα περιεχόμενα του παρόντος εγγράφου βασίζονται στα εκπαιδευτικά προγράμματα που χρησιμοποιούν ορισμένοι από τους συγγραφείς του για την εκπαίδευση πυροσβεστών και άλλων επιχειρησιακών φορέων στην καταστολή πυρκαγιών υπό συνθήκες ακραίας συμπεριφοράς φωτιάς, με στόχο την ενίσχυση της ασφάλειας του προσωπικού.

Οι κύριες συνεισφορές αυτού του παραδοτέου θα αξιοποιηθούν για τη δημιουργία ενός **"Ευρωπαϊκού Εγχειριδίου για Πυροσβέστες"**, το οποίο θα μπορεί να λειτουργήσει ως ένα βασικό εργαλείο ευαισθητοποίησης και εκπαίδευσης. Παρότι θα έχει απλοποιημένη προσέγγιση, θα καλύπτει κρίσιμες πτυχές της διαχείρισης των δασικών πυρκαγιών. Όλοι οι φορείς πολιτικής προστασίας θα μπορούν να επωφεληθούν από τις βασικές έννοιες και τις επιχειρησιακές κατευθύνσεις που παρουσιάζονται.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ασφάλεια, καθώς πολλές από τις καινοτόμες προσεγγίσεις που προτείνονται προέκυψαν από την ανάλυση πραγματικών περιστατικών, συμπεριλαμβανομένων σοβαρών ατυχημάτων και μεγάλων δασικών πυρκαγιών που προκάλεσαν σημαντικές ανθρώπινες απώλειες.

1.2. Συμμετοχές και Συνεργασίες

Το έργο βασίζεται πρωτίστως στην εκτεταμένη εμπειρία της **Ομάδας ADAI** στη διερεύνηση ατυχημάτων που σχετίζονται με δασικές πυρκαγιές, τα οποία αφορούν τόσο πολίτες όσο και επιχειρησιακούς φορείς (**Viegas et al., 2001; Viegas et al., 2005; Viegas et al., 2008; Viegas, 2004, 2009, 2013, 2017; Ribeiro et al., 2020**). Επιπλέον, στηρίζεται στη μελέτη μεγάλων πυρκαγιών που έχουν διεξαχθεί κατόπιν αιτήματος των εθνικών αρχών (**Viegas et al., 2012; Viegas et al., 2013; Viegas et al., 2017; Viegas et al., 2019**).

Η έρευνα που παράγεται στο πλαίσιο του έργου **FirEUrisk** σχετικά με την ακραία συμπεριφορά πυρκαγιάς ενσωματώνει καινοτόμες έννοιες, οι οποίες παρουσιάζονται και αναλύονται εκτενώς παρακάτω. Για λόγους συνοχής, συνοψίζονται εδώ οι βασικές έννοιες:

- **Δυναμική συμπεριφορά πυρκαγιάς** (**Viegas, 2004; Viegas & Pita, 2004**).
- **Έννοια της εκρηκτικής πυρκαγιάς** (**Viegas, 2006; Viegas & Simeoni, 2011**).
- **Φαινόμενο συνένωσης πυρκαγιών (fire merging)** (**Raposo et al., 2018**).
- **Ταλαντωτική συμπεριφορά πυρκαγιάς (fire oscillation)** (**Viegas et al., 2021**).

Στο παρόν κείμενο δεν περιλαμβάνονται αναλυτικές τεχνικές λεπτομέρειες για τις παραπάνω έννοιες, ειδικά όταν πρόκειται για τυποποιημένο υλικό που είναι ήδη διαθέσιμο σε επιστημονικά και επιχειρησιακά έγγραφα αναφοράς.

Ο πρώτος συγγραφέας του παραδοτέου έχει ενσωματώσει, επιπλέον, υλικό από τις μελέτες του σχετικά με την **ασφάλεια των πυροσβεστών** (**Lahaye et al., 2018b; Lahaye et al., 2018c**), καθώς και από τρέχοντα προγράμματα εκπαίδευσης που αφορούν την ανάπτυξη **ικανοτήτων ανάλυσης της συμπεριφοράς πυρκαγιάς** στη Γαλλία.

Το κεφάλαιο που αφορά τις **μεθοδολογίες πυρόσβεσης** στηρίζεται στα αποτελέσματα συνεντεύξεων και ερευνών που πραγματοποιήθηκαν με Ευρωπαίους επιχειρησιακούς ανταποκριτές από νέα ερευνητικά στελέχη του **SAFE Cluster**.

Τέλος, ανώτεροι ερευνητές από το **Ινστιτούτο RISE (Σουηδία)**, το **Πανεπιστήμιο του Aveiro (Πορτογαλία)** και το **Πανεπιστήμιο της Νέας Νότιας Ουαλίας (Αυστραλία)** έχουν προσφέρει εξειδικευμένες συνεισφορές στο περιεχόμενο του παρόντος εγγράφου.

2. Βασικές αρχές της Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς

2.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την εξάπλωση της πυρκαγιάς

Η εξάπλωση μιας πυρκαγιάς εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, οι οποίοι, σύμφωνα με τον **Viegas (2004)**, μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: **1) Τοπογραφία, 2) Βλάστηση, 3) Μετεωρολογία και 4) Χρόνος**.

Αν και οι παραπάνω παράγοντες δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους, η ανάλυση καθενός ξεχωριστά επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση του ρόλου τους στη δυναμική της εξάπλωσης της φωτιάς. Στα επόμενα κεφάλαια, θα γίνει λεπτομερής εξέταση της επίδρασης της τοπογραφίας, της καύσιμης ύλης και των μετεωρολογικών συνθηκών στην εξέλιξη των δασικών πυρκαγιών.

Ο παράγοντας **"Χρόνος"** αναφέρεται στη χρονική εξέλιξη της φωτιάς και ενισχύει τον δυναμικό χαρακτήρα των διαδικασιών εξάπλωσης της πυρκαγιάς, τόσο σε τυπικές συνθήκες όσο και σε καταστάσεις ακραίων δασικών πυρκαγιών (**Extreme Fire Behavior – EFB**).

Στα κεφάλαια **3 έως 6**, οι παραπάνω παράγοντες θα αναλυθούν διεξοδικά, προκειμένου να προσφέρουν ένα κοινό υπόβαθρο εννοιών και εργαλείων για την κατανόηση της **Ακραίας Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς (EFB)**.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην παραπάνω ανάλυση δεν λαμβάνονται υπόψη οι στρατηγικές και οι τεχνικές καταστολής της πυρκαγιάς. Ωστόσο, όπως θα εξεταστεί σε μεταγενέστερα κεφάλαια, όσο πιο ευνοϊκές είναι οι συνθήκες για την επέμβαση των δυνάμεων πυρόσβεσης, τόσο αυξάνονται οι πιθανότητες περιορισμού της εξάπλωσης της φωτιάς και της αποτελεσματικής διαχείρισης του κινδύνου.

Η διάδοση μιας πυρκαγιάς εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που μπορούν να ομαδοποιηθούν, για απλοποίηση, σύμφωνα με τον Viegas (2004), στις ακόλουθες τέσσερις ομάδες παραγόντων: 1) Τοπογραφία, 2) Βλάστηση, 3) Μετεωρολογία και 4) Χρόνος.

Αν και οι παραπάνω παράγοντες δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους, είναι δυνατό να αναλύσουμε τον καθένα ξεχωριστά για να κατανοήσουμε καλύτερα το ρόλο τους στην εξάπλωση της πυρκαγιάς. Ο ρόλος της τοπογραφίας, των καυσίμων και της μετεωρολογίας θα έχει ειδική μεταχείριση παρακάτω. Ο παράγοντας "χρόνος" αντιστοιχεί στον χρονολογικό χρόνο και ενισχύει τον δυναμικό χαρακτήρα των διαδικασιών εξάπλωσης της πυρκαγιάς στη γενική περίπτωση, αλλά και λαμβάνοντας υπόψη τις ακραίες πυρκαγιές.

Στα κεφάλαια 3 έως 6, αυτοί οι παράγοντες θα αναλυθούν για να παρέχουν ένα κοινό υπόβαθρο εννοιών και ιδεών για την καλύτερη κατανόηση της Ακραίας Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς (EFB).

Στην παραπάνω προσέγγιση, η καταστολή της πυρκαγιάς δεν λαμβάνεται υπόψη, αλλά όπως θα δούμε, όσο πιο ευνοϊκές είναι οι συνθήκες για την αντίδραση, τόσο υψηλότερες είναι οι πιθανότητες η πυρόσβεση να περιορίσει την εξάπλωση της πυρκαγιάς.

2.2. Μετεωρολογία πυρκαγιών

2.2.1. Μετεωρολογικοί παράγοντες

Η **μετεωρολογία** αναφέρεται στην κατάσταση της ατμόσφαιρας, η οποία περιγράφεται μέσω μιας σειράς παραμέτρων που μεταβάλλονται τόσο χρονικά όσο και χωρικά. Όταν οι μετεωρολογικές μεταβλητές αναλύονται με βάση την επίδρασή τους στις δασικές πυρκαγιές, αποτελούν τη **μετεωρολογία πυρκαγιών**.

Οι μετεωρολογικοί παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα τη **συμπεριφορά της πυρκαγιάς** μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες:

1. **Παράγοντες διαμόρφωσης** (που επηρεάζουν τις συνθήκες ανάφλεξης).
2. **Καθοριστικοί παράγοντες** (που επηρεάζουν την εξάπλωση της φωτιάς).

(i) Παράγοντες Διαμόρφωσης

Οι παράγοντες αυτής της κατηγορίας επηρεάζουν το **φορτίο καυσίμου** και την **περιεκτικότητα σε υγρασία των λεπτών καυσίμων**, συμβάλλοντας στη διαμόρφωση των συνθηκών για την έναρξη και εξάπλωση της πυρκαγιάς.

- **Κατακρημνίσματα (βροχόπτωση):**

  Εκφράζονται σε χιλιοστά (mm) και επηρεάζουν τόσο την περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία όσο και την υγρασία των καυσίμων (**Viegas & Viegas, 1994**).
  - **Υψηλές βροχοπτώσεις** στην αρχή του υδρολογικού έτους (Οκτώβριος στο Βόρειο Ημισφαίριο) ευνοούν την ανάπτυξη βλάστησης, η οποία το καλοκαίρι μπορεί να μετατραπεί σε καύσιμο.
  - **Ξηρές περίοδοι** πριν από το καλοκαίρι, με κατακρημνίσεις κάτω από το κλιματικό μέσο όρο (30ετής περίοδος αναφοράς), ενισχύουν την ξηρότητα των καυσίμων και αυξάνουν τον κίνδυνο εξάπλωσης της φωτιάς.
- **Θερμοκρασία του αέρα:**
- Η θερμοκρασία ακολουθεί ημερήσιο κύκλο λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά μπορεί να μεταβληθεί και λόγω ατμοσφαιρικών διαταραχών.
  - Κατά τη διάρκεια της ημέρας, **η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την υγρασία των καυσίμων**, μειώνοντας το ποσό θερμότητας που απαιτείται για την ανάφλεξή τους (**Schroeder & Buck, 1970**).
  - Η υψηλή θερμοκρασία επιδεινώνει την εξάπλωση της φωτιάς, ιδιαίτερα όταν συνοδεύεται από ξηρό αέρα.
- **Σχετική υγρασία του αέρα (RH):**
- Ορίζεται ως το ποσοστό της υγρασίας που περιέχει ο αέρας σε σχέση με τη μέγιστη ποσότητα που μπορεί να συγκρατήσει.
  - **Υψηλή σχετική υγρασία (>80%)** περιορίζει την καύση.
  - **Χαμηλή σχετική υγρασία (<30%)** επιταχύνει την εξάπλωση της φωτιάς, καθώς ευνοεί την αποξήρανση των καυσίμων.
  - Η RH ακολουθεί αντίστροφο ημερήσιο κύκλο από τη θερμοκρασία, μειώνεται τη μέρα και αυξάνεται τη νύχτα.

(ii) Καθοριστικοί Παράγοντες

Οι καθοριστικοί παράγοντες επηρεάζουν άμεσα τη **διάδοση της πυρκαγιάς**, καθορίζοντας την ταχύτητα, την ένταση και την κατεύθυνση της εξάπλωσής της.

- **Άνεμος:**

  Ο άνεμος είναι η οριζόντια κίνηση του αέρα, με βασικά χαρακτηριστικά την **ταχύτητα** (m/s) και την **κατεύθυνση** (μοίρες από τον Βορρά). Ο ρόλος του ανέμου είναι κρίσιμος στη δυναμική των δασικών πυρκαγιών, καθώς:
  - **Αυξάνει την παροχή οξυγόνου**, ενισχύοντας την καύση.
  - **Μεταφέρει θερμότητα** προς τα εμπρός, επιταχύνοντας την εξάπλωση της φωτιάς.
  - **Διασπείρει καύτρες**, προκαλώντας δευτερογενείς εστίες πυρκαγιάς.

Επιπλέον, ο άνεμος παρουσιάζει δύο τύπους μεταβολών:

  - **Αργές μεταβολές** (μεταβολές ταχύτητας και κατεύθυνσης στον χρόνο).

- **Ταχείες μεταβολές** (ριπές ανέμου), που επηρεάζουν την αστάθεια της φλόγας και αυξάνουν την ένταση της φωτιάς.

Το **προφίλ της ταχύτητας του ανέμου** αλλάζει με το υψόμετρο, ενώ μπορεί να τροποποιηθεί από τον **άνεμο που προκαλείται από την πυρκαγιά**. Σε μεγάλες φωτιές, η έντονη θέρμανση του αέρα πάνω από τη ζώνη καύσης δημιουργεί ισχυρά ανοδικά ρεύματα, τα οποία αλληλεπιδρούν με τον ατμοσφαιρικό άνεμο, επηρεάζοντας τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς.

- **Ατμοσφαιρική σταθερότητα:**

Η σταθερότητα της ατμόσφαιρας επηρεάζει τις **κατακόρυφες κινήσεις του αέρα**, που είναι κρίσιμες για την εξάπλωση της φωτιάς. Η σταθερότητα της ατμόσφαιρας προσδιορίζεται από τη **μεταβολή της θερμοκρασίας με το ύψος** (**dT/dz, ºC/m**).

- **Ασταθής ατμόσφαιρα:**
  - Δημιουργεί έντονα ανοδικά ρεύματα και θερμικές ανωστροφές.
  - Ευνοεί τις ταχείες μεταβολές του ανέμου και τις ριπές.
  - Αυξάνει την πιθανότητα απρόβλεπτης συμπεριφοράς της φωτιάς.
- **Σταθερή ατμόσφαιρα:**
  - Καταστέλλει την κατακόρυφη μετακίνηση του αέρα.
  - Μειώνει την ένταση της φλόγας και την ανάπτυξη της πυρκαγιάς.
- **Καταιγίδες και κεραυνοί:**
  - Σε ασταθείς ατμόσφαιρες, οι καταιγίδες αναπτύσσουν ισχυρά ανοδικά και καθοδικά ρεύματα, τα οποία μπορεί να δημιουργήσουν **επικίνδυνες αλλαγές ανέμου**.
  - Οι κεραυνοί μπορούν να προκαλέσουν **πυρκαγιές από φυσικά αίτια**.

Οι μετεωρολογικοί παράγοντες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά της φωτιάς. Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης **υγρασίας, θερμοκρασίας, ανέμου και ατμοσφαιρικής σταθερότητας** επιτρέπει την αποτελεσματικότερη **διαχείριση του κινδύνου πυρκαγιάς** και τη βελτιστοποίηση των **στρατηγικών καταστολής**. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις επιπτώσεις της μετεωρολογίας στη δυναμική της φωτιάς παρουσιάζονται στο **Κεφάλαιο 3**.

2.2.2. Κίνδυνος πυρκαγιάς

- Ο **κίνδυνος πυρκαγιάς** αναφέρεται στη φυσική πιθανότητα εκδήλωσης και εξάπλωσης μιας δασικής πυρκαγιάς (**UNISDR, 2009**). Εκφράζεται μέσω **δεικτών κινδύνου πυρκαγιάς**, οι οποίοι εκτιμώνται από **μετεωρολογικά συστήματα πυρκαγιών** ή **συστήματα αξιολόγησης κινδύνου πυρκαγιάς**. Αυτά τα συστήματα στηρίζονται σε μετεωρολογικούς παράγοντες και την επίδρασή τους στην υγρασία των δασικών καυσίμων.
- Διάφορα **συστήματα κινδύνου πυρκαγιάς** εφαρμόζονται διεθνώς, ενσωματώνοντας **μετεωρολογικά δεδομένα** και **χαρακτηριστικά καυσίμων** σε δείκτες που χρησιμοποιούνται για:
- **Προειδοποιήσεις** σε μεγάλες περιοχές.
- **Εκτίμηση της δυσκολίας καταστολής** μεμονωμένων πυρκαγιών ή συρροής εστιών (**Dowdy et al., 2009**).
- Τα βασικά **παγκόσμια συστήματα κινδύνου πυρκαγιάς** που εφαρμόζονται ευρέως στην **πρόληψη και επιχειρησιακή διαχείριση** είναι:

1. **Αυστραλιανός Δείκτης Κινδύνου Δασικής Πυρκαγιάς (FFDI)** (**McArthur, 1967**)
   - Χρησιμοποιείται στην Αυστραλία για την εκτίμηση της επίδρασης των μετεωρολογικών συνθηκών στη συμπεριφορά των πυρκαγιών.

- Το Αυστραλιανό Γραφείο Μετεωρολογίας εκδίδει τακτικά **προβλέψεις FFDI και GFDI (Δείκτης Κινδύνου Πυρκαγιάς Λιβαδιών)** για χρήση από τις πυροσβεστικές αρχές (**Dowdy et al., 2009**).

2. **Εθνικό Σύστημα Αξιολόγησης Κινδύνου Πυρκαγιάς των ΗΠΑ (NFDRS)** (**Deeming et al., 1978; Bradshaw et al., 1984**)
    - Αρχικά εισήχθη το **1964** και έχει υποστεί επαναλαμβανόμενες αναθεωρήσεις (1972, 1978, 1988, 2016).
    - Συνδυάζει μετεωρολογικά δεδομένα και χαρακτηριστικά καυσίμων σε **δείκτες πυροπροστασίας** (**USDA/Forest Service, 2023**).
3. **Καναδικό Σύστημα Δείκτη Καιρού Πυρκαγιάς (CFWIS)** (**Van Wagner, 1987**)
    - Αναπτύχθηκε το **1970** και αναθεωρήθηκε το **1976, 1984, 1987**.
    - Αποτελεί ένα **ολιστικό εργαλείο εκτίμησης της πυρομετεωρολογίας**, προσαρμοσμένο σε διάφορα κλίματα εκτός Καναδά (**Dowdy et al., 2009**).

<u>Το Καναδικό Σύστημα Δείκτη Καιρού Πυρκαγιάς (CFWIS) ως Κοινή Αναφορά στην Ευρώπη</u>

Το **CFWIS** χρησιμοποιείται ευρέως στην Ευρώπη, καθώς αποτελεί **κοινή γλώσσα** για την επιχειρησιακή προσέγγιση του κινδύνου πυρκαγιάς.

Δείκτες Υγρασίας Καυσίμων

Το σύστημα υπολογίζει την υγρασία των **νεκρών καυσίμων** με βάση ημερήσια μετεωρολογικά δεδομένα (12:00 τοπική ώρα: **θερμοκρασία, σχετική υγρασία, κατακρημνίσεις και άνεμος**). Περιλαμβάνει τρεις **κωδικούς υγρασίας καυσίμων**:

1. **FFMC (Fine Fuel Moisture Code)** – Υγρασία λεπτών καυσίμων (φύλλα, βελόνες).
2. **DMC (Duff Moisture Code)** – Υγρασία αποσυντεθειμένης οργανικής ύλης.
3. **DC (Drought Code)** – Υγρασία βαθιάς οργανικής ύλης.

Δείκτες Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς

- Οι παραπάνω δείκτες τροφοδοτούνται στο σύστημα για την παραγωγή των **επιχειρησιακών δεικτών συμπεριφοράς πυρκαγιάς**:

4. **ISI (Initial Spread Index)** – Συνδυασμένη επίδραση ανέμου και FFMC στην εξάπλωση της φωτιάς.
5. **BUI (Build-Up Index)** – Εκτίμηση της διαθέσιμης καύσιμης ύλης, συνδυασμός DMC & DC.
6. **FWI (Fire Weather Index)** – Κύριος δείκτης πυρκαγιάς, συνδυασμός ISI και BUI.

- Το **FWI** αντιπροσωπεύει τη **μέγιστη ημερήσια ένταση μιας εξάπλωσης πυρκαγιάς**, με **μονάδα μέτρησης την ενεργειακή απόδοση ανά μονάδα μήκους μετώπου πυρκαγιάς** (**Van Wagner, 1987**). Η αύξηση του FWI σημαίνει υψηλότερο κίνδυνο πυρκαγιάς.

Κατηγοριοποίηση του Κινδύνου Πυρκαγιάς στην Ευρώπη

Το **EFFIS (European Forest Fire Information System)** έχει υιοθετήσει το **FWI** για την **εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς** σε **ευρωπαϊκή κλίμακα**, ταξινομώντας τις τιμές του σε **πέντε κλάσεις** (**EFFIS/JRC, 2023**):

Επίπεδο Κινδύνου Πυρκαγιάς	**FWI**
Χαμηλός	<11.2
Μέτριος	11.2 - 21.3
Υψηλός	21.3 – 38.0
Πολύ Υψηλός	38.0 – 50.0
Ακραίος	>50.0

Το **Ιούνιο του 2021**, εισήχθη μια **έκτη κατηγορία "Πολύ Ακραίος" Κίνδυνος Πυρκαγιάς** για τιμές **FWI >70**, με στόχο την καλύτερη διάκριση **εξαιρετικά επικίνδυνων συνθηκών**, ειδικά στη **Μεσογειακή Ευρώπη** κατά τους θερινούς μήνες (**EFFIS/JRC, 2023**).

Η Προσαρμογή του FWI στις Ευρωπαϊκές Συνθήκες

- Παρότι το **FWI** έχει δείξει καλή απόδοση σε **ποικίλα κλίματα**, η χρήση του εκτός Καναδά απαιτεί προσαρμογή μέσω **βαθμονόμησης με τοπικά δεδομένα** (**Viegas et al., 1999**).
- Η **βαθμονόμηση** περιλαμβάνει:
- Ανάλυση **ιστορικών δεδομένων καιρού και πυρκαγιών**.
- Προσαρμογή των **κατώτατων ορίων των επιπέδων κινδύνου**.
- Δοκιμές για την **ακρίβεια των προβλέψεων**.
- Χώρες με διαφορετικά κλιματικά χαρακτηριστικά έχουν προσαρμόσει το FWI στις δικές τους ανάγκες (**Alexander, 2008; De Groot et al., 2005; Viegas et al., 2004; Alves et al., 2018**).
- Το **EFFIS** παρέχει επιπλέον **δύο δυναμικούς δείκτες**, οι οποίοι συγκρίνουν το **τρέχον FWI** με μια ιστορική σειρά **30 ετών**, λαμβάνοντας υπόψη τις τοπικές και εποχικές διακυμάνσεις (**EFFIS/JRC, 2023**).

Το **FWI αποτελεί τη βάση για την επιχειρησιακή διαχείριση του κινδύνου πυρκαγιάς στην Ευρώπη**. Παρά τις διαφοροποιήσεις στις τοπικές συνθήκες, η **εναρμονισμένη χρήση του μέσω του EFFIS** συμβάλλει στη **βελτίωση των προειδοποιήσεων** και στη **στοχευμένη επιχειρησιακή απόκριση**, μειώνοντας τον **αντίκτυπο των δασικών πυρκαγιών**.

2.2.3. Κίνδυνος πυρκαγιάς και περιεκτικότητα υγρασίας νεκρών καυσίμων

Οι μεταβολές των καιρικών συνθηκών επηρεάζουν σημαντικά την **περιεκτικότητα υγρασίας των νεκρών καυσίμων**, δηλαδή των φυτικών υπολειμμάτων που βρίσκονται στο δασικό έδαφος, καθώς οι ατμοσφαιρικές συνθήκες καθορίζουν τη διαθεσιμότητα και την απώλεια νερού από αυτά (**Chuvieco et al., 2010**). Όταν η περιεκτικότητα υγρασίας μειώνεται, τα νεκρά καύσιμα γίνονται **πιο ξηρά και ευάλωτα στην ανάφλεξη**, αυξάνοντας έτσι τον κίνδυνο εκδήλωσης και εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς.

Η **υγρασία των νεκρών καυσίμων** αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν τη **συμπεριφορά της πυρκαγιάς**, καθώς και έναν από τους **παλαιότερους και πλέον χρησιμοποιούμενους δείκτες** στην εκτίμηση του **κινδύνου πυρκαγιάς** (**Carmo et al., 2022**).

Αντίθετα, η **περιεκτικότητα υγρασίας των ζωντανών φυτών** δεν περιλαμβάνεται συνήθως στα **συστήματα εκτίμησης κινδύνου πυρκαγιάς**, διότι είναι **πιο δύσκολο να εκτιμηθεί** αποκλειστικά από μετεωρολογικά δεδομένα, σε σύγκριση με τα νεκρά καύσιμα (**Chuvieco et al., 2014**).

Η σημασία του **βραχυπρόθεσμου υδατικού ισοζυγίου** στην ανάπτυξη σοβαρών πυρκαγιών αποτυπώνεται στον **Κωδικό Υγρασίας Λεπτού Καυσίμου (Fine Fuel Moisture Code - FFMC)**, ο οποίος είναι το ταχύτερα μεταβαλλόμενο στοιχείο του **Συστήματος FWI** (**Carmo et al., 2022**). Ο **FFMC** αποτελεί βασικό δείκτη της **ευφλεκτότητας των λεπτών καυσίμων** και της **πιθανότητας ανάφλεξης**, καθώς σχετίζεται άμεσα με την **περιεκτικότητα υγρασίας των λεπτών νεκρών καυσίμων (m_f)**, σύμφωνα με την εξίσωση του **Van Wagner (1987)**:

$$FFMC = 59.5 \times \frac{250.0 - m_f}{147.2 + m_f} \qquad \text{Equation 1}$$

Η περιεκτικότητα υγρασίας των λεπτών νεκρών καυσίμων, όπως τα **φύλλα του Pinus pinaster**, μεταβάλλεται **αντίστροφα** με την τιμή του **FFMC**.

Αυτές οι μεταβολές επηρεάζουν **τον Δείκτη Αρχικής Εξάπλωσης (ISI)**, ο οποίος στη συνέχεια επηρεάζει **τον Δείκτη Καιρού Πυρκαγιάς (FWI)** – την τελική έξοδο του συστήματος που εκφράζει το **δυναμικό κίνδυνο πυρκαγιάς**.

Όταν η περιεκτικότητα υγρασίας των νεκρών καυσίμων **είναι χαμηλή (υψηλό FFMC)**, οι πυρκαγιές ξεκινούν **εύκολα** και μπορούν να εξαπλωθούν **ταχύτατα** υπό την επίδραση του ανέμου και άλλων περιβαλλοντικών παραγόντων. Σε αυτές τις συνθήκες, το **FWI** είναι υψηλό, υποδεικνύοντας αυξημένο κίνδυνο ανεξέλεγκτης πυρκαγιάς.

Η **περιεκτικότητα υγρασίας των νεκρών καυσίμων** συνήθως κυμαίνεται μεταξύ **3% και 30%** (**Ribeiro, 2011**). Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι η **χαμηλή περιεκτικότητα υγρασίας των λεπτών καυσίμων** μπορεί να είναι καθοριστικός παράγοντας για την εκδήλωση **μεγάλων δασικών πυρκαγιών**, υποδεικνύοντας μια στενή συσχέτιση μεταξύ **κρίσιμων ορίων υγρασίας** και **μεταβάσεων στη συμπεριφορά της φωτιάς** (**Carmo et al., 2022**).

Όταν η περιεκτικότητα υγρασίας πέσει κάτω από **5%**, υπάρχει **ισχυρή πιθανότητα** η φωτιά **να** εμφανίσει **ακραία συμπεριφορά**, με **ταχεία εξάπλωση, υψηλή ένταση και δυσκολία καταστολής** (**Viegas et al., 2017**). Η **διακύμανση του m_f (υγρασία λεπτών νεκρών καυσίμων)** κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης πυρκαγιάς αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την κατανόηση και πρόβλεψη **ακραίων φαινομένων**.

Ακόμη και κατά τη διάρκεια της νύχτας, όπου **η αποτελεσματικότητα της πυρόσβεσης συνήθως ευνοείται** λόγω της **αύξησης της σχετικής υγρασίας** και της **πτώσης της θερμοκρασίας**, η παρακολούθηση της περιεκτικότητας υγρασίας είναι κρίσιμη. Η τάση για **θερμότερες και ξηρότερες νύχτες** – που αποδίδεται σε **καύσωνες** – μπορεί να αποτρέψει την **ανάκαμψη του m_f**, αυξάνοντας τον κίνδυνο έντονης νυχτερινής εξάπλωσης της φωτιάς. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε **υποεκτίμηση του κινδύνου** από τις επιχειρησιακές δυνάμεις κατά τις νυχτερινές ώρες.

<u>Μέθοδοι Εκτίμησης της Περιεκτικότητας Υγρασίας των Νεκρών Καυσίμων</u>

Η περιεκτικότητα υγρασίας των νεκρών καυσίμων μπορεί να:

- **Μετρηθεί απευθείας στο πεδίο**, π.χ. μέσω σταθμικών μεθόδων (**MCFIRE/ADAI, 2022; NWCG, 2021b**).
- **Εκτιμηθεί με τη χρήση ράβδων δείκτες υγρασίας καυσίμων**, όπως περιγράφεται από **van der Kamp et al. (2017)**.
- **Υπολογιστεί μέσω μοντέλων**, π.χ. **Viney (1991)**.

Τα λεπτά νεκρά καύσιμα βρίσκονται συνήθως σε **ισορροπία με το περιβάλλον** (**Lopes et al., 2014**). Η **περιεκτικότητα υγρασίας ισορροπίας (EMC)** ορίζεται ως το **ποσοστό υγρασίας που αποκτά ένα καύσιμο εάν αφεθεί για επαρκή χρόνο υπό σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες** (**Viney, 1991**).

Εκτός από τις επιδράσεις της **βροχόπτωσης**, μια **ακριβής εκτίμηση** της περιεκτικότητας υγρασίας των νεκρών καυσίμων μπορεί να βασιστεί στην **EMC**, η οποία υπολογίζεται από τις **άμεσες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα και της σχετικής υγρασίας** (**Schroeder & Buck, 1970**).

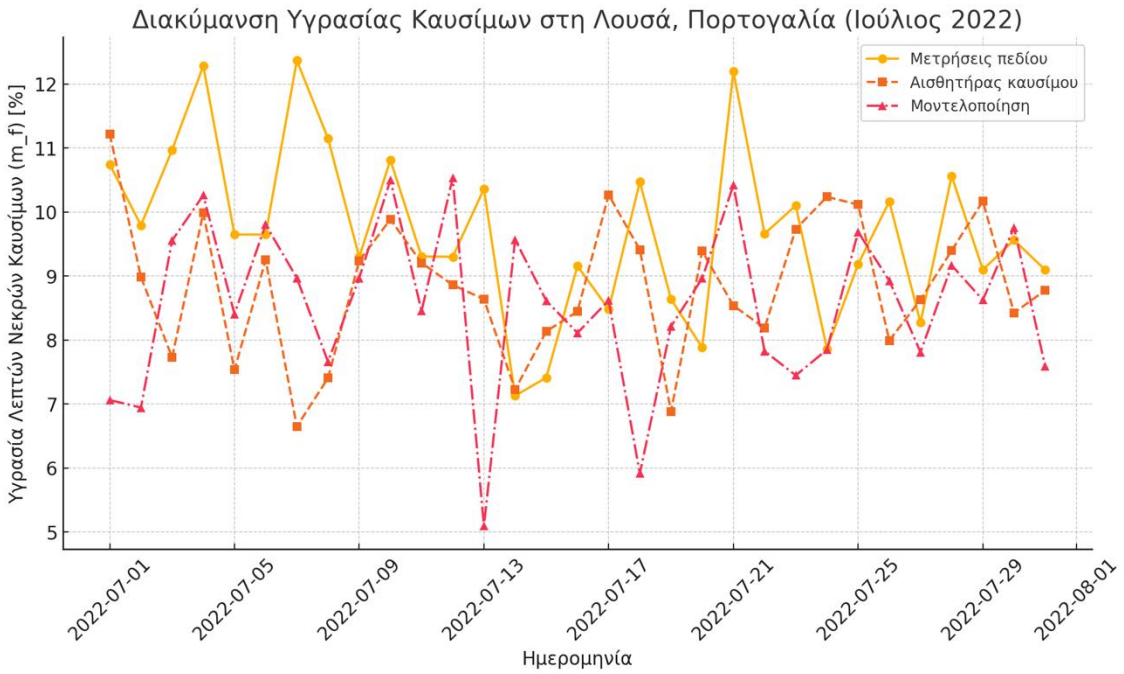
<u>Μελέτη Περίπτωσης: Διακύμανση της Υγρασίας των Καυσίμων στη Λουσά, Πορτογαλία (Ιούλιος 2022)</u>

Η **Εικόνα 1** παρουσιάζει τη **διακύμανση της υγρασίας των λεπτών νεκρών καυσίμων** στη Λούσα της Πορτογαλίας κατά τον **Ιούλιο του 2022**, μια περίοδος που χαρακτηρίστηκε από **έντονο καύσωνα (2-18 Ιουλίου) και αυξημένο κίνδυνο δασικών πυρκαγιών** στην Ιβηρική Χερσόνησο και τη Δυτική Ευρώπη.

Το διάγραμμα απεικονίζει τη διακύμανση του **m_f** με βάση **τρεις διαφορετικές μεθόδους εκτίμησης**:

- **Μετρήσεις πεδίου (σταθμική μέθοδος)** – Υπολογίζει άμεσα το m_f των φύλλων **Pinus pinaster**.
- **Αισθητήρας υγρασίας καυσίμου (CS506 10-ωρο)** – Βασίζεται σε μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας για εκτίμηση της περιεκτικότητας υγρασίας.
- **Μοντελοποίηση μετεωρολογικών δεδομένων (σύμφωνα με Lopes et al., 2014)** – Βασίζεται σε **θερμοκρασία και σχετική υγρασία** για εκτίμηση του m_f.

Η ανάλυση αυτών των δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας για την επιχειρησιακή κατανόηση της **ξήρανσης των καυσίμων**, της **ευφλεκτότητας των δασικών περιοχών** και της **πιθανότητας εκδήλωσης και εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών**.



Εικόνα 1. Περιεκτικότητα υγρασίας νεκρών καυσίμων (m_f) στη Λούσα κατά τη διάρκεια του Ιουλίου 2022. Υπόμνημα: Μετρήσεις πεδίου: m_f των βελόνων Pinus pinaster στο πεδίο· Ράβδος καυσίμου: m_f μετρημένο από έναν αισθητήρα υγρασίας καυσίμου (CS506 10-ωρο)· Μοντελοποίηση: m_f εκτιμώμενο για τις βελόνες Pinus pinaster σύμφωνα με τους Lopes, 2014. Επισημασμένη περίοδος (2/Ιουλ-18/Ιουλ): καύσωνας. (Απεικόνιση των συγγραφέων)

2.3. Ιδιότητες καυσίμων

Στο πλαίσιο των δασικών πυρκαγιών, η φυσική βλάστηση θεωρείται συνήθως ως το "καύσιμο", το οποίο είναι απαραίτητο για τη διαδικασία καύσης. Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες κάθε συγκεκριμένου καυσίμου καθορίζουν την ευκολία ανάφλεξης και τη διατήρηση της καύσης. Αυτή η ενότητα περιγράφει τις κύριες ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τα σωματίδια καυσίμου και τα σύνθετα καύσιμα.

Οι ιδιαιτερότητες των καυσίμων που απαντώνται στις **Περιοχές Μείξης Δασών-Οικισμών (WUI)** θα περιγραφούν στην αντίστοιχη ενότητα **(4.1)**.

Σε μια γενική ταξινόμηση, τα καύσιμα διακρίνονται με βάση δύο βασικές παραμέτρους:

(i) Βλαστική Κατάσταση

- Τα καύσιμα διαχωρίζονται σε:
- **Ζωντανά καύσιμα**: Περιλαμβάνουν **χόρτα, θάμνους και δέντρα**.
- **Νεκρά καύσιμα**: Αποτελούνται από **ξερά φύλλα, πεσμένα χόρτα, πεσμένα κλαδιά κ.λπ.**

Τα **νεκρά καύσιμα** έχουν σημαντικότερη επίδραση στην **εξάπλωση των επιφανειακών πυρκαγιών**, καθώς η περιεκτικότητά τους σε υγρασία μεταβάλλεται γρήγορα σε σχέση με τις μετεωρολογικές συνθήκες.

(ii) Στρώμα Καυσίμων

Με βάση την κατακόρυφη κατανομή τους, τα καύσιμα ταξινομούνται σε:

- **Καύσιμα εδάφους**: Υλικά που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, όπως **οργανική ύλη σε αποσύνθεση, τύρφη και ρίζες**.
- **Επιφανειακά καύσιμα**: Βλάστηση και υπολείμματα που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους, όπως **ξερά φύλλα, πεσμένα κλαδιά και νεκρή οργανική ύλη**.
- **Εναέρια καύσιμα**: Βλάστηση που βρίσκεται πάνω από το έδαφος, όπως **κόμες δέντρων, θάμνοι και αναρριχώμενα φυτά**.

Ο τρόπος εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς σχετίζεται άμεσα με το στρώμα στο οποίο αναπτύσσεται:

- **Πυρκαγιές εδάφους** → Καύσιμα εδάφους.
- **Πυρκαγιές επιφανείας** → Επιφανειακά καύσιμα.
- **Πυρκαγιές κόμης** → Εναέρια καύσιμα.

Όταν απαιτείται **ποσοτικοποίηση των καυσίμων** για τη **μοντελοποίηση** και την **ανάλυση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς**, απαιτείται μια πιο λεπτομερής περιγραφή των χαρακτηριστικών των σωματιδίων της καύσιμης ύλης και του στρώματος του καυσίμου.

Αυτές οι παράμετροι είναι κρίσιμες για την **αξιολόγηση του κινδύνου πυρκαγιάς** και τη **βελτιστοποίηση των στρατηγικών πυρόσβεσης**.

2.3.1. Σωματίδια καυσίμου

Τα **μεμονωμένα σωματίδια καυσίμου**, που συνθέτουν κάθε τύπο καυσίμου, έχουν διαφορετικές ιδιότητες που επηρεάζουν τις **διαδικασίες ανάφλεξης και καύσης**. Οι σημαντικότερες **ιδιότητες των δασικών καυσίμων** σε επίπεδο σωματιδίων είναι:

Κατηγορία Μεγέθους Σωματιδίων

Το **μέγεθος των σωματιδίων** αποτελεί μία από τις πιο κρίσιμες παραμέτρους που επηρεάζουν την **καύση** και τη **συμπεριφορά της πυρκαγιάς** (**Byram, 1959**), καθώς **μικρότερα σωματίδια** αναφλέγονται **ταχύτερα** και με **λιγότερη ενέργεια**.

Υπάρχει **ισχυρή συσχέτιση** μεταξύ του **μεγέθους των σωματιδίων** και της **περιεκτικότητας σε υγρασία**. Σύμφωνα με την αρχική ταξινόμηση του **George Byram (1963)**, που αργότερα υιοθετήθηκε από το **Εθνικό Σύστημα Αξιολόγησης Κινδύνου Πυρκαγιάς των ΗΠΑ** (**Bradshaw et al., 1984**), τα καύσιμα διακρίνονται με βάση το **διάστημα χρονικής υστέρησης**, που ορίζεται ως:

"Ο χρόνος που απαιτείται για την απώλεια περίπου δύο τρίτων της αρχικής περιεκτικότητας σε υγρασία του καυσίμου."

Αν ένα **σωματίδιο καυσίμου** βρίσκεται σε **ισορροπία υγρασίας** με το περιβάλλον (**EMC**), ο **χρόνος χρονικής υστέρησης** του αντιστοιχεί στον **μέσο χρόνο** που απαιτείται για να επιστρέψει σε αυτή την ισορροπία αν αλλάξουν οι περιβαλλοντικές συνθήκες.

Οι κατηγορίες χρονικής υστέρησης είναι οι εξής (**Byram & Nelson, 2015**):

- **1Ω**: Σωματίδια με χρονική υστέρηση **1 ώρα** – Διάμετρος <6 mm (βελόνες, φύλλα, χόρτα).
- **10Ω**: Σωματίδια με χρονική υστέρηση **10 ώρες** – Διάμετρος 6-25 mm (λεπτά κλαδιά, στελέχη θάμνων).
- **100Ω**: Σωματίδια με χρονική υστέρηση **100 ώρες** – Διάμετρος 25-75 mm (μεσαία κλαδιά).
- **1000Ω**: Σωματίδια με χρονική υστέρηση **1000 ώρες** – Διάμετρος >75 mm (παχιά κλαδιά, κορμοί).

Αυτή η ταξινόμηση βασίζεται στην αρχή ότι, υπό σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες, **λεπτά σωματίδια** χάνουν υγρασία **ταχύτερα** από τα **παχύτερα σωματίδια**, τα οποία συγκρατούν υγρασία για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα.

(i) Σχήμα

Το **σχήμα των σωματιδίων** εκφράζεται μέσω του **λόγου επιφάνειας προς όγκο (SAV - Surface Area to Volume Ratio)**, που ορίζεται ως:

$$SAV = \frac{\text{Επιφάνεια σωματιδίου}}{\text{Όγκος σωματιδίου}}$$

και εκφράζεται σε **cm^2/cm^3 (cm^{-1})** ή **m^2/m^3 (m^{-1})**.

Ο **SAV** επηρεάζει άμεσα την καύση, καθώς όσο **μεγαλύτερη είναι η εκτεθειμένη επιφάνεια** του σωματιδίου, τόσο **ταχύτερα θερμαίνεται και αναφλέγεται** (**Rothermel, 1972**).

- **Σωματίδια με υψηλό SAV** (π.χ. βελόνες πεύκων, χόρτα) → Αναφλέγονται **ευκολότερα**.

- **Σωματίδια με χαμηλό SAV** (π.χ. κορμοί δέντρων) → Αναφλέγονται **δυσκολότερα**.

(ii) Χημική Σύνθεση

Η **χημική σύσταση των καυσίμων** επηρεάζει τη διαδικασία καύσης, επιταχύνοντάς την ή επιβραδύνοντάς την. Οι **Bradshaw et al. (1984)** αναγνωρίζουν τρεις βασικές χημικές ιδιότητες:

- **Θερμικό περιεχόμενο**: Η ενέργεια που απελευθερώνεται ανά μονάδα μάζας καυσίμου κατά την καύση.
- **Συνολικό περιεχόμενο ορυκτών**: Το ποσοστό της μάζας του καυσίμου που αποτελείται από ανόργανα ορυκτά (τα οργανικά μέρη του καυσίμου διατηρούν την καύση).
- **Αποτελεσματικό περιεχόμενο ορυκτών**: Το ποσοστό των ορυκτών που επηρεάζουν τις χημικές αντιδράσεις της καύσης, κυρίως μέσω της απελευθέρωσης πτητικών αερίων.

(iii) Πυκνότητα

Η **πυκνότητα** των καυσίμων επηρεάζει τη **δυνατότητα ανάφλεξης** και τον **ρυθμό εξάπλωσης** της πυρκαγιάς (**Countryman, 1982**). Μαζί με την **περιεκτικότητα σε υγρασία**, επηρεάζει τη **θερμική αγωγιμότητα** του καυσίμου (**Chandler et al., 1983**).

- **Καύσιμα με χαμηλή πυκνότητα** → Αναφλέγονται **ταχύτερα** για την ίδια ποσότητα θερμότητας ή απαιτούν **λιγότερη θερμότητα** για την ανάφλεξή τους.

(iv) Περιεκτικότητα σε Υγρασία

Η **περιεκτικότητα σε υγρασία** αντιπροσωπεύει το **ποσοστό νερού ανά μονάδα ξηρής μάζας καυσίμου** και επηρεάζει άμεσα τη **δυνατότητα ανάφλεξης** και τη **διαδικασία καύσης**.

Η **υγρασία των νεκρών καυσίμων** εξαρτάται κυρίως από τις **περιβαλλοντικές συνθήκες** και μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το **μέγεθος των σωματιδίων** την ίδια χρονική στιγμή (**Bradshaw et al., 1984**). Ο **ρυθμός εξάπλωσης** της πυρκαγιάς (**Viegas et al., 2013**) και η **πιθανότητα ανάφλεξης** (**Viegas et al., 2014**) αυξάνονται καθώς **μειώνεται η υγρασία των καυσίμων**.

Όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία των **λεπτών νεκρών καυσίμων** πέσει κάτω από **5-7%**, υπάρχει **υψηλή πιθανότητα εμφάνισης ακραίας συμπεριφοράς πυρκαγιάς**, που χαρακτηρίζεται από **πυρκαγιές κόμης, εκτόξευση καύτρων και υψηλούς ρυθμούς εξάπλωσης**.

Η **υγρασία των ζωντανών καυσίμων** προκύπτει από την **αλληλεπίδραση φυσικών και φυσιολογικών διεργασιών** (**Pyne et al., 1996**), με αποτέλεσμα η **μεταβλητότητά** τους να διαφέρει από εκείνη των νεκρών καυσίμων (**Rego et al., 2021**). Σε αντίθεση με τα νεκρά καύσιμα, η υγρασία των ζωντανών καυσίμων μπορεί να υπερβαίνει το **100%** για τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες.

2.3.2. Στρώματα καυσίμων και τύποι καυσίμων

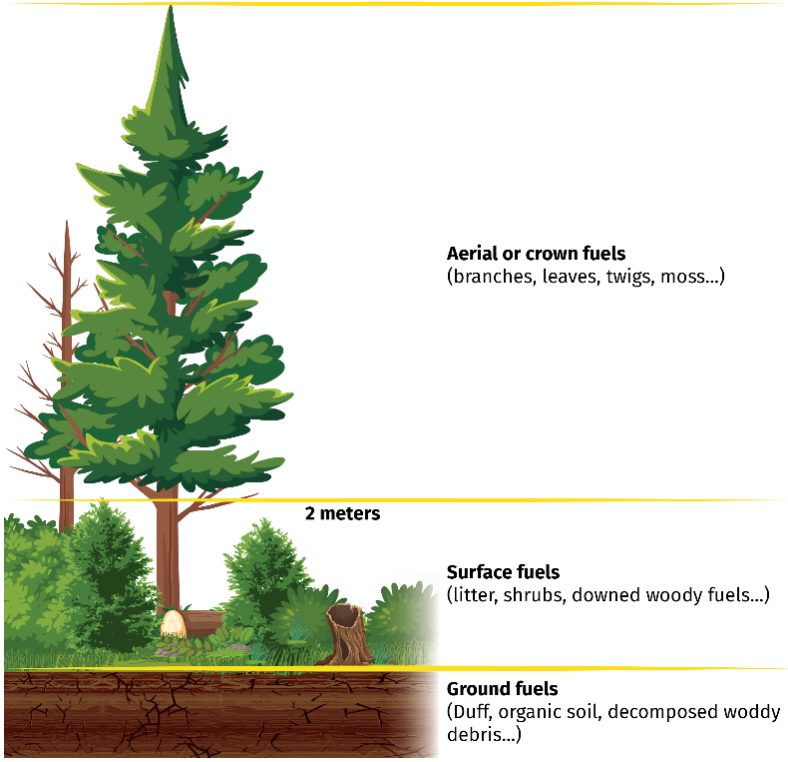
Κατά την περιγραφή των **δασικών καυσίμων** σε μια συγκεκριμένη περιοχή, η **διάταξη όλων των σωματιδίων καυσίμου** στα διάφορα **κατακόρυφα στρώματα** (**καύσιμα εδάφους, επιφανειακά και εναέρια**) ορίζεται ως **στρώμα καυσίμων**.

Κάθε **στρώμα** ή **επίπεδο** μπορεί να περιλαμβάνει **διαφορετικούς τύπους φυσικών καυσίμων**. Ένα στρώμα καυσίμων μπορεί να περιλαμβάνει **ένα, δύο ή και τα τρία επίπεδα**.

Παραδείγματα διάταξης στρωμάτων καυσίμου σε διαφορετικούς τύπους βλάστησης:

- **Λιβάδια**: Συνήθως περιλαμβάνουν **ένα μόνο επίπεδο**, που αποτελείται από **γρασίδια και/ή χόρτα**.
- **Θαμνότοποι**: Μπορεί να περιλαμβάνουν **δύο επίπεδα**, όπως **γρασίδι, φυλλάδα και θάμνους**.
- **Ώριμα δάση**: Συχνά περιλαμβάνουν **και τα τρία επίπεδα**, όπως **στρώμα χούμου, φυλλάδα, γρασίδι, θάμνους και δέντρα**.

Η **οριοθέτηση** κάθε στρώματος στο **κατακόρυφο προφίλ** είναι σε κάποιο βαθμό **υποκειμενική**, αλλά συνήθως ακολουθεί τη σχηματική αναπαράσταση που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2**.



Σχήμα 2. Σχηματική αναπαράσταση των στρωμάτων καυσίμων (πιστώσεις εικόνας: ADAI)

Αυτός ο χαρακτηρισμός σχετίζεται άμεσα με τις **απαιτήσεις των μοντέλων συμπεριφοράς πυρκαγιάς**, καθώς κάθε στρώμα καυσίμου μπορεί να υποστηρίξει έναν συγκεκριμένο τύπο διάδοσης πυρκαγιάς: **πυρκαγιά εδάφους, επιφανειακή πυρκαγιά και πυρκαγιά κόμης**. Περισσότερες λεπτομέρειες παρατίθενται στην ενότητα **Διάδοση Πυρκαγιάς**.

Τη δεκαετία του 1930, ο **Hornby (1936)** εισήγαγε τον όρο **"τύπος καυσίμου"**, βασισμένο σε **ποιοτικά κριτήρια**, καθορίζοντας τέσσερις κατηγορίες με βάση τη **δυνατότητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς** και την **αντίσταση στον έλεγχο**. Σήμερα, ο όρος χρησιμοποιείται γενικότερα για να περιγράψει την **κυρίαρχη βλάστηση** στο στρώμα καυσίμων ή ακόμη και σε κάθε επίπεδο του στρώματος.

Για παράδειγμα, ένα **στρώμα καυσίμων** μπορεί να χαρακτηριστεί **πευκοδάσος**, εάν τα **πεύκα είναι κυρίαρχα** συνολικά, ενώ το **επιφανειακό στρώμα** μπορεί να θεωρηθεί **θάμνοι ή φυλλάδα**, εάν ένα από αυτά υπερισχύει σε αυτό το επίπεδο. Η επιλογή του στρώματος που

είναι υπεύθυνο για τη διάδοση της πυρκαγιάς είναι καθοριστική για τη **μοντελοποίηση της συμπεριφοράς της φωτιάς**.

Από την άποψη της **διαχείρισης των πυρκαγιών**, τα **είδη βλάστησης από μόνα τους δεν αποτελούν τον πιο κρίσιμο παράγοντα**, καθώς το ίδιο είδος μπορεί να παρουσιάσει **πολύ διαφορετική συμπεριφορά πυρκαγιάς**, εάν μεταβληθούν τα **χαρακτηριστικά του στρώματος καυσίμων και των σωματιδίων του** (**Anderson, 1982; Riaño et al., 2002**).

Τα **σημαντικότερα χαρακτηριστικά του στρώματος καυσίμων** που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την **αξιολόγηση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς** είναι:

i. Φορτίο καυσίμου

Το **φορτίο καυσίμου** εκφράζει τη **μάζα του εύφλεκτου φυτικού υλικού ανά μονάδα επιφάνειας** και συνήθως αποδίδεται σε **kg/m²** ή **t/ha**.

Ανάλογα με τις **απαιτήσεις μοντελοποίησης της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς**, η παράμετρος αυτή μπορεί να παρουσιαστεί είτε ως **συνολική τιμή** είτε **διαχωρισμένη** σύμφωνα με:

- **Το στρώμα καυσίμου** (**έδαφος, επιφάνεια, κόμη**).
- **Την κατηγορία μεγέθους** (**λεπτά, κανονικά, μεσαία, βαριά καύσιμα**).
- **Τη βλαστική κατάσταση** (**ζωντανά και νεκρά καύσιμα**).

Για ένα συγκεκριμένο **στρώμα καυσίμου**, το **φορτίο καυσίμου** και η **περιεκτικότητα σε υγρασία** καθορίζουν την **ποσότητα καυσίμου που καταναλώνεται** και την **παραγόμενη θερμότητα** κατά την καύση.

Η ποσότητα καυσίμου που καίγεται επηρεάζει άμεσα:

- **Τις επιπτώσεις της πυρκαγιάς** στη βλάστηση και στο έδαφος (**Rego et al., 2021**).
- **Την εξάπλωση και την ένταση της πυρκαγιάς** (**Alexander & Cruz, 2020**).
- **Τις εκπομπές πυρκαγιάς και τις επιπτώσεις του καπνού** (**Miranda, 2004; Fernandes et al., 2022**).

ii. Ύψος καυσίμου

Επίσης γνωστό ως **βάθος καυσίμου**, αποτελεί μια εκτίμηση της **κατακόρυφης διάστασης της ζώνης καύσης** και είναι απαραίτητο για την **εκτίμηση της συμπύκνωσης του στρώματος καυσίμου** (**Cruz & Viegas, 1995**).

Παρότι η **εκτίμηση της ανώτερης οριοθέτησης του στρώματος καυσίμων** απαιτεί ορισμένη εμπειρία, η παράμετρος αυτή **μετράται εύκολα και γρήγορα**, γι' αυτό και χρησιμοποιείται συχνά στις **τεχνικές διπλής δειγματοληψίας** για την εκτίμηση του φορτίου καυσίμου.

iii. Συμπίεση στρώματος καυσίμου

Η **συμπίεση** ενός στρώματος καυσίμου αναφέρεται στην **ποσότητα καυσίμου ανά μονάδα όγκου** και χρησιμοποιείται για την **πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς** ως **χύδην πυκνότητα (kg/m³)**.

Ο βαθμός συμπίεσης επηρεάζει:

- **Τη διαθεσιμότητα αέρα για την καύση των σωματιδίων**.

- **Τη μεταφορά θερμότητας στα γειτονικά σωματίδια μπροστά από την πυρκαγιά** (**Chandler et al., 1983**).
- **Τη διακύμανση της υγρασίας στα καύσιμα εδάφους**, καθώς τα **υπερβολικά συμπυκνωμένα καύσιμα** περιορίζουν την εξάτμιση.

Λιγότερη συμπίεση σημαίνει **περισσότερο διαθέσιμο οξυγόνο** για την καύση. Ωστόσο, εάν τα **καύσιμα βρίσκονται πολύ αραιά μεταξύ τους**, η θερμότητα δεν μεταδίδεται αποτελεσματικά, καθιστώντας δυσκολότερη την ανάφλεξη των γειτονικών σωματιδίων.

Κάθε **κατηγορία μεγέθους καυσίμου** έχει ένα **ιδανικό επίπεδο συμπίεσης**, που εξισορροπεί την **παρουσία οξυγόνου** και τη **μεταφορά θερμότητας**, βελτιστοποιώντας έτσι τη διαδικασία καύσης.

iv. Συνέχεια στρώματος καυσίμου

Η **συνέχεια του καυσίμου** περιγράφει:

> *"Τον βαθμό ή την έκταση της συνεχούς ή αδιάλειπτης κατανομής των σωματιδίων καυσίμου μέσα σε ένα στρώμα καυσίμων, επηρεάζοντας έτσι την ικανότητα της πυρκαγιάς να διατηρήσει την καύση και να εξαπλωθεί"*. (**Drury, 2020**).

Υπάρχει **συνέχεια** όταν τα σωματίδια καυσίμου βρίσκονται **εντός της ζώνης καύσης το ένα του άλλου**, δηλαδή, όταν η καύση ενός σωματιδίου **προθερμαίνει το επόμενο**, διευκολύνοντας την ανάφλεξή του.

Ανάλογα με τον προσανατολισμό της, η **συνέχεια καυσίμου** διακρίνεται σε:

- **Οριζόντια συνέχεια**: Αναφέρεται στα **επιφανειακά καύσιμα** και
- **Κάθετη συνέχεια (καύσιμα-σκάλες)**: Αναφέρεται στην **κατακόρυφη σύνδεση μεταξύ των στρωμάτων**, υποστηρίζοντας τη μετάδοση της φωτιάς από τα **επιφανειακά καύσιμα προς τα καύσιμα της κόμης**.

v. Υγρασία κατάσβεσης

Η **υγρασία κατάσβεσης** εκφράζει την **περιεκτικότητα σε υγρασία** ενός στρώματος καυσίμου, στην οποία μια **πυρκαγιά δεν μπορεί πλέον να διαδοθεί**.

Πρόκειται για μια **βασική παράμετρο** στην εφαρμογή του **μοντέλου του Rothermel**, το οποίο αρχικά όριζε αυτή την τιμή ως **σταθερή στο 30%** για όλους τους τύπους καυσίμων. Ωστόσο, αργότερα διαπιστώθηκε ότι η **υγρασία κατάσβεσης διαφέρει** ανάλογα με:

- **Τη συμπύκνωση του στρώματος καυσίμων**.
- **Το μέγεθος των σωματιδίων**.
- **Την ταχύτητα του ανέμου και την κλίση του εδάφους** (**Bradshaw et al., 1984**).
- **Τη θέση στην περίμετρο της πυρκαγιάς** (**Fernandes et al., 2008**).

Οι **τιμές της υγρασίας κατάσβεσης**, που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα συμπεριφοράς πυρκαγιάς, κυμαίνονται από **12% έως 40%**, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν.

Για τα **ζωντανά καύσιμα**, οι τιμές αυτές μπορεί να είναι **ακόμη υψηλότερες**.

2.3.3. Μοντέλα καυσίμων

Η δημοσίευση του μοντέλου εξάπλωσης πυρκαγιάς του Rothermel (1972) συνοδεύτηκε από την ανάγκη ποσοτικής περιγραφής των δασικών καυσίμων μέσω ενός περιορισμένου αριθμού παραμέτρων, ώστε να καταστεί δυνατή η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της επιφανειακής πυρκαγιάς.

Το μοντέλο βασίζεται στην **υπόθεση** ότι η **βλάστηση** είναι **ομοιογενής** σε μια συγκεκριμένη περιοχή, ενώ **ο καιρός και η τοπογραφία** παραμένουν σταθεροί, επιτρέποντας στην πυρκαγιά να διατηρεί **σταθερά χαρακτηριστικά**, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να προβλεφθούν (**Ribeiro et al., 2021**).

Ο **Rothermel** όρισε το **μοντέλο καυσίμων** ως:

> *"Ένα πλήρες σύνολο δεδομένων καυσίμων που χρησιμοποιείται ως είσοδος στο μαθηματικό μοντέλο εξάπλωσης πυρκαγιάς"*.

Αρχικά, κατέγραψε **παραμέτρους** για **11 μοντέλα καυσίμων** (**Scott & Burgan, 2005**). Ο **Albini (1976)** επέκτεινε και βελτίωσε αυτά τα μοντέλα, προσθέτοντας **δύο επιπλέον μοντέλα**, δημιουργώντας αυτό που σήμερα είναι γνωστό ως τα **13 αρχικά μοντέλα καυσίμων συμπεριφοράς πυρκαγιάς** ή **13 μοντέλα καυσίμων NFFL (Northern Forest Fire Laboratory)**.

Αυτό το σύνολο, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως διεθνώς, **ομαδοποιεί τα καύσιμα σε 4 βασικές κατηγορίες**, βάσει του **κύριου φορέα διάδοσης της πυρκαγιάς**:

- **Ποώδη καύσιμα**
- **Θάμνους**
- **Ξυλώδη καύσιμα**
- **Υπολείμματα υλοτομίας**

Η ταξινόμηση αυτή περιγράφηκε λεπτομερώς από τον **Anderson (1982)**.

Πιο πρόσφατα, οι **Scott & Burgan (2005)** διεύρυναν αυτό το σύνολο δεδομένων σε **40 μοντέλα καυσίμων**, προκειμένου να περιγράψουν περισσότερες **τυπικές καταστάσεις καυσίμου** και να βελτιώσουν την **οπτικοποίηση των επιπτώσεων της διαχείρισης καυσίμων** μέσω εργαλείων προσομοίωσης της **συμπεριφοράς της πυρκαγιάς**.

<u>Ευρωπαϊκές Προσαρμογές Μοντέλων Καυσίμων</u>

Στην **Ευρώπη**, έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για την **προσαρμογή μοντέλων καυσίμων** στις ιδιαίτερες **περιβαλλοντικές και βιοκλιματικές συνθήκες**. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα περιλαμβάνουν:

- Το **σύστημα Prometheus (2000)**.
- Το **έργο FUELMAP (2011)**, το οποίο ανέπτυξε την ταξινόμηση των **ευρωπαϊκών καυσίμων** που χρησιμοποιείται στο **Ευρωπαϊκό Σύστημα Πληροφοριών Δασικών Πυρκαγιών (EFFIS, 2017)**.
- Το **έργο FirEUrisk**, το οποίο ανέπτυξε μια **ταξινόμηση τύπων καυσίμων** και την αντιστοίχισή τους στα **μοντέλα καυσίμων των Scott & Burgan** (**Aragoneses et al., 2023**).

Παράμετροι των Μοντέλων Καυσίμων

Το μοντέλο του **Rothermel (1972)** προβλέπει **την εξάπλωση επιφανειακής πυρκαγιάς**, επομένως τα **μοντέλα καυσίμων** περιγράφουν κατά κύριο λόγο το **στρώμα των επιφανειακών καυσίμων**.

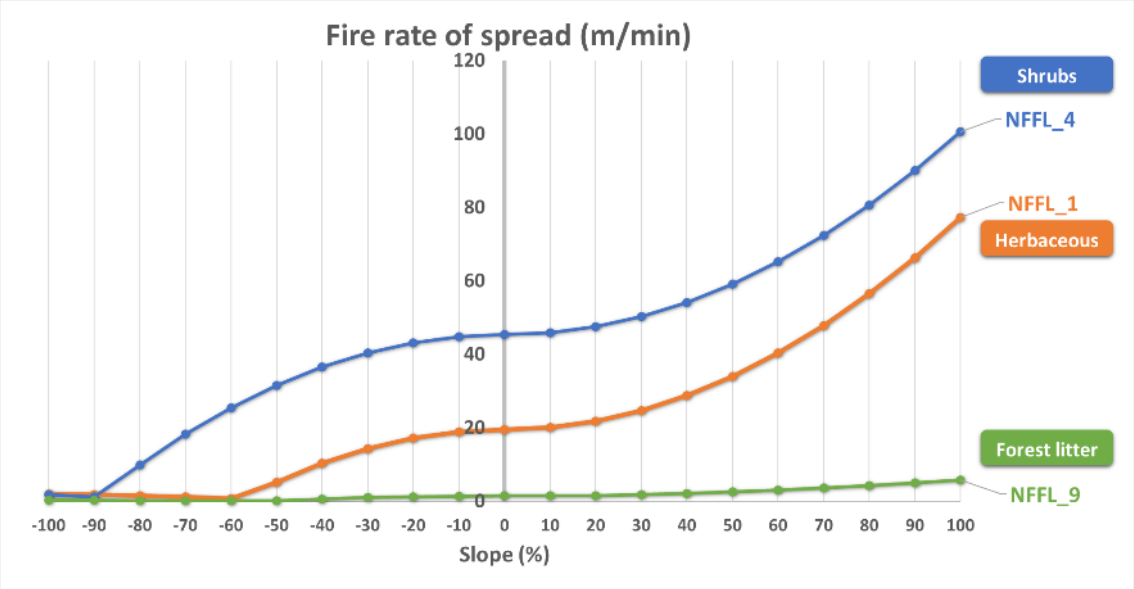
Οι **χαρακτηριστικές παράμετροι** που ποσοτικοποιούνται σε ένα **μοντέλο καυσίμου** είναι:

- **Φορτίο καυσίμου** ανά **βλαστική κατάσταση** (**ζωντανά ή νεκρά καύσιμα**) και **κατηγορία μεγέθους** (**1 ώρα, 10 ώρες, 100 ώρες**).
- **Ύψος στρώματος καυσίμων**.
- **Αναλογία επιφάνειας προς όγκο των σωματιδίων καυσίμου**, ανάλογα με τη **βλαστική κατάσταση** (**ζωντανά ή νεκρά**).
- **Θερμικό περιεχόμενο**.
- **Υγρασία κατάσβεσης νεκρών καυσίμων**.

Εφαρμογή των Μοντέλων Καυσίμων στην Προσομοίωση Πυρκαγιών

Τα εργαλεία **προσομοίωσης συμπεριφοράς πυρκαγιάς**, όπως τα **BehavePlus** (**Andrews, 2014**) και **FlamMap** (**Finney, 2006**) ενσωματώνουν ήδη τα **σύνολα των 13 και 40 μοντέλων καυσίμων**, επιτρέποντας στους χρήστες να **προσομοιώσουν τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς** με βάση διαφορετικά σενάρια.

Το **Σχήμα 3** απεικονίζει τα αποτελέσματα του **BehavePlus 6**, το οποίο υπολογίζει τον **ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς** για διάφορες **κλίσεις εδάφους**, με **άνεμο 20 km/h** που φυσάει **ανηφορικά**, σε **τρία διαφορετικά μοντέλα καυσίμων** του συνόλου **NFFL**.



Σχήμα 3. Παράδειγμα προσομοιώσεων συμπεριφοράς πυρκαγιάς, χρησιμοποιώντας το BehavePlus 6, για 3 διαφορετικά μοντέλα καυσίμων, σε διαφορετικές κλίσεις και με άνεμο 20km/h προς τα ανάντι.

Προσαρμοσμένα μοντέλα καυσίμων συχνά αναπτύσσονται για **συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές**. Για παράδειγμα:

- Το **σύνολο των 14 μοντέλων καυσίμων** που αναπτύχθηκε για την **Κεντρική Πορτογαλία** (**Cruz, 2005**).
- Το **σύνολο των 18 μοντέλων** που αναπτύχθηκε από τους **Fernandes et al. (2009)** για την **Ηπειρωτική Πορτογαλία**.

Η ανάπτυξη αυτών των μοντέλων περιλαμβάνει την **ποσοτικοποίηση των ιδιοτήτων** τόσο του **στρώματος καυσίμων** όσο και των **σωματιδίων καυσίμου**, όπως περιγράφηκαν νωρίτερα. Ωστόσο, το **πιο σημαντικό στοιχείο** είναι η **βαθμονόμηση των μοντέλων καυσίμων** βάσει της **παρατηρούμενης συμπεριφοράς των πυρκαγιών** (**Rego et al., 2021**).

Πρακτική Εφαρμογή των Μοντέλων Καυσίμων

Εκτός από τη χρήση **εργαλείων προσομοίωσης πυρκαγιάς**, τα **μοντέλα καυσίμων** συνήθως συνοδεύονται από:

- **Εκτιμήσεις εξάπλωσης και συμπεριφοράς πυρκαγιάς**, διευκολύνοντας την **αξιολόγηση στο πεδίο**.
- **Φωτογραφικούς οδηγούς**, οι οποίοι επιτρέπουν την **οπτική αντιστοίχιση** των μοντέλων καυσίμων με τις **παρατηρούμενες συνθέσεις καυσίμων** (**Anderson, 1982; Cruz, 2005; Patrick, 2009**).

2.4. Ρόλος της τοπογραφίας

Η **τοπογραφία** αποτελεί **βασικό παράγοντα** που επηρεάζει τόσο την **ένταση** όσο και τη **συμπεριφορά εξάπλωσης** της πυρκαγιάς. Περιλαμβάνει διάφορα **χαρακτηριστικά του εδάφους**, τα οποία αναφέρονται επίσης ως **τοπίο**. Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται τόσο **γενικές πληροφορίες** όσο και **εξειδικευμένες αναλύσεις** για συγκεκριμένες παραμέτρους που μπορούν να επηρεάσουν **σημαντικά** τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Σε ορισμένες συνθήκες, η **εξάπλωση της πυρκαγιάς** μπορεί να **κυριαρχείται από την τοπογραφία**, ενσωματώνοντας **μοτίβα μεταφοράς θερμότητας** που καθορίζουν την εξέλιξη της φωτιάς.

Συνοπτικά, η τοπογραφία μπορεί να επηρεάσει διάφορες **καθοριστικές παραμέτρους** της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς, όπως:

- **Μοτίβα ανέμου**:
    - Ορισμένες περιοχές ενδέχεται να εμφανίζουν **κατευθυνόμενους ανέμους**, επηρεαζόμενες από χαρακτηριστικά του **τοπίου** ή συγκεκριμένες **γεωμορφολογικές τοποθεσίες**, όπως:
        - **Φαράγγια**
        - **Ορεινές περιοχές**
        - **Παράκτιες ζώνες**
- **Συσσώρευση και κατανομή καυσίμων**:

Περιοχές με **αυξημένη σκίαση** ή **υγρασία**, όπως τα **φαράγγια**, ευνοούν τη **συσσώρευση και παραγωγή καυσίμων**. Αντίθετα, **ξηρότερες περιοχές**, όπως **εκτεθειμένες πλαγιές και κορυφογραμμές**, μπορεί να έχουν **περιορισμένη αλλά συνεχώς ξηρή καύσιμη ύλη**, οδηγώντας σε **ταχύτερη και πιο έντονη εξάπλωση της φωτιάς**.

Φυσικά και τεχνητά εμπόδια πυρκαγιάς:

Μεγάλες υδάτινες μάζες και **ορεινές αλυσίδες** μπορούν να λειτουργήσουν ως **φυσικά εμπόδια** στη διάδοση της πυρκαγιάς, καθώς περιορίζουν τη **διαθεσιμότητα καυσίμων**. **Ανθρωπογενείς παρεμβάσεις** που τροποποιούν την **κλίση ή την τοπογραφία** ενδέχεται επίσης να επηρεάζουν τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς, όπως:

- **Αιολικά πάρκα** (ανεμογεννήτριες σε κορυφογραμμές)
- **Αναβαθμίδες σε επικλινή εδάφη**

Η **επίδραση της τοπογραφίας** στην πυρκαγιά μπορεί να είναι **ιδιαίτερα έντονη** όταν συνδυάζεται με δυσμενείς **μετεωρολογικές συνθήκες** και υψηλά επίπεδα **καύσιμης ύλης**.

2.4.1. Κλίση εδάφους

Η **κλίση του εδάφους** σε σχέση με την **οριζόντια αναφορά** αποτελεί μια **κρίσιμη παράμετρο** της τοπογραφίας. Μπορεί να εκφραστεί είτε ως **γωνία (°)** είτε ως **ποσοστό κλίσης (%)**, όπου το ποσοστό υποδηλώνει **την κατακόρυφη άνοδο (σε μέτρα) για κάθε οριζόντια απόσταση**.

Οι **απότομες κλίσεις** είναι ένας **καθοριστικός παράγοντας** για την **εξάπλωση και την ένταση της πυρκαγιάς**. Σε κεκλιμένο έδαφος, οι **φλόγες πλησιάζουν περισσότερο το καύσιμο**, μειώνοντας την απόσταση μεταξύ τους και **ενισχύοντας τις διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας**. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την **επιτάχυνση της προόδου της φωτιάς σε ανωφέρεια**.

Αντίθετα, όταν η **φωτιά κατεβαίνει την πλαγιά**, τα φαινόμενα αυτά **είναι λιγότερο αποτελεσματικά**. Η **αυξημένη γωνία φλόγας** δυσχεραίνει τη μεταφορά θερμότητας, με αποτέλεσμα η **ταχύτητα εξάπλωσης της φωτιάς (ROS)** να είναι **χαμηλότερη ή ίση** με εκείνη σε επίπεδο έδαφος.

Η **κατανόηση της τοπογραφικής επίδρασης** και ιδιαίτερα η ανάλυση των **χαρακτηριστικών του τοπίου** είναι **απαραίτητες** για:

- Την **εκτίμηση της συμπεριφοράς εξάπλωσης της πυρκαγιάς**.
- Τη **μοντελοποίηση της πυρκαγιάς**.
- Τη **βελτιστοποίηση των μέτρων καταστολής**.

Επιπτώσεις διαφορετικών γωνιών κλίσης

- **Γωνίες κλίσης άνω των 20º (36%) - 25º (47%)**:
  - Έχουν **σημαντική επίδραση** στην **επιτάχυνση της πυρκαγιάς**.
- **Γωνίες κλίσης άνω των 30º (58%)**:
  - Δημιουργούν **μεγάλες δυσκολίες** στη μετακίνηση του **προσωπικού πυρόσβεσης**, τόσο **πεζή** όσο και με **οχήματα**.
  - Αυξάνουν **κατακόρυφα τον κίνδυνο επιχειρησιακών ατυχημάτων**.
- **Γωνίες κλίσης άνω των 40º (84%)**:
  - Είναι **σπάνιες**, καθώς το **έδαφος χάνει τη σταθερότητά του**.
  - Συναντώνται σε **συγκεκριμένα εδαφικά περιβάλλοντα**, όπως σε **ηφαιστειακούς λόφους** ή σε **απόκρημνες περιοχές**.

Η **κατανόηση των κλίσεων του εδάφους** είναι καθοριστικής σημασίας για τη **σωστή στρατηγική πυρόσβεσης**, ιδιαίτερα όταν απαιτείται **πεζοπορική επέμβαση ή προσέγγιση με οχήματα**.

2.4.2. Προσανατολισμός Τοπίου: Έκθεση στο Ηλιακό Φως και τον Άνεμο

Ο **προσανατολισμός του τοπίου** επηρεάζει σημαντικά τη **διαθεσιμότητα και την περιεκτικότητα σε υγρασία των καυσίμων**, διαμορφώνοντας έτσι τη **συμπεριφορά της πυρκαγιάς**. Στο **Βόρειο Ημισφαίριο**, οι περιοχές με **νότιο προσανατολισμό** (και αντίστροφα στο Νότιο Ημισφαίριο) είναι **συνήθως πιο ξηρές**, καθώς δέχονται **μεγαλύτερη έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία** και επηρεάζονται περισσότερο από την **επίδραση του ανέμου**.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα:

- **Μειωμένη περιεκτικότητα υγρασίας στα καύσιμα**, καθιστώντας τα **ευκολότερα αναφλέξιμα**.
- **Αυξημένο ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς**, σε σύγκριση με περιοχές που έχουν **βορεινό προσανατολισμό**, όπου η **υγρασία διατηρείται περισσότερο**.

Ο προσανατολισμός του τοπίου αποτελεί έναν **βασικό παράγοντα στη διαχείριση και καταστολή πυρκαγιών**, καθώς επηρεάζει την **προτεραιοποίηση των επιχειρησιακών δράσεων** και την **αξιολόγηση του κινδύνου εξάπλωσης**.

2.4.3. Υψόμετρο: Μοτίβα Θερμοκρασίας και Ανέμου

Υπό κανονικές συνθήκες, το υψόμετρο μπορεί να επηρεάσει τα μοτίβα θερμοκρασίας και ανέμου, ενώ παράλληλα επηρεάζει την τυπολογία και την ανάπτυξη της βλάστησης, καθώς και την περιεκτικότητα υγρασίας των καυσίμων. Συνολικά, αυτές οι μεταβολές που σχετίζονται με το υψόμετρο μπορούν να διαφοροποιήσουν τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς, τροποποιώντας τις συνθήκες εξάπλωσης και έντασής της.

2.4.4. Καμπυλότητα εδάφους

Η **καμπυλότητα του εδάφους** μπορεί να επηρεάσει την **εξάπλωση της πυρκαγιάς**, μεταβάλλοντας την **ταχύτητά της** λόγω της **γωνίας των φλογών** και της **αποτελεσματικότητας της μεταφοράς θερμότητας** προς τα άκαυστα καύσιμα. Πιο συγκεκριμένα:

- **Ευθείες πλαγιές** παρουσιάζουν **πιο προβλέψιμη συμπεριφορά** στην εξάπλωση της φωτιάς.
- **Κοίλες ή κυρτές πλαγιές** συνδέονται συχνά με **αυξημένο ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς**, ιδιαίτερα κοντά στην **κορυφή** ή τον **πυθμένα**, ανάλογα με την τοπογραφία των **απότομων πλαγιών** του τοπίου.

Ιδιαίτερη Περίπτωση- Φαράγγια

Σε περιοχές με **μορφολογία φαραγγιού**, το **κοίλο σχήμα** του εδάφους μπορεί να **ενισχύσει τη ροή μεταφοράς θερμότητας** προς τη **ζώνη καύσης**, δημιουργώντας ένα **φαινόμενο ανάδρασης** που οδηγεί σε **επιτάχυνση της πυρκαγιάς**.

Η κατανόηση αυτών των τοπογραφικών επιδράσεων είναι ζωτικής σημασίας για την **πρόβλεψη της συμπεριφοράς της φωτιάς** και τον **κατάλληλο επιχειρησιακό σχεδιασμό πυρόσβεσης**.

2.4.5. Κορυφογραμμές

Οι **κορυφογραμμές** συνδέονται συνήθως με **σύνθετα μοτίβα ανέμου**, τα οποία περιλαμβάνουν **αλλαγές κατεύθυνσης λόγω διαχωρισμού ροής, ανακυκλοφορίας και σχηματισμού στροβίλων**. Ο **άνεμος**, καθώς ρέει πάνω ή γύρω από κορυφογραμμές, μπορεί να δημιουργήσει **πολύπλοκες συνθήκες εξάπλωσης της πυρκαγιάς**, οι οποίες μπορούν είτε **να επιταχύνουν** είτε **να επιβραδύνουν** την πορεία της φωτιάς.

Εάν η **πυρκαγιά καθοδηγείται από τον άνεμο**, είναι πιθανό:

- Να **εξαπλωθεί ταχύτατα πλευρικά** κατά μήκος της κορυφογραμμής, **διευρύνοντας το μέτωπό της**.
- Να **εισχωρήσει στην κατηφορική πλαγιά** με **πολύ μεγαλύτερη εγκάρσια διάσταση**, καθιστώντας την πιο δύσκολη στην κατάσβεση.

Ειδικές Επιπτώσεις των Κορυφογραμμών στη Συμπεριφορά της Πυρκαγιάς

Οι κορυφογραμμές συχνά σχετίζονται με **αυξημένη πιθανότητα σχηματισμού πυροστροβίλων**. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορούν να ευνοήσουν την **οριζόντια εκτεταμένη εξάπλωση της πυρκαγιάς**, λόγω **τοπικών αεροδυναμικών επιδράσεων**. Ωστόσο, υπό **συγκεκριμένες συνθήκες**, μπορούν να λειτουργήσουν ως **φυσικά εμπόδια**, μειώνοντας τον ρυθμό εξάπλωσης της φωτιάς εξαιτίας των **ανεμολογικών και τοπογραφικών επιδράσεων**.

Η **κατανόηση της αλληλεπίδρασης ανέμου και κορυφογραμμών** είναι κρίσιμη για την **πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς** και τον σχεδιασμό **κατάλληλων τακτικών καταστολής**.

.

2.4.6. Σύνθετη Τοπογραφία

Ο όρος **σύνθετη τοπογραφία** αναφέρεται σε περιοχές όπου **συνδυάζονται διάφορα τοπογραφικά χαρακτηριστικά**, συνήθως συνδεδεμένα με **αυξημένες κλίσεις και ιδιαίτερες γεωμορφολογικές δομές**. Η **σύνθετη τοπογραφία** επηρεάζει σημαντικά:

- **Τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς**, καθιστώντας την **πιο δύσκολο να προβλεφθεί**.
- **Τις επιχειρήσεις καταστολής**, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα της επέμβασης και δυσχεραίνοντας την **καθοδήγηση ασφαλών στρατηγικών αντιμετώπισης**.

Επιπτώσεις της Σύνθετης Τοπογραφίας στη Συμπεριφορά της Πυρκαγιάς

Συνδυασμένες κλίσεις, διαφορετικά χαρακτηριστικά εδάφους και **διαφορετικά επίπεδα έκθεσης** επηρεάζουν τη συμπεριφορά των **καυσίμων** και τη **ροή του ανέμου**. Τα παραπάνω δημιουργούν **εναλλακτικά μοτίβα εξάπλωσης της πυρκαγιάς**, τα οποία **είναι δύσκολο να προσομοιωθούν και να προβλεφθούν**. Αυτό το ιδιαίτερα **δυσμενές επιχειρησιακό σενάριο** σχετίζεται συνήθως με **αυξημένη πιθανότητα μεταφοράς καύτρων**, οδηγώντας σε **ταχύτερη και πιο απρόβλεπτη διάδοση της φωτιάς**. Η κατανόηση της **σύνθετης τοπογραφίας** είναι κρίσιμη για τον **επιχειρησιακό σχεδιασμό** και τη **διαχείριση των δασικών πυρκαγιών**, ειδικά σε περιοχές με έντονα ανάγλυφα και ποικίλες τοπογραφικές συνθήκες.

Τα χαρακτηριστικά της **σύνθετης τοπογραφίας πυρκαγιάς** σχετίζονται με **πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις με τη ροή του ανέμου**, καθιστώντας τη **συμπεριφορά της πυρκαγιάς δύσκολα προβλέψιμη**.

Για παράδειγμα, σε **κεκλιμένες κορυφογραμμές** (**Abouali et al., 2021**), η πυρκαγιά μπορεί να **εξαπλωθεί ταχύτερα προς τα κατάντι** σε ορισμένα τμήματα του εδάφους, σε αντίθεση με τη συνήθη τάση εξάπλωσης προς τα ανάντι.

Επιπλέον, η **παρουσία φαραγγιών ενσωματωμένων σε επίπεδες κλίσεις** αποτελεί παράγοντα **αυξημένου κινδύνου**, καθώς η συμπεριφορά της πυρκαγιάς μπορεί **να αλλάξει δραστικά** όταν εισέρχεται σε ένα **ρηχό φαράγγι**, διαφοροποιώντας εντελώς το **μοντέλο εξάπλωσης** στην κλίση.

Όταν η εξάπλωση της πυρκαγιάς **καθοδηγείται κυρίως από την τοπογραφία**, η **έντασή της επηρεάζεται άμεσα** από **γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά**, όπως:

- **Απότομες κλίσεις**, που αυξάνουν τη θερμική μεταφορά.
- **Έκθεση στο ηλιακό φως**, που μειώνει την υγρασία των καυσίμων.
- **Τοπικά μοτίβα ανέμου**, που μπορούν να επιταχύνουν ή να εκτρέψουν τη φωτιά.
- **Υψόμετρο**, που μεταβάλλει τις **μικροκλιματικές συνθήκες** και επηρεάζει τη δυναμική της εξάπλωσης.

Επιπλέον, **καμπυλότητες εδάφους και κορυφογραμμές** μπορούν να προκαλέσουν **πρόσθετες αλλαγές** στην **εξέλιξη της πυρκαγιάς**, καθώς σχετίζονται με:

- **Σχηματισμό πυροστροβίλων**.
- **Ανάπτυξη οριζόντιας στροβιλότητας**, που εντείνει την ασταθή συμπεριφορά της φωτιάς.

Τελικά, η **σύνθετη τοπογραφία** εισάγει **πολλαπλές παραμέτρους**, δύσκολες να ενσωματωθούν σε μοντέλα πρόβλεψης, ενισχύοντας την **ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς** και αυξάνοντας την **επιχειρησιακή αβεβαιότητα** στη διαχείριση και καταστολή της.

2.5. Τύποι και τρόποι διάδοσης πυρκαγιάς

2.5.1. Τύποι πυρκαγιών

Ανάλογα με τα **στρώματα της βλάστησης** στα οποία εξαπλώνονται, οι πυρκαγιές ταξινομούνται στις ακόλουθες κατηγορίες:

Υπόγειες πυρκαγιές

- Εξαπλώνονται **κάτω από την επιφάνεια του εδάφους**, συνήθως με **μη φλογώδη καύση**.
- Καταναλώνουν **οργανικό υλικό**, όπως το **χούμο** και τα **στρώματα τύρφης**.

Επιφανειακές πυρκαγιές

- Εξαπλώνονται **πάνω από την επιφάνεια του εδάφους**, με την παρουσία **φλογώδους μετώπου**.
- Καταναλώνουν **φυλλάδα, γρασίδι, θάμνους και μικρά δέντρα**.

Πυρκαγιές κόμης

- Εξαπλώνονται καταναλώνοντας το **φύλλωμα της κόμης των δέντρων**.
- Συνήθως υποστηρίζονται από **επιφανειακή πυρκαγιά**, η οποία **τροφοδοτεί και διαδίδει τη φωτιά** από δέντρο σε δέντρο.

Κηλιδώσεις (spotting)

- Προκαλούνται από **καιόμενα σωματίδια ή σπινθήρες**, τα οποία **εκτοξεύονται** από τους προηγούμενους τύπους πυρκαγιών.
- Τα σωματίδια μεταφέρονται από τον **ατμοσφαιρικό ή τον προκαλούμενο από την πυρκαγιά άνεμο** και, όταν προσγειωθούν σε **εύφλεκτα καύσιμα**, μπορούν να προκαλέσουν **νέες αναφλέξεις**.

Το **μεγαλύτερο μέρος της παρούσας έκθεσης** επικεντρώνεται στις **πυρκαγιές επιφανείας**, καθώς αυτές είναι οι πιο **συνηθισμένες** και **μεγάλες δασικές πυρκαγιές** και ευθύνονται για το **μεγαλύτερο μέρος των καμένων εκτάσεων**. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι **ιδιαιτερότητες των υπόγειων πυρκαγιών**, ειδικά κατά την κατάσβεσή τους, όπως η περίπτωση των **πυρκαγιών τύρφης**, οι οποίες **δεν εξετάζονται σε αυτή τη μελέτη**. Οι **πυρκαγιές κόμης** και οι **κηλιδώσεις (spotting)** αντιμετωπίζονται ως **ειδικές περιπτώσεις Ακραίας Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς** και αναλύονται στις αντίστοιχες ενότητες.

2.5.2. Τρόποι διάδοσης επιφανειακής πυρκαγιάς

Ανάλογα με τη **συμπεριφορά της εξάπλωσής τους**, οι επιφανειακές πυρκαγιές μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

1. Οριακή Συμπεριφορά (Marginal Fire Behavior)

Αντιστοιχεί σε περιπτώσεις όπου η πυρκαγιά **βρίσκεται σε αρχικό στάδιο** ή στη **φάση κατάσβεσης**. Οι συνθήκες **ανάφλεξης και εξάπλωσης είναι δυσμενείς**, όπως σε καύσιμα με **υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία** ή σε περιοχές με **αραιά κατανεμημένη βλάστηση**.

Σημασία της Οριακής Συμπεριφοράς:

- Είναι **κρίσιμη** για την **αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας** των μέτρων καταστολής, όπως η χρήση **νερού ή επιβραδυντικών ουσιών**.
- Σχετίζεται με την **πιθανότητα αναζωπύρωσης** μιας φαινομενικά κατεσβεσμένης πυρκαγιάς.
- Περιλαμβάνει **τεχνικές διαχείρισης καυσίμων**, όπως η **τροποποίηση της πυκνότητας της βλάστησης** ή η δημιουργία **αντιπυρικών ζωνών**.
- Οι **υπόγειες πυρκαγιές τύρφης**, που καίγονται με **υποβόσκουσα καύση** χωρίς φλόγα, μπορούν επίσης να ενταχθούν σε αυτή την κατηγορία.

2. Στατική Συμπεριφορά (Quasi-Steady Fire Behavior)

Αφορά περιπτώσεις όπου οι **ιδιότητες εξάπλωσης της πυρκαγιάς** (όπως ο **ρυθμός εξάπλωσης – ROS**) **παραμένουν σταθερές** σε βάθος χρόνου. Επίσης οι **περιβαλλοντικές συνθήκες** (τοπογραφία, βλάστηση, μετεωρολογία) **δεν μεταβάλλονται σημαντικά** κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς.

Χαρακτηριστικά της Στατικής Συμπεριφοράς:

Η στατική συμπεριφορά επιτρέπει την **αξιόπιστη εκτίμηση των μέσων τιμών εξάπλωσης** της φωτιάς σε κάθε χρονική περίοδο. Αν και είναι **η πιο κοινή υπόθεση στις περισσότερες επιστημονικές μελέτες**, **στην πραγματικότητα είναι σπάνια** και ισχύει μόνο υπό **πολύ συγκεκριμένες και σταθερές συνθήκες**.

3. Δυναμική Συμπεριφορά (Dynamic Fire Behavior)

Αφορά περιπτώσεις όπου η **αλληλεπίδραση της φωτιάς με το περιβάλλον της τροποποιεί** τις ιδιότητες εξάπλωσης με την πάροδο του χρόνου, **ακόμη και όταν οι εξωτερικές συνθήκες**

φαίνονται σταθερές. Η **χρονική μεταβλητότητα** της φωτιάς είναι τόσο έντονη, που η απλή χρήση μέσων τιμών **δεν είναι αντιπροσωπευτική** της πραγματικής συμπεριφοράς της πυρκαγιάς.

Σημασία της Δυναμικής Συμπεριφοράς:

- Είναι **ο πιο συνηθισμένος τύπος συμπεριφοράς**, ιδιαίτερα σε **μεγάλες δασικές πυρκαγιές**.
- Παίζει **κρίσιμο ρόλο** στην **ανάλυση ατυχημάτων** που σχετίζονται με πυρκαγιές.
- Συνδέεται άμεσα με **φαινόμενα ακραίας συμπεριφοράς πυρκαγιάς**, τα οποία αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια.

Η κατανόηση αυτών των **τριών τρόπων διάδοσης** είναι ζωτικής σημασίας για την **επιχειρησιακή διαχείριση** και την **πρόβλεψη της εξέλιξης των δασικών πυρκαγιών**.

3. Ακραία Συμπεριφορά Πυρκαγιάς (Extreme Fire Behavior)

3.1. Χαρακτηρισμός της ακραίας συμπεριφοράς πυρκαγιάς (ΑΣΠ)

Στη μελέτη των **Tedim et al. (2018)**, η έννοια του **"Ακραίου Συμβάντος Δασικής Πυρκαγιάς"** ορίστηκε με βάση διάφορα κριτήρια, σύμφωνα με τα οποία μια δασική πυρκαγιά ταξινομείται ως τέτοιο όταν:

- **Η εξάπλωσή της**,
- **Το μέγεθός της**, ή
- **Οι επιπτώσεις της**

υπερβαίνουν συγκεκριμένα όρια έντασης και σοβαρότητας.

Ωστόσο, είναι **σημαντικό να τονιστεί** ότι ένα **Ακραίο Συμβάν δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την Ακραία Συμπεριφορά Πυρκαγιάς**. Ένα **ακραίο συμβάν** περιλαμβάνει πάντα **ένα ή περισσότερα επεισόδια**. Δυνητικά, **η ακραία συμπεριφορά πυρκαγιάς μπορεί να εμφανιστεί ακόμη και σε μικρής έκτασης συμβάντα**, που δεν πληρούν τα κριτήρια για να χαρακτηριστούν ως **ακραία**.

Για λόγους **ασφάλειας στην καταστολή πυρκαγιών**, ακολουθείται ο ορισμός της **ΑΣΠ** όπως διατυπώθηκε από τον **Viegas (2012)**:

"Ακραία Συμπεριφορά Πυρκαγιάς είναι το σύνολο των χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων εξάπλωσης μιας δασικής πυρκαγιάς, που καθιστούν αδύνατο τον ασφαλή έλεγχό της, χρησιμοποιώντας τους διαθέσιμους τεχνικούς πόρους και τις υφιστάμενες γνώσεις."

Αυτός ο ορισμός υπογραμμίζει την **επιχειρησιακή σημασία της ΑΣΠ**, καθώς οι συνθήκες υπό τις οποίες εκδηλώνεται **ξεπερνούν τις ικανότητες** καταστολής με τις **σημερινές τεχνολογίες και μεθόδους διαχείρισης πυρκαγιών**.

3.1.1. Δυναμική Συμπεριφορά Πυρκαγιάς

Παραδοσιακά θεωρείται ότι η **συμπεριφορά της πυρκαγιάς** σε ένα δεδομένο σημείο επηρεάζεται από τρεις βασικούς παράγοντες:

- **Τοπογραφία**
- **Βλάστηση (καύσιμη ύλη)**
- **Μετεωρολογία**

Αυτοί οι τρεις παράγοντες συνθέτουν το **"Τρίγωνο των Παραγόντων Πυρκαγιάς"**. Ο ρόλος των παραγόντων αυτών έχει περιγραφεί προηγουμένως.

Ωστόσο, η **έρευνα και η επιχειρησιακή παρατήρηση** της εξάπλωσης της πυρκαγιάς έχουν δείξει ότι, **ακόμη και όταν αυτοί οι τρεις παράγοντες παραμένουν σταθεροί, η συμπεριφορά της πυρκαγιάς μπορεί να αλλάζει σημαντικά**. Έχει παρατηρηθεί ότι:

- **Ο Ρυθμός Εξάπλωσης (RE) της πυρκαγιάς δεν είναι σταθερός**, ακόμη και σε φαινομενικά σταθερές συνθήκες.
- Οι αλλαγές αυτές **δεν εξηγούνται πλήρως** από την τοπογραφία, τη βλάστηση και τη μετεωρολογία.

Αυτή η διαπίστωση οδήγησε τον **Viegas (2005)** να προτείνει την έννοια του **"Τετραγώνου των Παραγόντων Πυρκαγιάς"**, προσθέτοντας τον **"Ωρολογιακό Χρόνο"** ως τέταρτο κρίσιμο παράγοντα.

Ο Δυναμικός Χαρακτήρας της Εξάπλωσης της Πυρκαγιάς

Η εξάπλωση της πυρκαγιάς επηρεάζεται από **επαγωγικές διεργασίες**, οι οποίες προκύπτουν από την **αλληλεπίδραση της φωτιάς με το περιβάλλον**.

Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται **"σύζευξη πυρκαγιάς-ατμόσφαιρας"** και οδηγεί σε **συνεχείς αλλαγές στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς**, καθιστώντας τον **Ρυθμό Εξάπλωσης (ROS) ρητά εξαρτώμενο από το χρόνο**.

Επιχειρησιακή Σημασία της Δυναμικής Συμπεριφοράς

Οι **αλλαγές του ρυθμού εξάπλωσης** με την πάροδο του χρόνου **μπορεί να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην ασφάλεια** των πυροσβεστικών δυνάμεων. Υπάρχουν **πολύ λίγες περιπτώσεις** στις οποίες ο ρυθμός παραμένει σταθερός, όπως στις **πυρκαγιές** που εξαπλώνονται αντίθετα με την κλίση ή τον άνεμο ή στις **πλευρικές πυρκαγιές**, όταν δεν υπάρχει **κλίση ή άνεμος**. Σε **όλες τις άλλες περιπτώσεις**, ο ΡΕ **θα μεταβάλλεται**, ακόμη και όταν **οι παράγοντες της καύσιμης ύλης, της κλίσης και του ανέμου παραμένουν σταθεροί**.

Για λόγους **ασφάλειας** στις επιχειρήσεις καταστολής, είναι **απαραίτητο να έχουμε διαρκώς επίγνωση** ότι **"Αυτό που κάνει η πυρκαγιά τώρα μπορεί να είναι πολύ διαφορετικό από αυτό που θα κάνει στα επόμενα λεπτά.".** Αυτός ο κανόνας αποτελεί **κρίσιμη υπενθύμιση** ότι η συμπεριφορά της φωτιάς **είναι δυναμική**, και οι πυροσβεστικές δυνάμεις **πρέπει να προσαρμόζονται συνεχώς στις μεταβολές της**.

3.1.2. Ένταση πυρκαγιάς

Στον ορισμό της **Ακραίας Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς (ΑΣΠ)** που δόθηκε από τον **Viegas (2012)**, **δεν** περιλαμβάνονται **ποσοτικά όρια**, καθώς η έννοια του "ακραίου" είναι **σχετική** και εξαρτάται από:

- **Τις συνθήκες και τις περιστάσεις** της πυρκαγιάς.
- **Το επίπεδο εμπειρίας και εκπαίδευσης** του επιχειρησιακού προσωπικού.
- **Τους διαθέσιμους πόρους** για την καταστολή της πυρκαγιάς.

Η **ασφάλεια του προσωπικού** κρίνεται κυρίως με βάση:

- **Τις ιδιότητες εξάπλωσης της πυρκαγιάς**, με βασικότερο δείκτη την **ένταση της γραμμής πυρός (fireline intensity, kW/m)**.
- **Τα επιχειρησιακά μέσα και τις γνώσεις** που διαθέτουν οι ομάδες καταστολής.

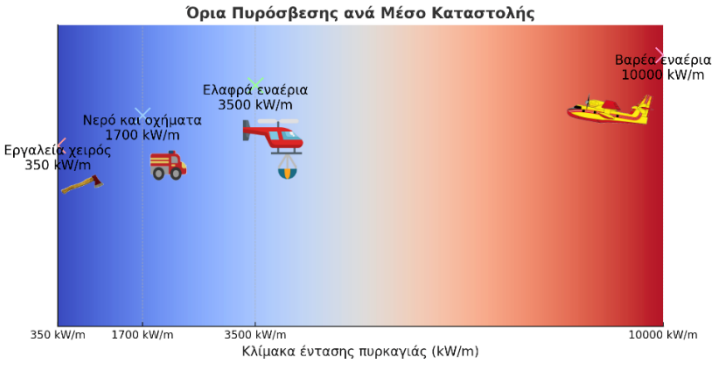
Υποτίθεται ότι **όσο καλύτερα εκπαιδευμένο** είναι το προσωπικό, **τόσο καλύτερα προετοιμασμένο** είναι για να αντιμετωπίσει πυρκαγιές **με υψηλότερη ένταση**.

Όρια Επιχειρησιακής Απόκρισης Ανάλογα με την Ένταση της Πυρκαγιάς

Αν και δεν υπάρχει αυστηρό όριο, είναι **γενικά αποδεκτό** ότι με τις **σημερινές τεχνολογίες και τακτικές πυρόσβεσης**, η **άμεση επίθεση** δεν είναι **εφικτή** όταν η ένταση της φωτιάς **υπερβαίνει τα 10 MW/m** (10.000 kW/m). Ωστόσο, **ανάλογα με τους διαθέσιμους πόρους**, τα **πραγματικά όρια επέμβασης** είναι **σημαντικά χαμηλότερα**, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 2**.

Πίνακας 2. Όρια πυρόσβεσης ανάλογα με την ένταση της πυρκαγιάς..

Μέσα Καταστολής	Μέγιστη ένταση πυρκαγιάς (kW/m)
Εργαλεία χειρός	350
Νερό και οχήματα	1700
Ελαφρά εναέρια μέσα	3500
Βαρέα εναέρια μέσα	10000



Στρατηγικές Αντιμετώπισης με Βάση την Ένταση της Πυρκαγιάς

- **Ένταση < 350 kW/m → Άμεση επίθεση με εργαλεία χειρός** (π.χ. σκαπτικά μέσα, τσεκούρια, πριόνια).
- **350 - 1.700 kW/m → Άμεση επίθεση με οχήματα και νερό**.

- **1.700 - 3.500 kW/m → Αεροπυρόσβεση με ελαφρά εναέρια μέσα** (π.χ. ελικόπτερα μικρής χωρητικότητας).
- **3.500 - 10.000 kW/m → Αεροπυρόσβεση με βαρέα εναέρια μέσα** (π.χ. αεροσκάφη τύπου Canadair, Erickson Aircrane).
- **> 10.000 kW/m → Δεν είναι δυνατή η άμεση επίθεση** – απαιτείται **έμμεση στρατηγική καταστολής** (π.χ. αντιπυρικές ζώνες, αντίπυρ).

Η **κατανόηση αυτών των ορίων** είναι ζωτικής σημασίας για την **επιχειρησιακή λήψη αποφάσεων**, την **αποτελεσματική διαχείριση των διαθέσιμων πόρων** και την **ασφάλεια του προσωπικού** στην καταστολή των δασικών πυρκαγιών.

3.2. Δυσμενείς εξελίξεις της ΑΣΠ για τους ανταποκριτές

3.2.1. Κηλιδώσεις

Η **κηλίδωση** αναφέρεται στο φαινόμενο δημιουργίας **δευτερογενών εστιών πυρκαγιάς**, που προκαλείται από σπινθήρες ή καιόμενα σωματίδια (**καύτρες**) που εκτοξεύονται από το αρχικό μέτωπο της πυρκαγιάς και εξαπλώνονται πέρα από την περίμετρό του. Η πιο κοινή ταξινόμηση των δευτερογενών εστιών λόγω κηλίδωσης βασίζεται στην απόστασή τους από το αρχικό μέτωπο πυρκαγιάς:

- **Κηλίδωση μικρής απόστασης**: Συμβαίνει λίγα μέτρα μακριά από το αρχικό μέτωπο και συνήθως προλαβαίνεται γρήγορα από την κύρια φωτιά. Συμβάλλει κυρίως στην αύξηση του ρυθμού εξάπλωσης της πυρκαγιάς, συχνά αιφνιδιάζοντας όσους ανέμεναν την άφιξη του κύριου μετώπου σε μεταγενέστερο χρόνο.
- **Κηλίδωση μεσαίας απόστασης**: Εμφανίζεται σε αποστάσεις δεκάδων μέτρων και μπορεί να οδηγήσει σε διαλείπουσα προώθηση του αρχικού μετώπου πυρκαγιάς λόγω της αλληλεπίδρασης με τη νέα ανάφλεξη. Εκτός από την αύξηση της εξάπλωσης της πυρκαγιάς, είναι εξαιρετικά επικίνδυνη καθώς μπορεί να παγιδεύσει άτομα μεταξύ δύο μετώπων πυρκαγιάς, ιδίως κατά τη φάση αλληλεπίδρασής τους.
- **Κηλίδωση μεγάλης απόστασης**: Συμβαίνει σε αποστάσεις εκατοντάδων μέτρων και αρχικά αντιμετωπίζεται ως ξεχωριστή εστία πυρκαγιάς. Ωστόσο, ενδέχεται να συγχωνευθεί με το αρχικό μέτωπο, εάν η απόσταση μεταξύ τους μειωθεί και η ένταση της πυρκαγιάς είναι επαρκής για να προκαλέσει την αλληλεπίδρασή τους.
- **Κηλίδωση πολύ μεγάλης απόστασης**: Μπορεί να εμφανιστεί σε αποστάσεις αρκετών χιλιομέτρων. Συνήθως θεωρείται νέο περιστατικό πυρκαγιάς, γεγονός που οδηγεί στη διασπορά των πυροσβεστικών πόρων στην περιοχή. Σε παρατεταμένες και εκτεταμένες δασικές πυρκαγιές, αυτές οι νέες εστίες μπορεί να αλληλεπιδράσουν ή να συγχωνευτούν με το αρχικό μέτωπο.

Μηχανισμός κηλίδωσης

Η δημιουργία δευτερογενών εστιών λόγω κηλίδωσης περιλαμβάνει διάφορες φάσεις:

1. **Απελευθέρωση καυτρών** από την πηγή της φωτιάς.
2. **Ανύψωση των καυτρών** στη θερμική στήλη καπνού.
3. **Μεταφορά των καυτρών** μέσω του ανέμου καθώς απομακρύνονται από τη στήλη.
4. **Προσγείωση των καυτρών** σε εύφλεκτη επιφάνεια, προκαλώντας πιθανή νέα ανάφλεξη.

Αν και η ακριβής τοποθεσία μιας νέας εστίας είναι δύσκολο να προβλεφθεί, η ανάλυση των συνθηκών που επικρατούν σε ένα περιστατικό πυρκαγιάς μπορεί να δώσει ενδείξεις για το πότε, πώς και πού μπορεί να συμβεί.

Για παράδειγμα:

- **Η θέση του μετώπου πυρκαγιάς** μπορεί να δείξει εάν υπάρχει υψηλή πιθανότητα παραγωγής καυτρών, π.χ., όταν η φωτιά φτάνει στην άκρη ενός ώριμου και αφυδατωμένου δάσους.
- **Η ένταση της πυρκαγιάς** επηρεάζει την ανύψωση των καυτρών στη θερμική στήλη και, σε συνδυασμό με ισχυρούς τοπικούς ανέμους, μπορεί να οδηγήσει σε νέες εστίες μεγάλης απόστασης.
- **Ο τύπος της καύσιμης ύλης** καθορίζει την πιθανότητα νέας ανάφλεξης. Για παράδειγμα, ξηρές χορτολιβαδικές ή θαμνώδεις εκτάσεις είναι πιο ευάλωτες σε κηλίδωση, σε σύγκριση με γεωργικές περιοχές.

Ευφλεκτότητα φυτικών ειδών και κηλίδωση

Οι ευκάλυπτοι θεωρούνται από τα είδη με το μεγαλύτερο δυναμικό κηλίδωσης, καθώς η αεροδυναμική συμπεριφορά των φύλλων και του φλοιού τους, σε συνδυασμό με την υψηλή ευφλεκτότητά τους, τους καθιστούν εξαιρετικά ικανούς να προκαλέσουν νέες εστίες πυρκαγιάς, ακόμη και σε μεγάλες αποστάσεις. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι και άλλα πλατύφυλλα είδη έχουν σημαντική ικανότητα δημιουργίας νέων εστιών, ειδικά σε μεσαίες αποστάσεις.

Οι Almeida et al. (2021) ανέφεραν σημαντική παραγωγή καυτρών από καιόμενες κόμες φελλοδρυών και βελανιδιών. Αυτό επιβεβαιώνεται από προηγούμενα περιστατικά δασικών πυρκαγιών, όπως:

Το ατύχημα του Cicouro (Πορτογαλία, 2013), όπου δύο πυροσβέστες έχασαν τη ζωή τους από βροχή καυτρών από φύλλα βελανιδιάς που προκάλεσαν πολλαπλές δευτερογενείς εστίες πυρκαγιάς γύρω τους (Viegas et al., 2013).

Η πυρκαγιά στο Regadas (Πυρκαγιά Pedrógão Grande, Πορτογαλία, 2017), όπου η απώλεια ελέγχου της πυρκαγιάς προκλήθηκε από την ανάφλεξη της κόμης μιας φελλοδρυός, η οποία δημιούργησε μεγάλο αριθμό καυτρών που οδήγησαν σε ανεξέλεγκτη κηλίδωση (Viegas et al., 2017).

Δυσκολίες στην αντιμετώπιση των κηλιδώσεων

Η καταστολή των δευτερογενών εστιών λόγω κηλίδωσης είναι ιδιαίτερα δύσκολη, διότι:

- **Συνήθως δεν εμφανίζονται μεμονωμένα**, αλλά σε ομάδες, με απόσταση δεκάδων μέτρων μεταξύ τους, αυξάνοντας έτσι την αλληλεπίδρασή τους.
- **Οδηγούν στη δημιουργία νέων εστιών πυρκαγιάς**, που σε συνδυασμό με την αρχική πυρκαγιά, μπορούν να δημιουργήσουν μια μεγάλη και ανεξέλεγκτη φωτιά.
- **Μπορούν να καταστήσουν μη βιώσιμες τις στρατηγικές καταστολής**, καθώς ο μεγάλος αριθμός ταυτόχρονων νέων εστιών και η έντασή τους συχνά εμποδίζουν ή καθιστούν αδύνατη την κατάσβεση.

Η κηλίδωση σχετίζεται κυρίως με τη μεταφορά καυτρών από τον άνεμο, οπότε είναι αναμενόμενο να εμφανίζεται στην υπήνεμη πλευρά της πυρκαγιάς. Ωστόσο, μπορεί επίσης να προκύψει από άλλους μηχανισμούς, όπως:

- **Κύλιση καιόμενων κώνων πεύκου** κατά μήκος μιας πλαγιάς.
- **Ένα καιόμενο ζώο** που προσπαθεί να διαφύγει από τις φλόγες και μεταφέρει τη φωτιά δημιουργώντας νέες εστίες.

Ο κίνδυνος από την κηλίδωση δεν περιορίζεται μόνο στην αύξηση του ρυθμού εξάπλωσης της πυρκαγιάς, αλλά και στο γεγονός ότι μπορεί να παγιδεύσει ανθρώπους και ζώα, να ακυρώσει οδούς διαφυγής και να θέσει σε κίνδυνο τις τοποθεσίες καταφυγής ή τα σημεία αγκύρωσης. Για αυτόν τον λόγο, η πρόβλεψη και διαχείριση της κηλίδωσης αποτελεί κρίσιμη πτυχή στη στρατηγική καταστολής δασικών πυρκαγιών.

3.2.2. Επικόρυφες Πυρκαγιές

Οι **επικόρυφες πυρκαγιές** δεν αποτελούν απλώς έναν τύπο δασικής πυρκαγιάς, όπως οι υπόγειες και οι επιφανειακές πυρκαγιές, αλλά συνιστούν και μια εκδήλωση **ακραίας συμπεριφοράς πυρκαγιάς**. Η υψηλή ενέργεια που απελευθερώνεται και η ικανότητά τους να δημιουργούν ισχυρές επαγωγικές στήλες θερμού αέρα, καθώς και να παράγουν καύτρες ικανές να προκαλέσουν **δευτερογενείς εστίες** σε μεγάλες αποστάσεις, καθιστούν αυτό το είδος πυρκαγιάς ένα από τα πιο δύσκολα στην καταστολή.

Οι επικόρυφες πυρκαγιές διακρίνονται σε τρεις τύπους:

1. **Παθητική επικόρυφη πυρκαγιά** – Η ανάφλεξη ενός ή λίγων δέντρων, που προκαλεί στιγμιαία έντονη καύση για σύντομο χρονικό διάστημα.
2. **Ενεργή επικόρυφη πυρκαγιά** – Η πυρκαγιά εξαπλώνεται βιώσιμα μεταξύ των κορυφών των δέντρων, υποστηριζόμενη από μια επιφανειακή πυρκαγιά που καίει τη βλάστηση στον υποόροφο. Η απελευθέρωση ενέργειας είναι συνεχής και μεγαλύτερης έντασης από ό,τι στην παθητική επικόρυφη πυρκαγιά.
3. **Ανεξάρτητη επικόρυφη πυρκαγιά** – Η φωτιά εξαπλώνεται μεταξύ των κορυφών των δέντρων χωρίς να υποστηρίζεται από επιφανειακή πυρκαγιά. Αυτό το σπάνιο φαινόμενο συμβαίνει μόνο σε ακραίες συνθήκες, όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία της κόμης είναι εξαιρετικά χαμηλή και η δομή του δάσους επιτρέπει τη μετάδοση της φλόγας αποκλειστικά μέσω των κορυφών.

Διαδικασία μετάβασης από επιφανειακή σε επικόρυφη πυρκαγιά

Σε αντίθεση με μια επιφανειακή πυρκαγιά, όπου ο αερισμός γίνεται μόνο από τις πλευρές λόγω της εγγύτητας του καυσίμου στο έδαφος, στις επικόρυφες πυρκαγιές η παροχή οξυγόνου συμβαίνει και από κάτω. Η επιφανειακή πυρκαγιά **προθερμαίνει τις κορυφές** των δέντρων, μειώνοντας την περιεκτικότητα υγρασίας τους και καθιστώντας τις πιο ευάλωτες στην ανάφλεξη. Η αυξημένη διαθεσιμότητα τόσο οξυγόνου όσο και καύσιμου οδηγεί σε **πολύ έντονες καύσεις** και υψηλή απελευθέρωση ενέργειας.

Η μετάβαση από επιφανειακή σε επικόρυφη πυρκαγιά ονομάζεται **"επικορύφωση"**. Σύμφωνα με τον Van Wagner (1977), αυτή εξαρτάται από:

- **Την ένταση της επιφανειακής πυρκαγιάς**
- **Την κρίσιμη ένταση ανάφλεξης επικορύφωσης**, η οποία καθορίζεται από το ύψος της βάσης της κόμης και την περιεκτικότητα υγρασίας των φύλλων.

Εάν η **ένταση της επιφανειακής πυρκαγιάς** είναι **μεγαλύτερη** από την κρίσιμη τιμή, τότε είναι πολύ πιθανό να σημειωθεί επικόρυφη πυρκαγιά. Αν είναι **χαμηλότερη**, τότε η φωτιά δεν

θα περάσει στην κόμη, εκτός αν υπάρχουν συνθήκες που διευκολύνουν την κάθετη μετάβαση, όπως:

- **Λεπτά καύσιμα στον κορμό των δέντρων** (π.χ. λειχήνες), τα οποία μπορούν να μεταφέρουν τη φωτιά από το έδαφος προς την κόμη.
- **Συνδυασμός ανέμου και κλίσης**, που αυξάνει την ένταση της επιφανειακής φωτιάς.

Η **οριζόντια μετάβαση της πυρκαγιάς στην κόμη**, δηλαδή η μετάβαση από **παθητική σε ενεργή επικόρυφη πυρκαγιά**, απαιτεί μια **πυκνότητα κόμης** που διασφαλίζει ότι η απόσταση μεταξύ των καυσίμων είναι ευνοϊκή για την εξάπλωση της φωτιάς. Επιπλέον, σε αυτή την περίπτωση, ορίζεται μια **παράμετρος κατωφλίου**, γνωστή ως **"κρίσιμος ρυθμός εξάπλωσης μετά την επικόρυφη πυρκαγιά"**, ο οποίος είναι **αντιστρόφως ανάλογος** της πυκνότητας της κόμης (Van Wagner, 1977).

Εάν ο **ρυθμός εξάπλωσης της επιφανειακής πυρκαγιάς** είναι **υψηλότερος** από τον κρίσιμο ρυθμό εξάπλωσης, τότε η φωτιά μπορεί να μεταβεί σε **ενεργή επικόρυφη πυρκαγιά**. Αντιθέτως, αν είναι **χαμηλότερος**, η πυρκαγιά ενδέχεται να παραμείνει **παθητική**. Σύμφωνα με τον Rothermel (1972), ο **ρυθμός εξάπλωσης της επικόρυφης πυρκαγιάς** είναι **3,34 φορές μεγαλύτερος** από αυτόν που προβλέπεται για το **Μοντέλο Καυσίμων Επιφάνειας 10** (ξύλινα υπολείμματα, φυλλάδα και υποόροφος – Anderson, 1982), χρησιμοποιώντας **συντελεστή μείωσης ανέμου 0,4**, ανεξάρτητα από τα πραγματικά επιφανειακά καύσιμα ή τον συντελεστή μείωσης ανέμου.

Συνοψίζοντας, για να εκδηλωθεί μια **επικόρυφη πυρκαγιά**, πρέπει να πληρούνται οι εξής προϋποθέσεις:

- **Υψηλό φορτίο επιφανειακών καυσίμων**, το οποίο αυξάνει την ένταση της επιφανειακής πυρκαγιάς.
- **Μικρή απόσταση** μεταξύ των φλογών της επιφανειακής πυρκαγιάς και της βάσης της κόμης, ώστε να διευκολυνθεί η **κάθετη μετάβαση** της φωτιάς.
- **Επαρκής πυκνότητα κόμης**, που επιτρέπει στη φωτιά να εξαπλωθεί από δέντρο σε δέντρο, διατηρώντας τη δυναμική της ως ενεργή επικόρυφη πυρκαγιά.

Αυτοί οι παράγοντες **υπογραμμίζουν τη σημασία της διαχείρισης του υποορόφου, του κλαδέματος και της αραίωσης των δέντρων** ως προληπτικά μέτρα για **τη μείωση της πιθανότητας επικόρυφης πυρκαγιάς** και τη **διασφάλιση ασφαλέστερης καταστολής** εντός των δασών. Πρόκειται για κρίσιμες παραμέτρους που πρέπει να αξιολογούνται **πριν από την έναρξη επιχειρήσεων καταστολής πυρκαγιάς**.

Η **ένταση του ανέμου** και η **κλίση του εδάφους** αποτελούν επίσης σημαντικούς παράγοντες, καθώς μπορούν να **ενισχύσουν τον ρυθμό εξάπλωσης της επιφανειακής φωτιάς**, διευκολύνοντας την **κάθετη μετάβαση** στις κορυφές των δέντρων.

Η **σύνθεση της βλάστησης** είναι εξίσου καθοριστική, καθώς η **ευφλεκτότητα** κάθε είδους δέντρου επηρεάζει τόσο την **κάθετη όσο και την οριζόντια εξάπλωση** της φωτιάς.

- **Πλατύφυλλα δέντρα**, όπως η **βελανιδιά** και η **καστανιά**, έχουν **μικρότερη πιθανότητα** να υποστηρίξουν επικόρυφη πυρκαγιά.
- **Κωνοφόρα**, όπως τα **πεύκα** και οι **ευκάλυπτοι**, είναι **πιο ευάλωτα**, λόγω της υψηλής ευφλεκτότητας των φύλλων και της δομής τους, που διευκολύνει την εξάπλωση της φωτιάς.

Η **σωστή διαχείριση των δασών**, μέσω **αραίωσης, απομάκρυνσης νεκρών καυσίμων και κλαδέματος**, αποτελεί **κρίσιμο μέτρο πρόληψης** που μπορεί να **περιορίσει τον κίνδυνο επικόρυφης πυρκαγιάς** και να **βελτιώσει την αποτελεσματικότητα της πυρόσβεσης**.

3.2.3. Εκρηκτικές πυρκαγιές

Οι **εκρηκτικές πυρκαγιές** χαρακτηρίζονται από **πολύ υψηλή επιτάχυνση** στην εξάπλωση της φωτιάς, η οποία μπορεί να **παρομοιαστεί με έκρηξη**. Η καταστροφική τους δύναμη είναι **εξαιρετικά υψηλή** και μπορεί να **αιφνιδιάσει** τους ανθρώπους που βρίσκονται στην περιοχή. **Τα περισσότερα ατυχήματα** σε δασικές πυρκαγιές σχετίζονται με αυτόν τον τύπο **ακραίας συμπεριφοράς πυρκαγιάς (EFB)**.

Αν και οι **εκρηκτικές πυρκαγιές** συνδέονται συχνά με **φαράγγια** και **απότομες πλαγιές**, οι φυσικές διεργασίες που τις προκαλούν **μπορούν να συμβούν και σε πιο συνηθισμένα τοπογραφικά περιβάλλοντα**. Στη βιβλιογραφία, συχνά αναφέρονται ως **"blow-up" πυρκαγιές** ή **εκρηκτικές πυρκαγιές**, παρόλο που δεν συνδέονται με πραγματική **έκρηξη**, καθώς η **αύξηση του ρυθμού εξάπλωσης (ROS)** είναι μια **συνεχής διαδικασία**.

Αυτός ο τύπος **ακραίας συμπεριφοράς πυρκαγιάς** μελετήθηκε **συστηματικά για πρώτη φορά** από τους **Viegas και Pita (2002)**, οι οποίοι διαπίστωσαν ότι αυτή η **συμπεριφορά πυρκαγιάς** συνδέεται με τη **ροή αέρα που προκαλείται από τη φωτιά**, η οποία ενισχύεται από το **κοίλο σχήμα του εδάφους** σε περιοχές όπως τα φαράγγια.

Για τη συστηματική ανάλυση αυτού του τύπου φωτιάς, **οι ερευνητές χρησιμοποίησαν ένα εργαστηριακό μοντέλο φαραγγιού**, αποτελούμενο από **δύο κεκλιμένες επίπεδες επιφάνειες**. Η **γεωμετρία του φαραγγιού** καθοριζόταν από:

- **Τις γωνίες κλίσης των δύο πλαγιών**.
- **Τη συνολική γωνία του πυθμένα του φαραγγιού**.

Μεγαλύτερες τιμές αυτών των γωνιών αντιστοιχούσαν σε **ταχύτερη επιτάχυνση** της πυρκαγιάς.

Η **ραγδαία αύξηση του ROS** οφείλεται στη **δυναμική της ίδιας της φωτιάς** και συμβαίνει **ανεξάρτητα** από:

- Τον **περιβαλλοντικό άνεμο**.
- Τις **συγκεκριμένες συνθήκες της καύσιμης ύλης**.

Ο **χρόνος που απαιτείται** για να φτάσει η φωτιά σε **εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες εξάπλωσης** εξαρτάται από τη **συμπάγεια της καύσιμης ύλης**:

- Για **ελαφρά και χαλαρά καύσιμα** (π.χ. **ποώδη βλάστηση**), η επιτάχυνση συμβαίνει **πολύ γρήγορα**.
- Για **βαρύτερα καύσιμα** (π.χ. **θάμνους** ή **υπολείμματα υλοτομίας**), η διαδικασία είναι **πιο αργή**.

Στις πιο **συνηθισμένες περιπτώσεις**, όπου η φωτιά εξαπλώνεται σε **θαμνώδη βλάστηση**, ο **χρόνος που απαιτείται για την πλήρη επιτάχυνση** είναι της τάξης των **είκοσι λεπτών**. Αυτή η **χρονική κλίμακα** έχει επιβεβαιωθεί τόσο σε **πραγματικές πυρκαγιές με ατυχήματα** όσο και σε **πειραματικά σενάρια φωτιάς**.

3.2.4. Πυρκαγιές σύζευξης (Junction fires)

Σε μια δασική πυρκαγιά, είναι πιθανό δύο ή περισσότερα μέτωπα φωτιάς που εξαπλώνονται στην ίδια περιοχή να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, οδηγώντας σε μια **ενισχυμένη πυρκαγιά** με **ταχύτερο ρυθμό εξάπλωσης (ROS)**. Αυτό το φαινόμενο **παρατηρείται συχνά** σε επιχειρήσεις πυρόσβεσης και ελεγχόμενης καύσης. Η **αλληλεπίδραση των μετώπων πυρκαγιάς** επηρεάζεται από τα **ρεύματα επαγωγής** που παράγουν και μπορεί να οδηγήσει σε

ακραία συμπεριφορά πυρκαγιάς (ΑΣΠ), καθιστώντας τη γνώση αυτού του μηχανισμού ζωτικής σημασίας για τη διαχείριση της πυρκαγιάς.

Βασικοί Μηχανισμοί Αλληλεπίδρασης Μετώπων Πυρκαγιάς

Η **απλούστερη μορφή σύζευξης** προκύπτει όταν **δύο πανομοιότυπα ή παράλληλα μέτωπα πυρκαγιάς** εξαπλώνονται **σε επίπεδο και οριζόντιο έδαφος, χωρίς την παρουσία ανέμου**. Σε αυτήν την περίπτωση, τα δύο μέτωπα κινούνται με **την ίδια ταχύτητα** και, όταν βρίσκονται μακριά μεταξύ τους, ο ρυθμός εξάπλωσής τους ισούται με τον **βασικό ROS**.

Ωστόσο, καθώς τα μέτωπα **πλησιάζουν**, η ταχύτητα εξάπλωσης **αυξάνεται σταδιακά** λόγω της **ενίσχυσης του ρεύματος επαγωγής** που δημιουργείται από τη φωτιά. Όταν τα μέτωπα **συναντηθούν**, η **ένταση της εξάπλωσης αυξάνεται απότομα**, φτάνοντας **σε εξαιρετικά υψηλές τιμές**.

Η **αιφνίδια αύξηση της έντασης** μπορεί να οδηγήσει στη **ραγδαία εξάπλωση της πυρκαγιάς**. Για το λόγο αυτό, κατά τον **σχεδιασμό των επιχειρήσεων πυρόσβεσης**, είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι η **σύζευξη των μετώπων** συμβαίνει **αρκετά μακριά από την περίμετρο της καμένης περιοχής**, ώστε να αποφευχθούν **πιθανές δευτερογενείς εστίες λόγω κηλίδωσης**.

Παράγοντες που Επηρεάζουν τη Σύζευξη

- **Παρουσία ανέμου ή κλίσης**

  Όταν υπάρχει **άνεμος ή κλίση εδάφους**, το μέτωπο που **κινείται αντίθετα στον άνεμο** ή **κατηφορικά** θα εξαπλώνεται αρχικά **πιο αργά**. Ωστόσο, μόλις φτάσει στο άλλο μέτωπο, η **συμπεριφορά της φωτιάς αλλάζει** και παρατηρείται **αιφνίδια αύξηση της έντασης**.

- **Σύγκλιση δύο μετώπων πυρκαγιάς ή νέων εστιών**

  Εάν δύο **διαφορετικές εστίες** σχηματιστούν **κοντά η μία στην άλλη**, η ανάπτυξή τους **επηρεάζεται αμοιβαία** μέχρι να **συγχωνευτούν** σε μία πυρκαγιά.

  - **Εάν βρίσκονται κοντά στο κύριο μέτωπο**, τείνουν να **ελκύονται προς αυτό**.
  - **Υπό ισχυρούς ανέμους ή σε μεγάλες αποστάσεις**, οι δευτερογενείς εστίες **μπορούν να αναπτυχθούν ανεξάρτητα**, συμβάλλοντας στην **επιτάχυνση της εξάπλωσης**.

Πυρκαγιά Σύζευξης και Μηχανισμός "V"

Μια **ειδική περίπτωση σύζευξης** εμφανίζεται όταν **δύο μέτωπα πυρκαγιάς σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία**, δημιουργώντας ένα **"σχήμα V"**.

Σε αυτή την περίπτωση:

Η καύσιμη ύλη μεταξύ των δύο μετώπων καταναλώνεται σταδιακά ενώ η **διάδοση της πυρκαγιάς δεν συμβαίνει** με την **προώθηση των δύο μετώπων** προς το άλλο, αλλά με τη **γρήγορη επέκταση της κορυφής "V" της σύζευξης**.

Οι **Viegas et al. (2012)** μελέτησαν τη σύζευξη και συγχώνευση **δύο λοξών, συμμετρικών μετώπων πυρκαγιάς** που **τέμνονταν σε ένα σημείο**, σχηματίζοντας **γραμμή πυρός σε σχήμα**

"V". Αρχικά, οι ερευνητές χαρακτήρισαν το φαινόμενο αυτό ως **"πυρκαγιά άλματος"**, λόγω της **ξαφνικής αύξησης του ROS** στην κορυφή της πυρκαγιάς. Ωστόσο, μετά από περαιτέρω μελέτες, ο όρος αντικαταστάθηκε από **"πυρκαγιά σύζευξης"**.

Τα τελευταία χρόνια, αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει αυτό το φαινόμενο, το οποίο έχει **επιβεβαιωθεί σε πολλαπλές εργασίες** (Viegas et al., 2013· Sharples et al., 2013· Raposo et al., 2015· Hilton et al., 2016· Thomas et al., 2017· Sullivan and Gould, 2019· Filkov et al., 2020· Ribeiro et al., 2023). Τα αποτελέσματα αυτών των μελετών έδειξαν ότι:

- Τα **μέτωπα φωτιάς** και ο **ρυθμός εξάπλωσης** αυξήθηκαν **ξαφνικά**.
- Σε ακραίες περιπτώσεις, το ROS αυξήθηκε **έως και 100 φορές** από την αρχική τιμή του.

Πρόσφατα, οι **Ribeiro et al. (2023)** ανέλυσαν την **επίδραση της κλίσης** στη **σύζευξη πυρκαγιάς** σε συνθήκες με **ασύμμετρα μέτωπα πυρκαγιάς**.

Η **σύζευξη πυρκαγιών** μπορεί να οδηγήσει σε **αιφνίδια και ανεξέλεγκτη αύξηση της έντασης και του ROS**, καθιστώντας την ιδιαίτερα επικίνδυνη για:

- **Πυροσβεστικές επιχειρήσεις**.
- **Επιχειρήσεις ελεγχόμενης καύσης**.
- **Διαχείριση κρίσεων και σχεδιασμό αντιπυρικών ζωνών**.

Αυτό το φαινόμενο είναι ένας από τους κύριους **μηχανισμούς ακραίας συμπεριφοράς πυρκαγιάς** και **μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στην ταχεία επέκταση μεγάλων δασικών πυρκαγιών**.

3.2.5. Μεγάλες Πυρκαγιές (Conflagrations)

Οι **μεγάλες πυρκαγιές** χαρακτηρίζονται από την **εκτεταμένη εξάπλωσή τους** υπό την επίδραση **ισχυρών μετεωρολογικών συνθηκών**, ιδιαίτερα **ισχυρών ανέμων**, που **διαρκούν για μεγάλο χρονικό διάστημα**—από **αρκετές ώρες έως ημέρες**—και επηρεάζουν **μεγάλες γεωγραφικές περιοχές**.

Κατά τη διάρκεια αυτών των πυρκαγιών, **ο ρυθμός εξάπλωσης (ROS) παραμένει σε υψηλές τιμές** και παρατηρούνται **διάφορες εκδηλώσεις ακραίας συμπεριφοράς πυρκαγιάς (EFB)**, όπως:

- **Επικόρυφες πυρκαγιές**,
- **Κηλιδώσεις (spotting) και εκτεταμένες δευτερογενείς εστίες**,
- **Συγχωνεύσεις/συζεύξεις πυρκαγιών**,
- **Σχηματισμός ισχυρών συναγωγικών στηλών καπνού**,
- **Εξάπλωση της πυρκαγιάς ακόμη και σε επίπεδα εδάφη**.

Χαρακτηριστικό Παράδειγμα: Οι Πυρκαγιές της 15ης Οκτωβρίου 2017 στην Πορτογαλία

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα **μεγάλης πυρκαγιάς** είναι οι **καταστροφικές πυρκαγιές που σημειώθηκαν στην Πορτογαλία στις 15 Οκτωβρίου 2017**.

📌 Εκείνη την ημέρα:

- **Περισσότερες από 400 πυρκαγιές** εκδηλώθηκαν ταυτόχρονα.
- **Εννέα από αυτές** εξελίχθηκαν σε **μεγάλες πυρκαγιές**, καίγοντας συνολικά **πάνω από 200.000 εκτάρια**.

- Οι πυρκαγιές προκάλεσαν **τον θάνατο 52 ατόμων**, καθιστώντας το ένα από τα **χειρότερα καταγεγραμμένα πυρκαγικά γεγονότα** στη σύγχρονη ιστορία της χώρας.

Οι **μεγάλες πυρκαγιές** αντιπροσωπεύουν **σημαντική πρόκληση για την πυρόσβεση**, καθώς η **αλληλεπίδραση του ανέμου, της καύσιμης ύλης και της ατμόσφαιρας** δημιουργεί **δυναμικές και απρόβλεπτες συνθήκες**, καθιστώντας την **καταστολή εξαιρετικά δύσκολη** και συχνά **μη εφικτή** με τα συμβατικά μέσα.

3.2.6. Πυροστρόλιβοι (Fire Whirls)

Μία ακόμη εκδήλωση **Ακραίας Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς (ΑΣΠ)** είναι οι **πύρινες δίνες**, ή πιο σωστά, **πυροστρόβιλοι**. Πρόκειται για δομές **κατακόρυφης έκτασης** που μπορεί να φτάσουν από **δεκάδες έως εκατοντάδες μέτρα ύψος**, χαρακτηριζόμενες από **έντονη περιστροφική κίνηση**, η οποία μπορεί να μεταφέρει **στήλες φλογών** στον πυρήνα τους.

Οι **πυροστρόβιλοι** δημιουργούνται από **ανοδικά ρεύματα** που προέρχονται είτε από την πυρκαγιά είτε από **θερμαινόμενες περιοχές του εδάφους**. Συνήθως συνοδεύονται από μια **περιστροφική κίνηση** που οφείλεται σε **ασυμμετρίες της ροής του ανέμου** ή στη **μορφολογία του εδάφους**. Αυτή η κίνηση λαμβάνει χώρα γύρω από **κατακόρυφο άξονα**, παρόμοια με τους κυκλώνες, αλλά σε **μικρότερη κλίμακα**.

Στον πυρήνα ενός **πυροστρόβιλου**, κοντά στον άξονα περιστροφής, ο αέρας κινείται κυκλικά με **τη μέγιστη ταχύτητα ανέμου** να παρατηρείται στα άκρα του πυρήνα. Εκεί, η **πίεση είναι χαμηλότερη**, δημιουργώντας έντονη **αναρρόφηση**, η οποία εξηγεί το γιατί οι **πυροστρόβιλοι** συχνά παράγουν **ψηλές στήλες φλόγας**.

Κίνηση και Συμπεριφορά των Πυροστρόβιλων

Ένας **πυροστρόβιλος** μπορεί είτε να **παραμείνει σταθερός** σε συγκεκριμένο σημείο είτε να **μετακινηθεί**, μεταφέροντας μαζί του τη φωτιά. Η κίνησή του είναι **εξαιρετικά δύσκολο να προβλεφθεί**, καθώς μπορεί να αλλάζει **ταχύτητα και κατεύθυνση** φαινομενικά **χωρίς προφανή αιτία**.

Η **καταστολή ενός πυροστρόβιλου** είναι **εξαιρετικά δύσκολη**, γεγονός που τον εντάσσει στις **πιο επικίνδυνες** εκδηλώσεις της **Ακραίας Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς**. Όταν **μετακινούνται εκτός της περιμέτρου της πυρκαγιάς**, μπορούν να **προκαλέσουν νέες εστίες φωτιάς**, επιταχύνοντας τη διάδοση της πυρκαγιάς.

Λόγω της **απρόβλεπτης κίνησης** ενός πυροστρόβιλου, υπάρχει κίνδυνος να **παγιδευτούν πυροσβέστες και προσωπικό πυρόσβεσης** σε μια **πολύ επικίνδυνη κατάσταση**, καθώς μπορεί να βρεθούν μεταξύ του **ανεμοστρόβιλου** και του **κύριου μετώπου της φωτιάς**.

Σχηματισμός και Καταστροφική Ισχύς

Οι **μεγάλες δασικές πυρκαγιές** μπορούν να οδηγήσουν σε **πολλαπλούς πυροστρόβιλους**, λόγω των **ισχυρών συναγωγικών ρευμάτων** που δημιουργούνται. Η παρουσία **ατμοσφαιρικής αστάθειας** ενισχύει αυτόν τον σχηματισμό.

Οι **πυροστρόβιλοι** μπορούν να αναπτύξουν **πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου**, που κυμαίνονται από **100 έως 200 km/h**, αποκτώντας **τεράστια καταστροφική δύναμη**. Αυτή η ισχύς μπορεί να προκαλέσει **πτώσεις δέντρων**, **κατάρρευση κατασκευών** και **εκτεταμένες καταστροφές**, επιδεινώνοντας την ένταση της πυρκαγιάς (Viegas et al., 2017).

Σε **καμένες περιοχές**, μπορεί επίσης να παρατηρηθούν **ανεμοστρόβιλοι στάχτης**, οι οποίοι προκύπτουν όταν το **μαυρισμένο έδαφος απορροφά ηλιακή θερμότητα, δημιουργώντας ανοδικά ρεύματα αέρα**, που προκαλού **μικρούς κυκλώνες στάχτης**.

3.2.7. Συμβάντα έκρηξης πυρκαγιάς (Blow-up fire)

Τα **Συμβάντα έκρηξης (bow-up)** είναι σπάνιες αλλά εξαιρετικά επικίνδυνες καταστάσεις, όπου η δυναμική της πυρκαγιάς αλλάζει ριζικά λόγω συνδυασμένων επιδράσεων από τη βλάστηση, το έδαφος και την ατμόσφαιρα. Η κατανόηση των **παραγόντων που οδηγούν σε ξέσπασμα της πυρκαγιάς** και η χρήση προγνωστικών εργαλείων μπορούν να βελτιώσουν τη διαχείριση των πυρκαγιών και την ασφάλεια των επιχειρήσεων καταστολής.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αλληλεπίδραση της πυρκαγιάς με το έδαφος και την ατμόσφαιρα μπορεί να οδηγήσει στην εκδήλωση ενός **Συμβάντος Εκρηξης**.

Όπως έχει ήδη περιγραφεί, μια **τυπική πυρκαγιά** εξαπλώνεται μέσω γραμμών πυρός και δευτερογενών εστιών (κηλιδώσεων). Για την εκτίμηση της εξέλιξής της, απαιτείται γνώση του εδάφους, της καύσιμης ύλης και των καιρικών συνθηκών. Ωστόσο, η δυναμική συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς που εξελίσσεται σε **blow-up** προϋποθέτει προϋπάρχουσα ανεξέλεγκτη πυρκαγιά και συγκεκριμένες τοπογραφικές και ατμοσφαιρικές συνθήκες, οι οποίες επιτρέπουν τη δημιουργία **βρόχων ανατροφοδότησης**. Αξιοσημείωτο είναι ότι το φορτίο καυσίμου δεν φαίνεται να διαδραματίζει αποφασιστικό ρόλο στην έναρξη ενός blow-up.

Απαραίτητες συνθήκες για την εκδήλωση ενός Blow-up

Προϋπάρχουσα πυρκαγιά που εξελίσσεται στο κατάλληλο είδος καυσίμου

Οι ιδιαίτερα εύφλεκτες καύσιμες ύλες, όπως οι περισσότερες χορτολιβαδικές εκτάσεις, καίγονται πολύ γρήγορα και δεν δημιουργούν εύκολα συνθήκες για το ξέσπασμα της πυρκαγιάς (blow-up). Τα **δάση και οι θαμνώδεις εκτάσεις** αποτελούν τους κυριότερους τύπους καύσιμης ύλης που εμπλέκονται σε αυτά τα συμβάντα.

Παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν ραγδαία εξέλιξη της πυρκαγιάς

- **Ισχυροί άνεμοι**, που επιτρέπουν στην κεφαλή της πυρκαγιάς να διανύσει μεγάλη απόσταση κατά τη διάρκεια του χρόνου εξάντλησης των καυσίμων.
- **Απότομη αλλαγή ανέμου**, η οποία μπορεί να μετατρέψει μια πλευρική φωτιά σε νέα, μεγαλύτερη κεφαλή πυρκαγιάς.
- **Εκρηκτική εξάπλωση** της πυρκαγιάς λόγω έντονης αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον.
- **Πλευρική εξάπλωση λόγω στροβιλισμού**, ένας από τους σημαντικότερους μηχανισμούς πρόκλησης καταστροφών από πυρκαγιές.
- **Ακατάλληλη χρήση πυρσού στάγδην**, που μπορεί να δημιουργήσει ανεξέλεγκτες πυρκαγιές.
- **Πυκνές δευτερογενείς εστίες (κηλιδώσεις)**, που αυξάνουν ραγδαία το συνολικό μέτωπο της πυρκαγιάς.
- **Εσωτερικές αναφλέξεις**, όπου αρχικά άκαυτα νησίδες βλάστησης καθίστανται αργότερα εύφλεκτες, ενισχύοντας τη συνολική θερμική ισχύ της πυρκαγιάς.

Ορισμένοι από αυτούς τους παράγοντες, όπως η **πλευρική εξάπλωση**, απαιτούν η πυρκαγιά να βρίσκεται σε συγκεκριμένες τοπογραφικές συνθήκες τη στιγμή που αυξάνεται η ένταση των ανέμων ή μειώνεται η υγρασία της καύσιμης ύλης.

Ατμοσφαιρικές συνθήκες που ευνοούν την εκδήλωση βίαιης πυρο-συναγωγής

Για την κατανόηση των blow-ups, είναι ζωτικής σημασίας να **παρακολουθούνται οι ατμοσφαιρικές συνθήκες** πάνω από την περιοχή της πυρκαγιάς. Αυτή η παρακολούθηση μπορεί να περιλαμβάνει:

- **Οπτική παρατήρηση των νεφών**
- **Ανάλυση μετεωρολογικών μπαλονιών**
- **Χρήση αερομεταφερόμενων μετεωρολογικών μέσων**

Ο ρόλος της επαγωγής

Η παρουσία **αναστροφών θερμοκρασίας**, που προκύπτουν από καθιζήσεις αέριων μαζών, μπορεί να περιορίσει τη διαδικασία επαγωγής και να εμποδίσει την ανάπτυξη ενός blow-up. Αν η **διαφορά θερμοκρασίας** μεταξύ του επαγωγικού καλύμματος και του υποκείμενου θερμού αέρα είναι **κάτω από 4°C**, μπορεί να σχηματιστεί **πυροσωρειτικό νέφος (Pyrocumulus)**. Αν η διαφορά θερμοκρασίας είναι **πάνω από 8°C**, μπορεί να συμβεί **πυρκαγιά καθοδηγούμενη από καταβατικό άνεμο**. Τα συμβάντα έκρηξης (blow-ups) τείνουν να μην εκδηλώνονται σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες κάλυμματος.

Επιπτώσεις του ημερήσιου κύκλου της ατμόσφαιρας

Ο ημερήσιος κύκλος των θερμοκρασιών μπορεί να μην είναι ο κυρίαρχος ρυθμιστικός παράγοντας για ένα συμβάν έκρηξης. **Περίπου το 30% τέτοιων συμβάντων παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της νύχτας**, γεγονός που υποδηλώνει ότι ο ξηρός αέρας από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας μπορεί να παίζει καθοριστικό ρόλο. Οι ορεινές περιοχές με **τραχύ ανάγλυφο** μπορούν να διευκολύνουν την ανάμειξη ξηρού αέρα, συμβάλλοντας στη δημιουργία συνθηκών που οδηγούν σε ΣΕΠ.

Προγνωστικά εργαλεία για τα συμβάντα έκρηξης

Υπάρχουν **εργαλεία πρόβλεψης για blow-ups** βασισμένα σε μελέτες πολλών πραγματικών συμβάντων, τα οποία επιτρέπουν την ανάλυση των συνθηκών και των πιθανοτήτων εκδήλωσης εκρηκτικής συμπεριφοράς πυρκαγιάς. Δείτε στις παρακάτω πηγές:

---

http://www.highfirerisk.com.au/hpf/bufo_2.xlsx

ή:

http://www.highfirerisk.com.au/hpf/bufo.pptx

[Πιθανές συνέπειες ενός Συμβάντος Έκρηξης (blow-up)

Ένα Συμβάν Έκρηξης (blow-up) μπορεί να οδηγήσει σε **κλιμάκωση της πυρκαγιάς για δύο έως τρεις ώρες**, επηρεάζοντας έναν ή περισσότερους τομείς. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος, η πυρκαγιά πρέπει να θεωρείται **μη ελεγχόμενη** – και, σε ορισμένες περιπτώσεις, ακατάλληλη για επιβίωση. Συνήθως, ένα τέτοιο συμβλαν μπορεί να **καταστρέψει 7.000 εκτάρια, καλύπτοντας απόσταση 16 χιλιομέτρων με πλάτος 7 χιλιομέτρων**, αν και

υπάρχουν περιπτώσεις ακόμη μεγαλύτερων εκρήξεων. Αυτές οι πυρκαγιές **δεν μπορούν να κατασταλούν** κατά τη διάρκεια της μέγιστης έντασης τους. Ωστόσο, συχνά η **ένταση της πυρκαγιάς καταρρέει** μετά από την αρχική έκρηξη, επιτρέποντας την έναρξη επιχειρήσεων καταστολής **όταν οι συνθήκες γίνουν ασφαλέστερες**. Αυτή η φάση μπορεί να περιλαμβάνει την απομάκρυνση **επικίνδυνων δέντρων, πεσμένων κορμών ή γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος**.

Ασφαλής διαχείριση ενός Συμβάντος Έκρηξης

Το βέλτιστο μέτρο προστασίας είναι η απομάκρυνση από την περιοχή πριν από την εκδήλωση του ΣΕ, εφόσον είναι δυνατή η έγκαιρη πρόβλεψή του. Η παραμονή κοντά σε μια τέτοια εκρηκτική πυρκαγιά ενέχει **εξαιρετικά υψηλό κίνδυνο**. Σε **μικρές πυρκαγιές**, ένα ΣΕ μπορεί να περιλαμβάνει **ολόκληρο το πεδίο της πυρκαγιάς**. Σε **μεγαλύτερες πυρκαγιές**, το φαινόμενο μπορεί να περιοριστεί σε **έναν ή περισσότερους τομείς**. Στα **συμπλέγματα πυρκαγιών**, οι εκρήξεις μπορεί να εκδηλώνονται **σε επιμέρους τομείς**, απαιτώντας συντονισμένη διαχείριση.

Συμπερασματικά, τα Συμβάντα Έκρηξης είναι **από τις πλέον επικίνδυνες φάσεις μιας δασικής πυρκαγιάς**, καθώς επιδεινώνουν ραγδαία την εξάπλωση και την ένταση της φωτιάς. **Ο έγκαιρος εντοπισμός των συνθηκών που μπορούν να οδηγήσουν σε ένα ΣΕ είναι ζωτικής σημασίας** για τη διαχείριση των επιχειρήσεων καταστολής και την προστασία του προσωπικού και των πολιτών.

[Ζητήματα Ασφαλείας κατά τη Διαχείριση ενός Συμβάντος Έκρηξης (ΣΕ)]

Κατά τη διάρκεια και την έκταση ενός Συμβάντος Έκρηξης (ΣΕ), το **Σχέδιο Δράσης Περιστατικού (ΣΔΠ)** για τους επηρεαζόμενους τομείς/τμήματα θα πρέπει να έχει έναν και μοναδικό στόχο: **τη διάσωση ανθρώπινων ζωών**.

Βασικά θέματα που αφορούν την ασφάλεια

Στη συνέχεια συνοψίζονται τα ζητήματα που εμπλέκονται κατά τη διαχείριση ενός συμβάντος έκρηξης πυρκαγιάς τα οποία είναι:

- **Απουσία σαφούς μετώπου πυρκαγιάς**, γεγονός που απαιτεί νέες στρατηγικές για την παρακολούθηση της κατάστασης.
- **Μαζική κηλίδωση** (δευτερογενείς εστίες από καύτρες), που οδηγεί σε **ταχεία αύξηση της έντασης** στις ζώνες συγχώνευσης και δυσκολία εκτίμησης της εξέλιξης της φωτιάς.
- **Καύση σε συνθήκες χαμηλού οξυγόνου**, προκαλώντας **απρόβλεπτα φαινόμενα πυρκαγιάς**.
- **Ανεξέλεγκτη επιτάχυνση της πυρκαγιάς**, ιδιαίτερα σε φαράγγια και περιοχές με απότομες κλίσεις, αυξάνοντας τον κίνδυνο **εγκλωβισμού**.
- **Κίνδυνος χρήσης πυρσών στάγδην** – η ακατάλληλη χρήση μπορεί να προκαλέσει ή να επιδεινώσει ένα ΣΕ.
- **Ραγδαία απώλεια ασφαλών οδών διαφυγής**, δημιουργώντας **θανατηφόρες παγίδες**.
- **Καταβατικοί άνεμοι** – με την πάροδο του χρόνου, οι άνεμοι αλλάζουν από **στρωτή ροή σε τυρβώδη**, οδηγώντας σε **απότομες μεταβολές στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς**.

- Οι τομείς που **δεν επηρεάζονται αρχικά από το ΣΕ** θα πρέπει να επαναξιολογούνται διαρκώς για την ασφάλεια του προσωπικού.

Παρά την ευρέως διαδεδομένη αντίληψη, ο κύριος κίνδυνος δεν πηγάζει από καταβατικά ρεύματα - καθώς τα πυροσωρειτικά νέφη τυπικά αναπτύσσονται κατάντη της θέσης της πυρκαγιάς. Αντίθετα, η αυξημένη επικινδυνότητα συνδέεται με τη **δυναμική του στρώματος επαγωγής**, ιδίως όταν η τοπογραφία οδηγεί το μέτωπο της πυρκαγιάς σε εγγύτητα με αυτό.

Διαχείριση ενός Συμβάντος Έκρηξης

Για την αποτελεσματική διαχείριση ενός ΣΕ, είναι κρίσιμο να τηρηθούν οι παρακάτω οδηγίες:

- **Πρόληψη και Σχεδιασμός**

  - **Αποτρέψτε την είσοδο της πυρκαγιάς σε ευαίσθητες περιοχές** σε κρίσιμες στιγμές.
  - **Προβλέψτε πότε η πυρκαγιά θα εισέλθει σε εδάφη επιρρεπή σε εκρηκτική εξάπλωση** (π.χ. φαράγγια ή περιοχές με υψηλή καύσιμη ύλη).
  - **Παρακολουθήστε κρίσιμους μετεωρολογικούς παράγοντες**, όπως απότομες ενισχύσεις ανέμων ή πτώση της υγρασίας καυσίμου κάτω από 5%. *(Οι ομάδες σχεδιασμού πρέπει να διαθέτουν εξειδικευμένη κατάρτιση για αυτές τις εκτιμήσεις.)*
  - **Εξετάστε το ενδεχόμενο ελεγχόμενης καύσης** σε τέτοιες περιοχές πριν από την έναρξη της επικίνδυνης φάσης.

- **Διαχείριση Πυροσβεστικών Επιχειρήσεων**

Να δίνεται βαρύτητα στα παρακάτω:

  - **Αποφύγετε τη χρήση πυρσών στάγδην σε κρίσιμες στιγμές.** *(Ορισμένες στρατηγικές ανάφλεξης μπορεί να προκαλέσουν ή να επιταχύνουν ένα ΣΕ.)*
  - **Εκκενώστε εγκαίρως** αν αναμένεται ΣΕ. *(Όταν ξεκινήσει, οι πυροσβεστικές δυνάμεις μπορεί να διατρέχουν τον ίδιο κίνδυνο με το κοινό.)*

- **Ρόλοι στην Ομάδα Διαχείρισης Περιστατικού (ΟΔΠ)**

Η διατήρηση της ασφάλειας των πυροσβεστικών πληρωμάτων είναι **ευθύνη πολλών κρίσιμων ρόλων** μέσα στην ΟΔΠ όπως αναφέρονται στη συνέχεια:

- **Υπεύθυνος Ασφαλείας** – Διασφαλίζει ότι όλοι γνωρίζουν το πρωτόκολλο ασφαλείας.
- **Αναλυτής Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς / Τεχνικός Ειδικός** – Παρέχει εξειδικευμένες προβλέψεις για την εξέλιξη της πυρκαγιάς.
- **Υπεύθυνος Κατάστασης / Σχεδιασμού** – Εξασφαλίζει ότι οι πληροφορίες που διατίθενται είναι σαφείς και ακριβείς.
- **Υπεύθυνος Επιχειρήσεων / Διοικητής Περιστατικού** – Υλοποιεί το ΣΔΠ και λαμβάνει επιχειρησιακές αποφάσεις.
- **Παρατηρητές πεδίου (εδάφους & αέρος)** – Παρέχουν πληροφορίες για:
  - Την προετοιμασία του ΣΕ
  - Τη στιγμή της έναρξης
  - Τη διάρκεια και την εξασθένησή του

- **Εκπαιδευτές Πυροσβεστικής Υπηρεσίας** – Πρέπει να προσφέρουν εκπαίδευση που να:
  - Καλύπτει την ορολογία της δυναμικής συμπεριφοράς της πυρκαγιάς.
  - Παρέχει σαφείς οδηγίες σχετικά με **ασυνήθιστους κινδύνους**.
  - Ενισχύει τη **λήψη αποφάσεων υπό ακραίες συνθήκες**.

Ένα Συμβάν Έκρηξης (blow-up) είναι από **τα πιο επικίνδυνα σενάρια σε μια δασική πυρκαγιά**. **Η πρόληψη, η έγκαιρη εκκένωση και η εξειδικευμένη εκπαίδευση** είναι οι βασικές παράμετροι για τη μείωση των κινδύνων και τη διαχείριση τέτοιων περιστατικών με **ασφαλή και αποτελεσματικό τρόπο**.

4. Προκλήσεις που προκαλούνται από συγκεκριμένες πυρκαγιές στην αντιμετώπιση

4.1. Πυρκαγιές στη Ζώνη Μίξης Δασών-Οικισμών (WUI)

Η **Ζώνη Μίξης Δασών-Οικισμών (WUI)** είναι η περιοχή όπου η φυσική βλάστηση και οι ανθρώπινες υποδομές συνυπάρχουν, είτε με **μόνιμη είτε με προσωρινή ανθρώπινη παρουσία**. Σε αυτές τις περιοχές, εκτός από τη βλάστηση, υπάρχουν **ποικίλες υποδομές**, οι οποίες συχνά **κατοικούνται ή χρησιμοποιούνται** από ανθρώπους. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τις WUI ιδιαίτερα ευάλωτες και απαιτούν **εξειδικευμένες στρατηγικές διαχείρισης και πυρόσβεσης**.

Η ανθρώπινη δραστηριότητα στις WUI αυξάνει σημαντικά τον **κίνδυνο έναρξης πυρκαγιών**, συγκριτικά με απομακρυσμένες δασικές περιοχές. Παράλληλα, η **αξία των εκτεθειμένων στοιχείων** είναι μεγαλύτερη, καθώς υπάρχει αυξημένος κίνδυνος:

- **Ανθρώπινων και ζωικών απωλειών**
- **Καταστροφής υποδομών υψηλής οικονομικής, κοινωνικής ή πολιτιστικής σημασίας**

<u>Ταξινομήσεις της Ζώνης Μίξης Δασών-Οικισμών (WUI)</u>

Η **Ζώνη Μίξης Δασών-Οικισμών (**WUI) μπορεί να ταξινομηθεί με βάση **τη διάταξη της βλάστησης και των υποδομών**.

- **Ανάλογα με τη συνύπαρξη βλάστησης & υποδομών:**

- **Διεπαφή (Interface WUI)**

  Περιλαμβάνει μια **σαφή οριοθέτηση** μεταξύ των υποδομών και της δασικής βλάστησης. Τυπικό παράδειγμα είναι **μια δομημένη περιοχή που συνορεύει με δάσος**.

  - *Ειδική περίπτωση:* Τα **μεμονωμένα κτίρια** που περιβάλλονται από δάσος.
  - *Αντίστροφη διεπαφή:* Δασική έκταση **περικυκλωμένη από κτίρια**, όπως τα **αστικά πάρκα** *(γνωστή ως εγκλωβισμένη WUI)*.

- **Μικτή WUI (Intermix WUI)**

  Περιλαμβάνει περιοχές όπου η **βλάστηση και οι υποδομές αναμειγνύονται** χωρίς σαφή όρια.

- **Ανάλογα με τον τύπο των υποδομών:**

- **Αστική-Δασική Διεπαφή (Urban-WUI)**

  Περιλαμβάνει τυπικά **αστικά κτίρια** όπως κατοικίες, εμπορικά κέντρα ή κτίρια υπηρεσιών.

- **Βιομηχανική-Δασική Διεπαφή (Industrial-WUI)**

  Όπου η βλάστηση συνυπάρχει με **βιομηχανικές εγκαταστάσεις**.

- **Γραμμική WUI (Linear-WUI)**

  Περιλαμβάνει **υποδομές που εκτείνονται γραμμικά**, όπως:

- **Αυτοκινητόδρομοι**
- **Σιδηροδρομικά δίκτυα**
- **Δίκτυα διανομής ενέργειας**

Προβλήματα στις Πυρκαγιές της Ζώνη Μίξης Δασών-Οικισμών

Λόγω της **πολυπλοκότητας και της ετερογένειας** των WUI, οι δασικές πυρκαγιές σε αυτές τις περιοχές παρουσιάζουν **ιδιαίτερες προκλήσεις**, διαφορετικές από εκείνες που αντιμετωπίζονται σε απομακρυσμένες δασικές εκτάσεις.

Οι κύριες δυσκολίες αφορούν τα **τρία βασικά συστατικά της WUI**:

- **Τη βλάστηση και τη δομή της καύσιμης ύλης**
- **Τις ανθρώπινες υποδομές**
- **Την επιχειρησιακή διαχείριση της πυρκαγιάς**

Οι παρακάτω ενότητες θα αναλύσουν συγκεκριμένα ζητήματα και στρατηγικές διαχείρισης για κάθε μία από αυτές τις προκλήσεις.

4.1.1. Φυσικά καύσιμα – βλάστηση

Η βλάστηση που συναντάται στη **Ζώνη Μίξης Δασών-Οικισμών (WUI)** διακρίνεται σε **αυτοφυή** και **διαχειριζόμενη/καλλωπιστική**. Η κατανομή αυτών των δύο τύπων βλάστησης εξαρτάται από την ταξινόμηση της WUI και τη σχέση της με τις ανθρώπινες υποδομές.

Στη **"Διεπαφή WUI"**, ιδιαίτερα σε περιοχές **μακριά από τα κτίρια**, η βλάστηση είναι **αυτοφυής**, παρόμοια με αυτή που συναντάται σε φυσικές δασικές εκτάσεις. Στη **Γραμμική περίπτωση WUI**, όπου κυριαρχούν **δίκτυα μεταφορών και ενέργειας**, η βλάστηση είναι **επίσης αυτοφυής** λόγω της εκτεταμένης έκτασής της. Στις **Εγκλωβισμένες καταστάσεις WUI**, η βλάστηση μπορεί να είναι είτε **αυτοφυής είτε καλλωπιστική**, με συνήθως **καλύτερη διαχείριση** σε σύγκριση με την "τυπική Διεπαφή WUI". Στα **Απομονωμένα κτίρια** (*ειδική περίπτωση της Διεπαφής WUI*) και στα **Μικτά Σενάρια**, η παρουσία **καλλωπιστικής, καλά συντηρημένης βλάστησης** είναι συχνή.

Ο ρόλος της διαχείρισης της βλάστησης στον κίνδυνο πυρκαγιάς

Η **καλή συντήρηση** της καλλωπιστικής βλάστησης, ιδίως μέσω **τακτικού ποτίσματος**, παίζει κρίσιμο ρόλο στη **μείωση του κινδύνου πυρκαγιάς**, καθώς **αυξάνει την περιεκτικότητα σε υγρασία των καυσίμων**. Επιπλέον, τα **είδη φυτών που επιλέγονται** έχουν σημαντική επίδραση στην ευφλεκτότητα της βλάστησης.

Είδη με χαμηλή ευφλεκτικότητα όπως οι **ορτανσίες** συμβάλλουν στη **μείωση του κινδύνου πυρκαγιάς**.

Είδη με υψηλή ευφλεκτικότητα, όπως οι **δάφνες**, έχουν τάση για **ταχεία ανάφλεξη**, συχνά περισσότερο από κάποια αυτοφυή είδη (Almeida et al., 2022).

Οι φράχτες βλάστησης ως παράγοντας κινδύνου

Οι **φράχτες** που είναι τυπικοί των **οικιστικών κήπων** και συχνά βρίσκονται **κοντά σε κτίρια**, μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τον κίνδυνο πυρκαγιάς εάν δεν επιλεγούν και **συντηρηθούν σωστά**. Ορισμένα είδη, όπως ο **Cupressus arizonica**, **συσσωρεύουν ξηρό καύσιμο υλικό** στο

εσωτερικό τους, ειδικά όταν κλαδεύονται για να διατηρήσουν σχήμα. Αυτό τα καθιστά **ιδιαίτερα ευάλωτα σε ταχεία και έντονη καύση**. Άλλα είδη, όπως ο **Prunus laurocerasus**, **ρίχνουν νεκρό υλικό**, γεγονός που μειώνει την πιθανότητα γρήγορης διάδοσης της πυρκαγιάς. Οι **Ribeiro & Almeida (2020)** πραγματοποίησαν **λεπτομερή μελέτη** αναλύοντας την **ευφλεκτότητα διαφορετικών ειδών φρακτών**, αναδεικνύοντας τη σημασία της **επιλογής και συντήρησης** των φρακτών στη μείωση του κινδύνου πυρκαγιάς.

Η **βλάστηση στη διεπαφή WUI**, είτε αυτοφυής είτε διαχειριζόμενη, αποτελεί **βασικό παράγοντα κινδύνου**. Η **σωστή επιλογή και συντήρησή της** μπορεί να μειώσει σημαντικά την **πιθανότητα ανάφλεξης** και τη **διάδοση της πυρκαγιάς** στις κατοικημένες περιοχές.

4.1.2. Ανθρωπογενή καύσιμα

Τα **ανθρωπογενή καύσιμα** περιλαμβάνουν **όλα τα καύσιμα που δεν είναι βλάστηση**, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα υλικών και κατασκευών. Τα κυριότερα είδη ανθρωπογενών καυσίμων στη **Ζώνη Μίξης Δασών-Οικισμών (WUI)** περιλαμβάνουν:

- **Υποδομές** και τα πιο εύφλεκτα στοιχεία τους (π.χ. ξύλινα κτίρια, πλαστικά εξαρτήματα, μονωτικά υλικά).
- **Εξοπλισμός**, όπως **οχήματα, ηλεκτρικά καλώδια, υπαίθρια βιομηχανικά μηχανήματα** και άλλες κατασκευές που μπορεί να αναφλεγούν ή να επηρεάσουν τη διάδοση της πυρκαγιάς.
- **Άλλα καύσιμα**, όπως **καυσόξυλα, φιάλες αερίου, δεξαμενές καυσίμων**, που αυξάνουν τον κίνδυνο εκρήξεων ή επιταχυνόμενης καύσης.

Προκλήσεις που σχετίζονται με τα ανθρωπογενή καύσιμα

Τα ανθρωπογενή καύσιμα παρουσιάζουν **σημαντική πολυπλοκότητα** στην κατανόηση, τον χαρακτηρισμό και τη μοντελοποίηση της **συμπεριφοράς της πυρκαγιάς στη WUI**. Οι κύριοι λόγοι είναι οι εξής:

- **Μεγάλη Ετερογένεια στην Ευφλεκτότητα**

  - Η ευφλεκτότητα των ανθρωπογενών καυσίμων **ποικίλλει ευρέως** ανάλογα με το υλικό τους:
  - **Ξύλινες κατασκευές** και **πλαστικά** υλικά καίγονται γρήγορα και συμβάλλουν στην **ταχεία εξάπλωση της πυρκαγιάς**.
  - **Ανοξείδωτα και μεταλλικά αντικείμενα** μπορεί να μην είναι εύφλεκτα, αλλά μπορούν να θερμανθούν και να επηρεάσουν τη γύρω περιοχή.

- **Δυνατότητα Πρόκλησης Δευτερογενών Κινδύνων**

  Τα ανθρωπογενή καύσιμα **δεν λειτουργούν μόνο ως πηγή καύσιμης ύλης**, αλλά μπορούν επίσης να δημιουργήσουν **επιπρόσθετους κινδύνους** όπως:

  - **Αναφλέξεις ή εκρήξεις** (π.χ. φιάλες αερίου, δεξαμενές καυσίμων).
  - **Καταρρεύσεις και συντριβές** (π.χ. πτώση δομικών στοιχείων κτιρίων, κατεστραμμένα οχήματα).

- **Κίνδυνος ηλεκτροπληξίας** (π.χ. ηλεκτρικά καλώδια που πέφτουν και έρχονται σε επαφή με καύσιμα).

Η παρουσία ανθρωπογενών καυσίμων στη μεικτή ζώνη Δασών-Οικισμών (WUI) **πολλαπλασιάζει τους κινδύνους της πυρκαγιάς**, καθιστώντας **την πρόληψη και την προετοιμασία κρίσιμες** για τη μείωση των επιπτώσεων. Η **διαχείριση των καυσίμων, η απομάκρυνση εύφλεκτων αντικειμένων από ευαίσθητες ζώνες και η δημιουργία αντιπυρικών ζωνών** μπορούν να μειώσουν σημαντικά τους κινδύνους που συνδέονται με την παρουσία ανθρωπογενών καυσίμων.

4.1.3. Ανθρώπινη παρουσία

Η παρουσία ανθρώπων στη ζώνη μείξης Δασών-Οικισμών εισάγει πρόσθετες δυσκολίες, καθώς αυξάνει την ευθύνη για την προστασία τους, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να επηρεάσει τις επιχειρήσεις καταστολής λόγω συμπεριφορών πανικού και απρόβλεπτων αντιδράσεων. Επιπλέον, ο πληθυσμός μπορεί να περιλαμβάνει άτομα με ειδικές ανάγκες, όπως παιδιά, ηλικιωμένους ή άτομα με κινητικούς, ψυχολογικούς ή υγειονομικούς περιορισμούς (π.χ. καρδιοαναπνευστικά προβλήματα), γεγονός που καθιστά τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την εκκένωση ή την καταφυγή επί τόπου – όπως θα αναλυθεί στην **Ενότητα 6.2** – ιδιαίτερα κρίσιμη.

Αν και ο κίνδυνος πυρκαγιάς στη ζώνη μείξης Δασών-Οικισμών συχνά συσχετίζεται με την άφιξη των φλογών, οι **δευτερογενείς εστίες λόγω καύτρων** αποτελούν σημαντικότερο μηχανισμό ανάφλεξης. Σε μελέτες των **Ribeiro et al. (2020)** σε **963 κτίρια** που επηρεάστηκαν από τις πυρκαγιές του **Pedrógão Grande (Πορτογαλία, 2017)**, το **61%** των κτιρίων αναφλέχθηκε από καύτρες, ενώ μόνο το **21%** από άμεση επαφή με τις φλόγες. Οι κύριες δομικές αδυναμίες εντοπίστηκαν σε **στέγες (62%)** και **παράθυρα (16%)**, σημεία ιδιαίτερα ευάλωτα στη διείσδυση καύτρων.

Παρόμοια στοιχεία προέκυψαν στην **έκθεση των Viegas et al. (2019)** για τις **δασικές πυρκαγιές της 15ης Οκτωβρίου 2017 στην Πορτογαλία**, όπου από **140 βιομηχανικές εγκαταστάσεις** που υπέστησαν ζημιές, το **53%** αναφλέχθηκε λόγω καύτρων, ενώ το **27%** λόγω άμεσης επαφής με φλόγες. Τα πιο ευάλωτα δομικά στοιχεία ήταν τα **ανοίγματα (29%)**, οι **τοίχοι (19%)** και οι **στέγες (17%)**.

Η ζώνη μείξης Δασών-Οικισμών παρουσιάζει μια **ιδιαίτερα δυναμική και περίπλοκη πρόκληση** για τη διαχείριση δασικών πυρκαγιών. Η **συνύπαρξη φυσικών και ανθρωπογενών καυσίμων**, η **ετερογένεια στη διάταξη των υποδομών** και η **ανθρώπινη παρουσία** δημιουργούν ένα **απρόβλεπτο περιβάλλον**, όπου οι μηχανισμοί διάδοσης της πυρκαγιάς είναι **πολύπλοκοι** και συχνά δύσκολο να προβλεφθούν.

Η αποτελεσματική αντιμετώπιση απαιτεί **ολοκληρωμένες προσεγγίσεις διαχείρισης κινδύνου**, που περιλαμβάνουν:

- **Βελτίωση της ανθεκτικότητας των κτιρίων** (ενίσχυση στεγών, παραθύρων, ανοιγμάτων),
- **Κατάλληλη διαχείριση της βλάστησης** και απομάκρυνση εύφλεκτων υλικών,
- **Εκπαίδευση των κατοίκων** για τους κινδύνους από καύτρες και τις βέλτιστες πρακτικές προστασίας.

4.2. Πυρκαγιές σε περιοχές μεγάλου υψομέτρου

Οι πυρκαγιές σε μεγάλα υψόμετρα, δηλαδή σε ορεινές περιοχές, χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερη συμπεριφορά, η οποία μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τη συνήθη συμπεριφορά πυρκαγιών σε χαμηλότερα και πιο επίπεδα εδάφη. Η δυναμική της εξάπλωσης επηρεάζεται από τη **μειωμένη πυκνότητα του αέρα**, τις **χαμηλότερες θερμοκρασίες**, τη **διαφορετική υγρασία καυσίμου** και τις **τοπογραφικές επιδράσεις**, όπως η αυξημένη κλίση και η παρουσία φαραγγιών που μπορούν να επιταχύνουν τη διάδοση της πυρκαγιάς.

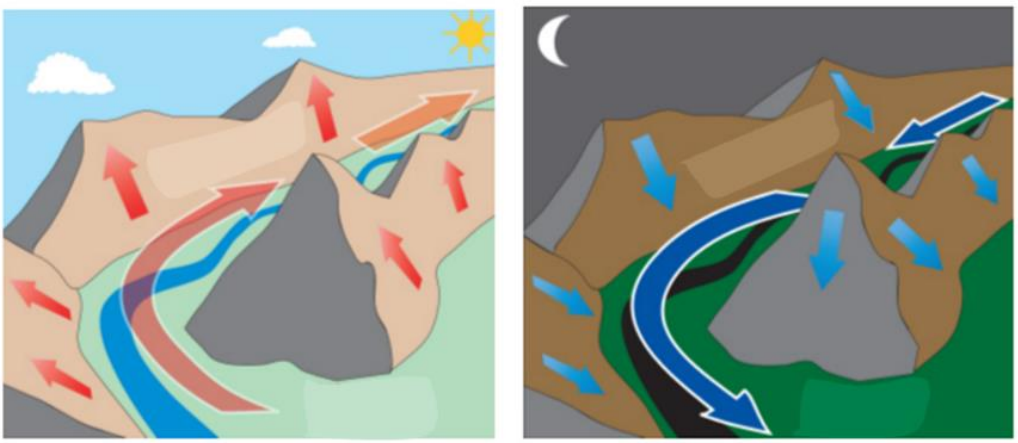
Οι επιπτώσεις αυτών των πυρκαγιών, τόσο στον ανθρώπινο πληθυσμό όσο και στα ορεινά οικοσυστήματα, παρουσιάζουν επίσης **ιδιαίτερα χαρακτηριστικά**. Τα **ορεινά δάση** και οι **αλπικές περιοχές** φιλοξενούν **ευαίσθητα οικοσυστήματα** που συχνά ανακάμπτουν με πιο αργό ρυθμό από ό,τι τα χαμηλότερα δασικά οικοσυστήματα. Παράλληλα, οι **δυσκολίες πρόσβασης** και οι **περιορισμένες δυνατότητες καταστολής** σε αυτά τα περιβάλλοντα καθιστούν τις επιχειρήσεις πυρόσβεσης **ιδιαίτερα απαιτητικές** (Mayer et al., 2020).

4.2.1. Συμπεριφορά πυρκαγιάς που καθοδηγείται από την τοπογραφία

Μια από τις βασικές ιδιαιτερότητες των πυρκαγιών σε ορεινές περιοχές είναι ο τρόπος εξάπλωσής τους, ο οποίος επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την **έντονη κλίση των πλαγιών** και την **παρουσία κοιλάδων**. Αυτά τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά δημιουργούν τοπικούς ανέμους, γνωστούς ως **αύρες**, οι οποίοι διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς.

Οι αύρες προκύπτουν από **θερμικές διακυμάνσεις** μεταξύ των κορυφογραμμών και των χαραδρών, καθώς η διαφορά στη θέρμανση του αέρα κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας επηρεάζει τα ρεύματα ανέμου. Πρόκειται για ένα **ημερήσιο φαινόμενο**, το οποίο σημαίνει ότι η συμπεριφορά της πυρκαγιάς – συμπεριλαμβανομένης της **κατεύθυνσης εξάπλωσης** – μεταβάλλεται **ανάλογα με την ώρα της ημέρας** (Εικόνα 4).

Κατά τη διάρκεια της **ημέρας**, η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει τις πλαγιές, προκαλώντας **ανωφερείς ανέμους**, οι οποίοι επιταχύνουν την εξάπλωση της πυρκαγιάς προς τα υψηλότερα σημεία. Αντίθετα, τη **νύχτα**, η θερμοκρασία μειώνεται και επικρατούν **κατωφερείς άνεμοι**, που μπορεί να ανακατευθύνουν την πυρκαγιά προς τις κοιλάδες, επηρεάζοντας σημαντικά τη στρατηγική καταστολής της.



Εικόνα 4: Αύρες πλαγιάς και κοιλάδας κατά τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και της νύχτας (δεξιά) (πηγή: Meteo France)

Καθώς η **αύρα της πλαγιάς ανεβαίνει** κατά τις **απογευματινές ώρες**, η πυρκαγιά εξαπλώνεται **γρήγορα προς τα πάνω**, διατηρώντας ένα **στενό και επιμήκες σχήμα**. Όταν το μέτωπο της πυρκαγιάς **φτάσει στην κορυφογραμμή**, η **μετωπική εξάπλωση σταματά** προσωρινά, καθώς η τοπογραφία δεν υποστηρίζει περαιτέρω άμεση προώθηση.

Στη συνέχεια, η πυρκαγιά **αρχίζει να διευρύνεται πλευρικά**, με **σταδιακή αύξηση του εύρους της**. Αυτή η διαδικασία **εντείνεται κατά τη διάρκεια της νύχτας**, όταν οι **κατωφερείς άνεμοι** επηρεάζουν την εξάπλωσή της, συμβάλλοντας σε ένα πιο **διάχυτο και αργό μοτίβο εξάπλωσης**.

4.2.2. Ζήτημα ασφάλειας

Όταν η **κλίση του εδάφους υπερβαίνει ένα κρίσιμο όριο**, περίπου **20°**, η φλόγα μπορεί να **προσκολληθεί στην πλαγιά** (Edgar et al., 2016). Αυτό το φαινόμενο **ενισχύει δραματικά την ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς**, προκαλώντας **ταχεία ανάφλεξη ολόκληρης της πλαγιάς** μέσα σε **λίγα λεπτά**, ή ακόμη και **σε μερικές δεκάδες δευτερόλεπτα** υπό ακραίες συνθήκες.

Η απότομη **επιτάχυνση της πυρκαγιάς σε τέτοια τοπογραφικά χαρακτηριστικά** έχει οδηγήσει σε **πολλαπλά περιστατικά παγίδευσης πυροσβεστών**, τα οποία αναφέρονται και αναλύονται λεπτομερώς στα επόμενα κεφάλαια.

4.2.3. Προβλήματα πρόσβασης και αντιμετώπισης

Η τοπογραφία στις **πυρκαγιές μεγάλου υψομέτρου** καθιστά **εξαιρετικά δύσκολη την πρόσβαση** των δυνάμεων πυρόσβεσης. Οι **στενοί δρόμοι και μονοπάτια** περιορίζουν σημαντικά τη διέλευση βαρέων πυροσβεστικών οχημάτων, τα οποία μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες νερού. Σε πολλές περιπτώσεις, οι **επίγειες δυνάμεις** πρέπει να διανύσουν **πολύωρες πεζοπορίες** για να προσεγγίσουν τη γραμμή της πυρκαγιάς από το πλησιέστερο προσβάσιμο σημείο με οχήματα.

Ως αποτέλεσμα, οι **παραδοσιακές τακτικές πυρόσβεσης** που εφαρμόζονται σε επίπεδες περιοχές δεν είναι πάντα εφικτές. Αντίθετα, η καταπολέμηση αυτών των πυρκαγιών πρέπει να βασιστεί στους εξής πυλώνες:

- **Εναέριοι πόροι**, ιδιαίτερα **ελικόπτερα**, τα οποία προσφέρουν ευελιξία τόσο στη **ρίψη νερού** όσο και στη **μεταφορά πυροσβεστών** και εξοπλισμού κοντά στις εστίες της πυρκαγιάς.
- **Ελαφρά οχήματα τετρακίνησης** που επιτρέπουν **μεγαλύτερη κινητικότητα** στο δύσβατο έδαφος.
- **Εξειδικευμένες ομάδες πυροσβεστών**, που πρέπει να διαθέτουν:
  - **Υψηλό επίπεδο εκπαίδευσης και εμπειρίας** στην καταπολέμηση πυρκαγιών σε ορεινά περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων εξειδικευμένων πρωτοκόλλων ασφαλείας.
  - **Άριστη φυσική κατάσταση**, προκειμένου να κινούνται αποτελεσματικά σε δύσκολο έδαφος.
  - **Δεξιότητα στη χρήση εργαλείων χειρός** για τη δημιουργία αντιπυρικών ζωνών.
  - **Ικανότητα συλλογής νερού** από φυσικές πηγές σε απομακρυσμένες περιοχές.
  - **Δυνατότητα εφαρμογής τακτικών αντιπύρ** (βλ. **Παραδοτέο 2.2: Έκθεση για την Εκπαιδευτική Συνεδρία Προδιαγεγραμμένων Καύσεων**).

- **Αυτονομία και προσαρμοστικότητα**, ώστε να ανταποκρίνονται σε αιφνίδιες αλλαγές στη **συμπεριφορά της πυρκαγιάς**.

Οι εξειδικευμένες ομάδες μπορούν είτε να **μεταφερθούν με ελικόπτερα** όσο το επιτρέπουν οι συνθήκες είτε να **φτάσουν πεζή** στη γραμμή της πυρκαγιάς, ανάλογα με την προσβασιμότητα του εδάφους και τη διαθεσιμότητα εναέριων μέσων.

4.2.4 Επιπτώσεις των πυρκαγιών σε μεγάλο υψόμετρο

Σε ορεινές περιοχές, ακόμη και **μικρής κλίμακας πυρκαγιές** μπορούν να οδηγήσουν σε **καταστροφικές συνέπειες** λόγω της κρίσιμης λειτουργίας της βλάστησης στη **σταθεροποίηση του εδάφους**. Η καταστροφή αυτής της βλάστησης προκαλεί **αλυσιδωτές επιπτώσεις**, που περιλαμβάνουν:

- **Βραχοπτώσεις**, καθώς η απώλεια της φυτοκάλυψης μειώνει τη συνοχή του εδάφους, επιτρέποντας την αποκόλληση και πτώση βράχων.
- **Κατολισθήσεις λάσπης**, ιδιαίτερα μετά από έντονες βροχοπτώσεις, λόγω της διαταραχής της εδαφικής δομής.
- **Αύξηση του κινδύνου χιονοστιβάδων**, καθώς η βλάστηση παίζει σημαντικό ρόλο στη συγκράτηση του χιονιού σε απότομες πλαγιές.
- **Διάβρωση εδάφους**, με αποτέλεσμα την απώλεια πολύτιμων θρεπτικών ουσιών και τη μείωση της ικανότητας του εδάφους να υποστηρίξει μελλοντική αναγέννηση της βλάστησης.

Επιπλέον, λόγω του **μακρού κύκλου αναγέννησης** των ορεινών δασών, οι **πυρκαγιές κόμης** που καταστρέφουν ολοκληρωτικά τις συστάδες δέντρων έχουν **μακροχρόνιες επιπτώσεις** στη σταθερότητα του εδάφους. Η απώλεια αυτής της προστατευτικής λειτουργίας μπορεί να διαρκέσει **δεκαετίες** (Mayer et al., 2020), αυξάνοντας σημαντικά τη **διάβρωση** και τον **κίνδυνο φυσικών καταστροφών** σε αυτές τις περιοχές.

4.3. Πυρκαγιές σε περιοχές μεγάλου γεωγραφικού πλάτους

Οι περιοχές **μεγάλου γεωγραφικού πλάτους** της Ευρώπης, όπως τα **Νησιά της Βρετανίας, η Νορβηγία, η Σουηδία, η Φινλανδία και οι Βαλτικές χώρες**, σπάνια προσελκύουν το ενδιαφέρον σε σχέση με τις **δασικές πυρκαγιές**. Παρότι οι **παρατεταμένες ξηρασίες** εμφανίζονται περιοδικά, συνοδεύονται συχνά από **υγρές περιόδους**, οι οποίες περιορίζουν τη συχνότητα και την ένταση των πυρκαγιών (Sjöström & Granström, 2024).

Το μεγαλύτερο μέρος της **Σουηδίας, της Φινλανδίας** και των **Βαλτικών χωρών** ανήκει στη **βόρεια ή ημιβόρεια δασική ζώνη**, όπου κυριαρχούν **εντατικά διαχειριζόμενα κωνοφόρα δάση**, με **μικρές, διάσπαρτες συστάδες φυλλοβόλων δέντρων**. Αντίθετα, η **Νορβηγία** και το **βόρειο Ηνωμένο Βασίλειο** χαρακτηρίζονται από **ορεινές περιοχές**, εκτεταμένα παράκτια **θαμνοτόπια ερείκης** και **κωνοφόρα δάση**. Στο υπόλοιπο **Ηνωμένο Βασίλειο**, η κυρίαρχη χρήση γης είναι τα **καλλιεργήσιμα εδάφη** και τα **λιβάδια** (Morton et al., 2020).

Η **φυσιογεωγραφία** και η **κλιματική μεταβλητότητα** αυτών των περιοχών επηρεάζουν σημαντικά την **πιθανότητα και τη συμπεριφορά των πυρκαγιών**, καθιστώντας τες **λιγότερο συχνές** αλλά δυνητικά **έντονες** σε περιόδους **παρατεταμένης ξηρασίας**.

4.3.1 Καύσιμα και τοπία

Στα βόρεια δάση, εφόσον επικρατήσουν ξηρές συνθήκες, η στρωμνή καυσίμων μπορεί να γίνει εξαιρετικά εύφλεκτη. Ο συνδυασμός δασικής πεύκης και ερυθρελάτης δημιουργεί ένα βαθύ στρώμα βρύων, το οποίο εμπλουτίζεται με νανώδεις θάμνους, σχηματίζοντας ιδανικό καύσιμο κατά τη διάρκεια περιόδων παρατεταμένης ξηρασίας. Τα μη αγγειακά φυτά, όπως τα βρύα, αντλούν υγρασία απευθείας από τον αέρα, με αποτέλεσμα να ξηραίνονται εξίσου γρήγορα με τα λεπτόφυλλα φυλλώματα κατά τη διάρκεια θερμών και ξηρών ημερών.

Πριν από τη βιομηχανική δασοκομία, η οποία αναπτύχθηκε από τα μέσα του 19ου αιώνα, οι καμένες εκτάσεις στα βόρεια δάση ήταν περίπου **100 φορές μεγαλύτερες** από ό,τι σήμερα (Niklasson & Granström, 2000). Η ανάπτυξη ενός εκτεταμένου οδικού δικτύου για τη δασοκομία, σε συνδυασμό με την αυξημένη επιτήρηση και καταστολή των δασικών πυρκαγιών σε παραγωγικά δάση, έχει περιορίσει σημαντικά τις καμένες εκτάσεις σε αυτές τις περιοχές. Αντίθετα, σε απομακρυσμένες περιοχές της Βόρειας Αμερικής και της Σιβηρίας, όπου οι πυρκαγιές εκδηλώνονται σε αμιγώς άγριες περιοχές με δυσχερή πρόσβαση και χωρίς σημαντικά ανθρωπογενή περιουσιακά στοιχεία, η εξάπλωσή τους είναι πιο ανεξέλεγκτη και παραμένει μια φυσική διεργασία του οικοσυστήματος.

Στη Νορβηγία και το Ηνωμένο Βασίλειο, οι περισσότερες πυρκαγιές εκδηλώνονται σε ανοιχτά τοπία, κυρίως θαμνώδεις εκτάσεις και λιβάδια, που κυριαρχούνται από ερείκη (Davies et al., 2013). Αυτές οι πυρκαγιές είναι συχνότερες την άνοιξη, προτού οι δείκτες επικινδυνότητας πυρκαγιάς φτάσουν σε υψηλά επίπεδα. Αυτό συμβαίνει επειδή η αδρανής φαινολογική φάση των θαμνωδών και λιβαδικών οικοσυστημάτων παράγει μεγάλες ποσότητες νεκρού ελαφρού καυσίμου, το οποίο μπορεί να αποξηρανθεί γρήγορα παρά την υψηλή περιεκτικότητα υγρασίας στο έδαφος.

Αυτός ο μηχανισμός μπορεί να οδηγήσει σε ταχέως εξελισσόμενες πυρκαγιές κατά τη διάρκεια περιόδων με ξηρό καιρό και απουσία χιονιού, όπως συνέβη στις μεγάλες πυρκαγιές του Lærdal και του Frøya στη Νορβηγία τον Ιανουάριο του 2014 (Log, 2016), καθώς και σε περιστατικά νησιωτικών πυρκαγιών κατά μήκος των ακτών της Σκωτίας (Fulton, 2024).

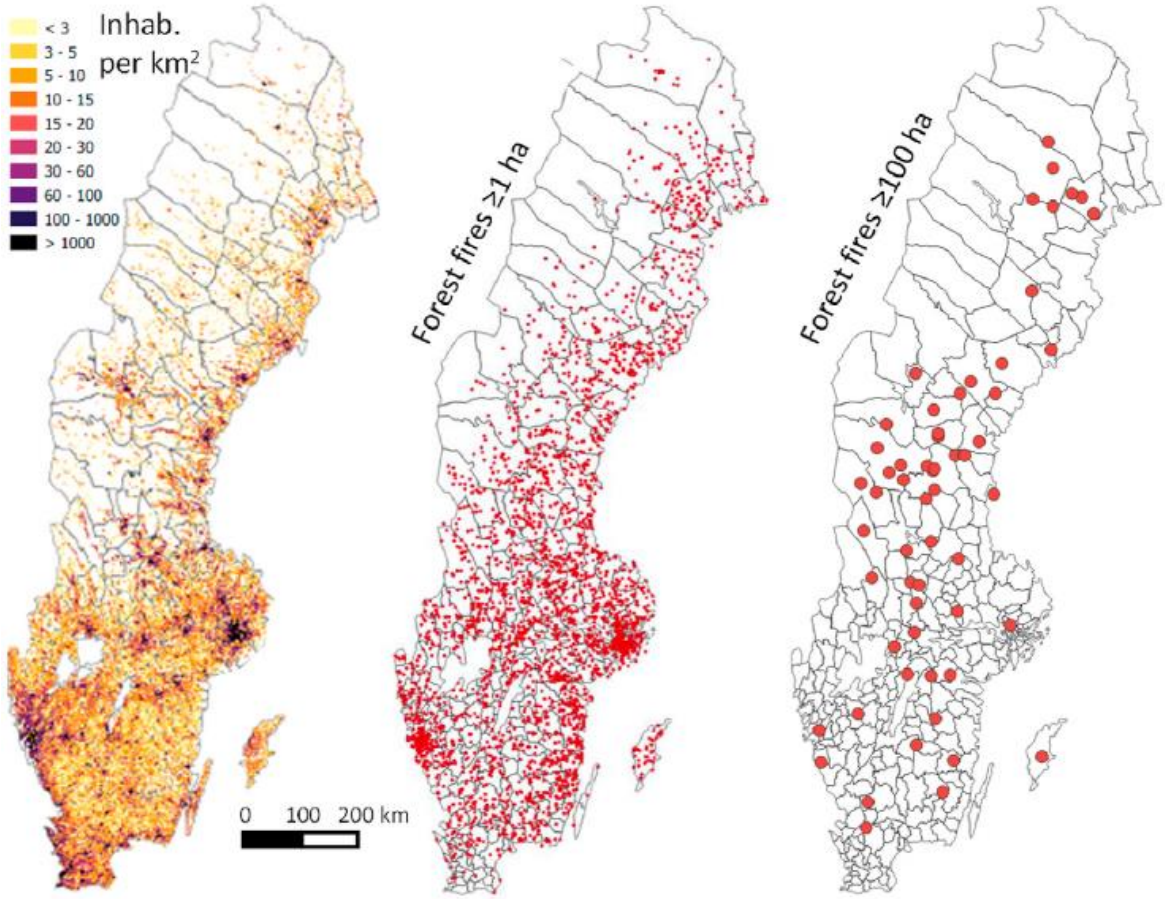
Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της περιόδου πρασινίσματος, όταν η αγγειακή βλάστηση βρίσκεται σε φάση ενεργής ανάπτυξης, η υψηλή περιεκτικότητα υγρασίας στη στρωμνή καυσίμων μειώνει σημαντικά την πιθανότητα εκδήλωσης πυρκαγιών, ακόμη και σε συνθήκες υψηλού κινδύνου. Ως αποτέλεσμα, οι πυρκαγιές στις περιοχές μεγάλου γεωγραφικού πλάτους παρουσιάζουν έντονη εποχικότητα και εξαρτώνται από συγκεκριμένες κλιματικές και φαινολογικές συνθήκες.

4.3.2 Δημογραφικά

Στις πυρόπληκτες περιοχές της Ευρώπης, η συχνότητα εκδήλωσης πυρκαγιών συσχετίζεται άμεσα με την πληθυσμιακή πυκνότητα. Ωστόσο, οι μεγαλύτερες και πιο καταστροφικές δασικές πυρκαγιές στη Βόρεια Ευρώπη τείνουν να εκδηλώνονται σε αραιοκατοικημένες περιοχές (Εικόνα 5). Παρά το γεγονός ότι οι βόρειες χώρες διαθέτουν εκτεταμένη κάλυψη κωνοφόρων δασών, οι πιο αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές παρουσιάζουν επίσης σημαντικά προβλήματα στην αντιμετώπιση των πυρκαγιών, καθώς επηρεάζονται από τρεις βασικούς παράγοντες:

- **Μεγάλος χρόνος εντοπισμού** – Οι δασικές πυρκαγιές σε απομακρυσμένες περιοχές ενδέχεται να μην γίνουν αμέσως αντιληπτές, καθυστερώντας την ενεργοποίηση των μηχανισμών απόκρισης.
- **Δυσκολία προσέγγισης** – Ο ανεπαρκής οδικός άξονας και η χαμηλή προσβασιμότητα επιβραδύνουν την προσέγγιση των πυροσβεστικών δυνάμεων στο σημείο της πυρκαγιάς.
- **Περιορισμένοι πόροι και προσωπικό** – Οι δημοσιονομικοί περιορισμοί σε αγροτικές περιοχές συχνά μεταφράζονται σε χαμηλή διαθεσιμότητα εξειδικευμένου προσωπικού και πυροσβεστικών μέσων, καθιστώντας δυσκολότερη την έγκαιρη και αποτελεσματική αντιμετώπιση των πυρκαγιών (Sjöström & Granström, 2023a).

Αυτοί οι παράγοντες συμβάλλουν στη δυσκολία καταστολής των πυρκαγιών στις βόρειες περιοχές, όπου η χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα συνοδεύεται από μεγάλα δασικά οικοσυστήματα και περιορισμένες υποδομές πυροπροστασίας.



Εικόνα 5. Παράδειγμα από τη Σουηδία 1996-2020. Πυκνότητα πληθυσμού (αριστερά), εμφάνιση δασικών πυρκαγιών (≥1 εκτάριο), (μέση), εμφάνιση δασικών πυρκαγιών (≥100 εκτάρια), (δεξιά) (Sjöström & Granström 2023a).

Η πιθανότητα αποτυχίας της αρχικής επίθεσης και διαφυγής της πυρκαγιάς αυξάνεται εκθετικά με την καθυστέρηση στην έναρξη των επιχειρήσεων καταστολής. Στις βόρειες περιοχές, οι μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των σημείων εκδήλωσης πυρκαγιών και των πυροσβεστικών μονάδων αποτελούν σημαντική πρόκληση, η οποία επιτείνεται από τη συνεχή μείωση του πληθυσμού από τη δεκαετία του 1970.

Αυτή η δημογραφική μεταβολή έχει οδηγήσει σε μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ πυροσβεστικών σταθμών και, κατά συνέπεια, σε αυξημένους χρόνους ανταπόκρισης των δυνάμεων πυρόσβεσης. Επιπλέον, το πυροσβεστικό προσωπικό αποτελείται κυρίως από

εθελοντές ή πυροσβέστες μερικής απασχόλησης, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την ταχύτητα και την αποτελεσματικότητα της απόκρισης.

Πριν από πενήντα χρόνια, οι γνώσεις και οι δεξιότητες στην αντιμετώπιση των δασικών πυρκαγιών ήταν ευρέως διαδεδομένες μεταξύ των κατοίκων των αγροτικών περιοχών. Σήμερα, ωστόσο, αυτές οι γνώσεις έχουν περιοριστεί σε μικρό αριθμό εξειδικευμένων ατόμων, γεγονός που δυσχεραίνει τη διαχείριση πυρκαγιών, ιδιαίτερα κατά τις περιόδους αιχμής, όταν η ζήτηση για πυρόσβεση είναι αυξημένη και η τοπική υποστήριξη είναι ανεπαρκής.

4.3.3 Ζητήματα και βελτιώσεις των τελευταίων δεκαετιών

- **Μείωση διαθέσιμων πόρων**: Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 και στις αρχές της δεκαετίας του 2000, η διαθεσιμότητα πόρων για την αντιμετώπιση δασικών πυρκαγιών στη βόρεια Ευρώπη μειώθηκε, οδηγώντας σε αυξημένους χρόνους ανταπόκρισης και μεγαλύτερη πιθανότητα εξάπλωσης των πυρκαγιών πριν από την άφιξη των δυνάμεων καταστολής.
- **Υποτίμηση της δυνατότητας εξάπλωσης των πυρκαγιών**: Τα εμπορικά δάση παραγωγής ξυλείας έχουν πολύ υψηλό δυναμικό εξάπλωσης της φωτιάς, το οποίο συχνά δεν λαμβάνεται πλήρως υπόψη κατά την αρχική επίθεση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανεπαρκή καταστολή και τη γρήγορη μετάβαση σε ανεξέλεγκτες πυρκαγιές.
- **Έλλειψη πόρων και ανεπαρκής εκκαθάριση καύσιμης ύλης**: Αυτοί οι δύο παράγοντες συνέβαλαν καθοριστικά στις μεγάλες πυρκαγιές που εκδηλώθηκαν σε ολόκληρη τη Σκανδιναβία το 2018. Η ευθύνη για τη διαχείριση της καύσιμης ύλης ανήκει στους ιδιοκτήτες γης, οι οποίοι συχνά δεν διαθέτουν τα απαραίτητα μέσα ή γνώσεις για αποτελεσματική πρόληψη πυρκαγιών.
- **Αντιμετώπιση πυρκαγιών σε ακραίες καιρικές συνθήκες**: Οι δασικές πυρκαγιές που εκδηλώνονται σε ψυχρό, σκοτεινό και ανεμώδες περιβάλλον απαιτούν ιδιαίτερη ετοιμότητα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι νορβηγικές χειμερινές πυρκαγιές του 2014, κατά τις οποίες σχεδόν 100 κτίρια, μερικά από τα οποία ανήκαν στον κατάλογο Παγκόσμιας Κληρονομιάς της UNESCO, καταστράφηκαν. Οι καιρικές συνθήκες περιόρισαν τη δυνατότητα χρήσης εναέριων μέσων, ενώ ο παγετός έφραξε τους σωλήνες υδροληψίας, δυσχεραίνοντας σημαντικά τις επιχειρήσεις πυρόσβεσης (Log 2016).
- **Ανεπάρκεια του συστήματος πρόγνωσης πυρκαγιών**: Το σύστημα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών του Ηνωμένου Βασιλείου δεν λαμβάνει υπόψη τις φαινολογικές μεταβολές της βλάστησης, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να παράσχει αξιόπιστες προβλέψεις για τις περισσότερες πυρκαγιές. Η έλλειψη προσαρμογής στις εποχικές αλλαγές επηρεάζει την αποτελεσματικότητα των μέτρων πρόληψης και απόκρισης.

Πρόσφατες βελτιώσεις στην αντιμετώπιση των δασικών πυρκαγιών

- Τα τελευταία πέντε χρόνια έχουν σημειωθεί σημαντικές βελτιώσεις στη διαχείριση και καταστολή των δασικών πυρκαγιών στη Βόρεια Ευρώπη, κυρίως λόγω νέων πολιτικών και επενδύσεων:
- **Αυξημένη χρήση εναέριων μέσων στα πρώιμα στάδια της πυρκαγιάς**: Κρατικά και ευρωπαϊκά χρηματοδοτούμενα προγράμματα για εναέρια πυρόσβεση (κυρίως σε Σουηδία και Νορβηγία) έχουν ενισχύσει τη χρήση αεροσκαφών σταθερών πτερυγίων και ελικοπτέρων από την έναρξη των πυρκαγιών. Αυτό αποτελεί σημαντική αλλαγή σε σύγκριση με το παρελθόν, όταν τα εναέρια μέσα ενεργοποιούνταν μόνο μετά την αποτυχία της αρχικής επίθεσης.
- **Κεντρικοποίηση της διοίκησης και καλύτερη κατανομή πόρων**: Η αναδιοργάνωση των πυροσβεστικών υπηρεσιών προς μια πιο κεντρική δομή διοίκησης και ελέγχου έχει βελτιώσει την κατανομή των διαθέσιμων πόρων, διευκολύνοντας την αντιμετώπιση πυρκαγιών ακόμη και σε απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές.

- **Αυξημένες δυνάμεις ανταπόκρισης κατά την αρχική επίθεση**: Οι μεγαλύτερες αναπτύξεις πυροσβεστικών δυνάμεων αμέσως μετά τον συναγερμό έχουν αυξήσει την αποτελεσματικότητα της αρχικής καταστολής, βελτιώνοντας σημαντικά τις πιθανότητες περιορισμού της φωτιάς πριν αυτή εξαπλωθεί ανεξέλεγκτα.
- **Πυροπροστασία κτιρίων από ανοιξιάτικες πυρκαγιές**: Οι περισσότερες οικιστικές απώλειες στη Βόρεια Ευρώπη συμβαίνουν κατά τη διάρκεια εαρινών πυρκαγιών, οι οποίες ξεκινούν συχνά σε πολύ μικρές εστίες, πολλές φορές έξω ή και μέσα σε κήπους. Η βελτίωση της ευαισθητοποίησης των πολιτών σχετικά με τους κινδύνους και η εφαρμογή απλών μεθόδων καθαρισμού των εύφλεκτων υλικών γύρω από τις κατοικίες μπορούν να μειώσουν σημαντικά τον αριθμό των καμένων κτιρίων.
- **Εφαρμογή μοντέλου προειδοποίησης για ανοιξιάτικες πυρκαγιές**: Από το 2021, η Σουηδία εφαρμόζει ένα σύστημα προειδοποίησης ειδικά για τις ανοιξιάτικες πυρκαγιές σε ξηρά λιβάδια και χορτολιβαδικές εκτάσεις, το οποίο συμβάλλει στην έγκαιρη ενημέρωση του κοινού και των αρχών (Sjöström & Granström 2023b).

4.3.4 Παράγοντες που θα επηρεάσουν το μέλλον των δασικών πυρκαγιών στη Βόρεια Ευρώπη

Το μέλλον της διαχείρισης των δασικών πυρκαγιών στις βόρειες περιοχές θα επηρεαστεί από διάφορους κοινωνικούς, δασοκομικούς και εκπαιδευτικούς παράγοντες. Οι κυριότεροι από αυτούς περιλαμβάνουν:

- **Δημογραφική μείωση των αγροτικών περιοχών**: Η συνεχιζόμενη πληθυσμιακή μείωση στις αγροτικές περιοχές θα επιδεινώσει τις δυσκολίες στη στρατολόγηση προσωπικού για την αντιμετώπιση δασικών πυρκαγιών. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερους χρόνους ανταπόκρισης και μειωμένη ετοιμότητα.
- **Βελτιστοποίηση των δασοκομικών πρακτικών**:
    - Ο περιορισμός της φύτευσης του είδους *Pinus contorta*, ενός εξαιρετικά εύφλεκτου είδους, θα μειώσει τη συνολική ευφλεκτότητα των δασικών οικοσυστημάτων σε σχέση με το ιθαγενές *Pinus sylvestris*.
    - Η μείωση της επιθετικής προ-εμπορικής αραίωσης των φυλλοβόλων δέντρων (κυρίως σημύδας και τρέμουσας λεύκης) θα συμβάλει στον περιορισμό της εξάπλωσης της φωτιάς. Η παρουσία φυλλοβόλων ειδών μειώνει την ευφλεκτότητα του στρώματος βρύων και δημιουργεί φυσικά φράγματα στην εξάπλωση της πυρκαγιάς (Vermina Plathner et al., 2022).
- **Εκπαίδευση πυροσβεστών και διατήρηση της επιχειρησιακής ετοιμότητας**: Σε περιόδους χαμηλής πυρομετεωρολογικής επικινδυνότητας, η εξάσκηση στις τακτικές καταστολής πυρκαγιών μειώνεται, με αποτέλεσμα τη σταδιακή απώλεια γνώσεων και δεξιοτήτων. Είναι κρίσιμο η εκπαίδευση των πυροσβεστών να συνεχίζεται ανεξάρτητα από τις εκάστοτε κλιματικές συνθήκες. Επίσης, η διαχείριση των δασικών πυρκαγιών πρέπει να παραμένει επικεντρωμένη στο έδαφος, με την υποστήριξη αλλά όχι την αποκλειστική εξάρτηση από τα εναέρια μέσα.
- **Απλές πρακτικές κηποτεχνίας για την προστασία των κτιρίων από πυρκαγιές**: Οι πρακτικές διαχείρισης των αυλών και των περιμετρικών περιοχών των κατοικιών μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την πιθανότητα επιβίωσης των κτιρίων σε βόρειες δασικές πυρκαγιές. Οι βασικές προτεινόμενες πρακτικές περιλαμβάνουν:
    - **Διατήρηση ενός καλά διαχειριζόμενου γκαζόν** γύρω από το κτίριο για τον περιορισμό της καύσιμης ύλης.
    - **Απομάκρυνση στοιβών καυσίμων** (όπως καυσόξυλα ή ξηρή βλάστηση) από τις προσόψεις και τις άμεσες περιοχές των κτιρίων.

- **Φύτευση φυλλοβόλων δέντρων** γύρω από τις οικίες, τα οποία μειώνουν τη μεταφορά θερμότητας και λειτουργούν ως φυσικά αντιπυρικά φράγματα (Vermina Plathner et al., 2023).

Η προσαρμογή στις μελλοντικές προκλήσεις απαιτεί συνδυασμό κοινωνικών, διαχειριστικών και τεχνολογικών παρεμβάσεων, ώστε να βελτιωθεί η ανθεκτικότητα των δασικών οικοσυστημάτων και των τοπικών κοινωνιών έναντι των δασικών πυρκαγιών.

5. Εκπομπή και διασπορά καπνού

5.1. Εκπομπή καπνού

Ο καπνός που απελευθερώνεται από τις δασικές πυρκαγιές περιέχει μια ποικιλία χημικών ενώσεων, οι οποίες επηρεάζουν τόσο το περιβάλλον όσο και την ανθρώπινη υγεία. Οι κυριότερες εκπομπές περιλαμβάνουν:

- **Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)** – το κύριο προϊόν της καύσης, συμβάλλει άμεσα στην αύξηση των επιπέδων ατμοσφαιρικού CO_2 και επομένως στην κλιματική αλλαγή.
- **Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)** – τοξικό αέριο που προκύπτει από ατελή καύση και μπορεί να επηρεάσει την οξυγόνωση του αίματος σε υψηλές συγκεντρώσεις.
- **Μεθάνιο (CH_4)** – ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου που προκύπτει κυρίως από την καύση οργανικής ύλης υπό συνθήκες χαμηλής οξυγόνωσης.
- **Οξείδια του αζώτου (NO_x)** – συμβάλλουν στη δημιουργία τροποσφαιρικού όζοντος και φωτοχημικού νέφους, επηρεάζοντας την ποιότητα του αέρα.
- **Αμμωνία (NH_3)** – εκλύεται κυρίως από την καύση βιομάζας και μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό δευτερογενών σωματιδίων στον αέρα.
- **Αιωρούμενα σωματίδια (PM)** – σωματίδια διαφόρων μεγεθών που μεταφέρονται στην ατμόσφαιρα, κυρίως:
    - $PM_{2.5}$ (διάμετρος <2,5 μm) – διεισδύουν βαθιά στο αναπνευστικό σύστημα και σχετίζονται με καρδιαγγειακά και αναπνευστικά προβλήματα.
    - PM_{10} (διάμετρος <10 μm) – επηρεάζουν κυρίως την ανώτερη αναπνευστική οδό.
- **Μη μεθανικοί υδρογονάνθρακες (NMHC)** – οργανικές ενώσεις που μπορούν να συμμετέχουν σε φωτοχημικές αντιδράσεις, συμβάλλοντας στη δημιουργία όζοντος χαμηλού επιπέδου και στη ρύπανση του αέρα.

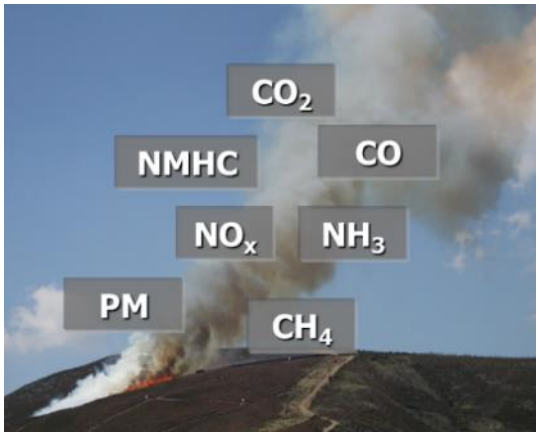
Η **Εικόνα 6** απεικονίζει τις διαφορετικές ενώσεις που συνθέτουν τον καπνό και τις κύριες επιπτώσεις τους.

Αυτές οι εκπομπές έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην τοπική και περιφερειακή ποιότητα του αέρα (**Valente et al., 2007; Miranda et al., 2009; Carvalho et al., 2011; Martins et al., 2012; Keywood et al., 2015; Osswald et al., 2023**), οδηγώντας σε:

- **Μείωση της ορατότητας**,
- **Σχηματισμό φωτοχημικού νέφους**,
- **Υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα**,

- **Αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία** (**Miranda et al., 2010, 2012; Johnston et al., 2012; Dennekamp et al., 2015; Reid et al., 2016; Haikerwal et al., 2016; Sebastião et al., 2019**).

Οι συνέπειες του καπνού των δασικών πυρκαγιών υπογραμμίζουν την ανάγκη ανάπτυξης στρατηγικών για την πρόληψη και διαχείριση της ποιότητας του αέρα, ιδίως σε περιοχές που πλήττονται συχνά από έντονες πυρκαγιές.



Εικόνα 6 Μερικές από τις ενώσεις καπνού που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια μιας δασικής πυρκαγιάς. (Εικονογράφηση των συγγραφέων)

Εκτίμηση Ατμοσφαιρικών Εκπομπών από Δασικές Πυρκαγιές

Η εκτίμηση των εκπομπών από δασικές πυρκαγιές απαιτεί την ανάλυση μιας σειράς αλληλοσχετιζόμενων παραγόντων, όπως τα χαρακτηριστικά του καυσίμου, η απόδοση της καύσης, η φάση της καύσης, ο τύπος της πυρκαγιάς, οι μετεωρολογικές συνθήκες και η γεωγραφική τοποθεσία. Επιπλέον, η καμένη έκταση και η διάρκεια της πυρκαγιάς αποτελούν κρίσιμες μεταβλητές για την ακριβή εκτίμηση των εκπομπών.

Κύριοι Παράγοντες που Επηρεάζουν τις Εκπομπές

- **Τύπος Βλάστησης και Φορτίο Καυσίμου**

Ο τύπος της βλάστησης και το φορτίο βιομάζας αποτελούν δύο από τους σημαντικότερους παράγοντες για την εκτίμηση των εκπομπών. Οι διακυμάνσεις σε αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να συμβάλουν έως και 80% στις αβεβαιότητες των εκτιμήσεων των εκπομπών από δασικές πυρκαγιές (**Ottmar et al., 2009**).

- **Φάσεις Καύσης και Είδη Εκπομπών**

Η καύση εξελίσσεται σε διαφορετικές φάσεις, οι οποίες επηρεάζουν τη σύνθεση και τη συγκέντρωση των εκπομπών:

- **Προανάφλεξη**: Απομάκρυνση υγρασίας από το καύσιμο μέσω εξάτμισης.
- **Φάση φλόγας (έντονη καύση)**: Οι κυριότερες εκπομπές περιλαμβάνουν CO_2, υδρατμούς, NO_x, SO_2 και σωματίδια υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Λόγω της υψηλής απόδοσης καύσης, κυριαρχούν πλήρως οξειδωμένες ενώσεις (**Lobert & Warnatz, 1993**).

- **Καύση χωρίς φλόγα**: Παράγονται κυρίως μερικώς οξειδωμένες ενώσεις, όπως CO, CH_4, μη μεθανικοί υδρογονάνθρακες (NMHC), πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH), NH_3 και σωματίδια χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Το CO είναι η κυρίαρχη ένωση της φάσης.

- **Απόδοση Καύσης**

Η απόδοση καύσης εκφράζει την ποσότητα του άνθρακα που εκπέμπεται με τη μορφή CO_2 σε σχέση με το συνολικό περιεχόμενο άνθρακα του καυσίμου. Συνήθως εκφράζεται ως ο λόγος:

CO2CO2+CO\frac{CO_2}{CO_2 + CO}CO2+COCO2

Μία υψηλή απόδοση καύσης αντιστοιχεί σε περισσότερη πλήρη καύση (π.χ., υψηλές εκπομπές CO_2), ενώ χαμηλή απόδοση σχετίζεται με αυξημένες εκπομπές μερικώς οξειδωμένων ενώσεων (CO, CH_4, NMHC).

- **Συντελεστής Εκπομπής**

Ο συντελεστής εκπομπής περιγράφει τη μάζα ενός συγκεκριμένου ρύπου που εκπέμπεται ανά μονάδα μάζας καυσίμου που καταναλώνεται ή ανά καμένη έκταση. Οι συντελεστές εκπομπής ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο καυσίμου και την απόδοση καύσης. Για παράδειγμα, πυρκαγιές που κυρίως καταναλώνουν καύσιμο στη φάση καύσης χωρίς φλόγα μπορεί να εκπέμπουν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες ρύπων (εξαιρουμένου του CO_2) σε σχέση με πυρκαγιές που καταναλώνουν καύσιμο στη φάση της φλόγας (**Peterson, 1987**).

<u>Εφαρμογή σε Ευρωπαϊκές Συνθήκες</u>

Για την περιοχή της **Νότιας Ευρώπης**, οι συντελεστές εκπομπής έχουν επιλεγεί βάσει βιβλιογραφικής ανασκόπησης και προηγούμενων μελετών (**Fernandes et al., 2022; Miranda, 2004; Alves et al., 2011; Martins et al., 2012; Van Der Werf et al., 2017; Vicente et al., 2017, 2012**). Ο **Πίνακας 3** παρουσιάζει τους μέσους συντελεστές εκπομπής (g/kg ξηρού καυσίμου) για τους κυριότερους ατμοσφαιρικούς ρύπους που εκπέμπονται από δασικές πυρκαγιές.

Αυτές οι παράμετροι είναι κρίσιμες για την ποσοτικοποίηση των εκπομπών και την ανάπτυξη στρατηγικών μετριασμού της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που προκαλείται από τις δασικές πυρκαγιές.

Πίνακας 3. Μέσοι συντελεστές εκπομπής (g.kg-1 καυσίμου που καίγεται, σε ξηρή βάση) των κύριων ρύπων καπνού, ανά τύπο βλάστησης (Fernandes et al., 2002)

Species	Eucalyptus [c, d, e]	Other resinous[b]	Oak, Chestnut, Cork Oak[b]	Acacia[c, d, e]	Other hardwoods[a]	Pinus pinaster[c, d, e]	Stone pine[b]
PM10	21	10	13	11	8.3	13	10
PM2.5	19	9	11	10	6.3	11	9
NOx	5	3	3	5	3.11	3	5
CO	170	100	128	232	102	204	91
SO_2	0.8	0.8	0.8	0.8	0.4	0.8	0.8
NH_3	0.6	0.6	0.6	0.6	2.17	0.6	0.6
CO_2	1408	1497	1393	1561	1585	1398	1487
CH_4	6	6	6	4.7	5.82	6	5

a Van Der Werf et al. (2017)
b Miranda (2004)
c Vicente et al. (2012)
d Vicente et al. (2017)
e Alves et al. (2011)

Η επιστημονική κοινότητα καταβάλλει σημαντικές προσπάθειες για την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων των δασικών πυρκαγιών, αξιοποιώντας προηγμένες μεθόδους τηλεπισκόπησης για τη βελτίωση της ακρίβειας στις εκτιμήσεις εκπομπών (**Monteiro et al., 2013; Ichoku & Ellison, 2014; Darmenov & da Silva, 2015; Chuvieco et al., 2016; Van Der Werf et al., 2017**).

Μια από τις πιο χρήσιμες μεθόδους είναι η ανάλυση της **στιγμιαίας ακτινοβολούμενης ισχύος πυρκαγιάς (Fire Radiative Power - FRP)**, η οποία αντιπροσωπεύει τον ρυθμό εκπομπής ακτινοβολούμενης ενέργειας από την πυρκαγιά και επιτρέπει την άμεση εκτίμηση της ποσότητας καύσιμου υλικού που καταναλώνεται. Η FRP χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου για την παρακολούθηση και την πρόγνωση της εξέλιξης των πυρκαγιών (**Sofiev et al., 2009; Kaiser et al., 2012; Nguyen et al., 2023**).

Αυτές οι τεχνικές συμβάλλουν στην ανάπτυξη πιο αξιόπιστων μοντέλων πρόβλεψης και στην αποτελεσματικότερη διαχείριση των εκπομπών από δασικές πυρκαγιές, βελτιώνοντας τόσο την επιχειρησιακή απόκριση όσο και την κατανόηση των επιπτώσεών τους στο κλίμα και την ποιότητα του αέρα.

5.2. Διασπορά καπνού

Τα εκπεμπόμενα αέρια και σωματίδια υφίστανται διασπορά και χημικούς μετασχηματισμούς καθώς μεταφέρονται στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα οι επιπτώσεις τους να γίνονται αισθητές σε μεγάλες αποστάσεις από την πυρκαγιά. Αν και οι περισσότερες δασικές πυρκαγιές περιορίζονται σε μερικές εκατοντάδες εκτάρια, οι εκπομπές τους μπορούν να διαδοθούν χωρίς φυσικά ή πολιτικά όρια και να επηρεάσουν σημαντικά απομακρυσμένες περιοχές. Ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, τα πλούμια καπνού μπορεί να παραμείνουν στην ατμόσφαιρα για μεγάλα χρονικά διαστήματα, μεταβάλλοντας τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της.

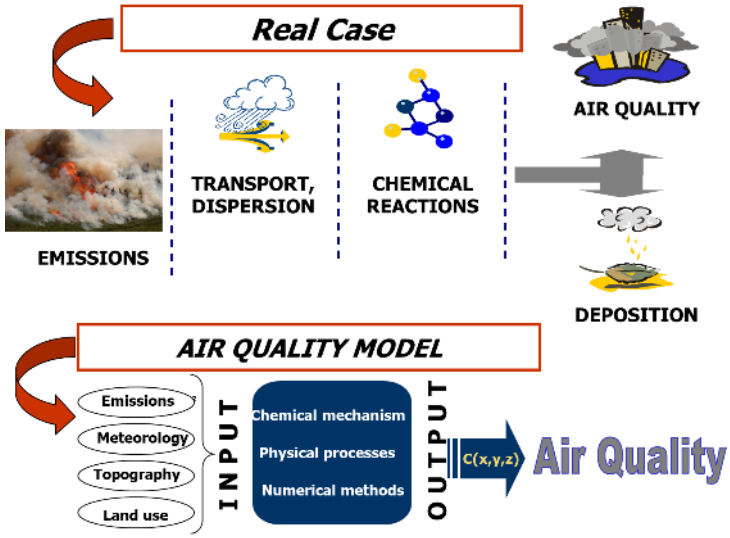
Η ποιότητα του αέρα μιας περιοχής, που συνήθως εκφράζεται μέσω των συγκεντρώσεων ρύπων, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως:

- **Τη μεταφορά (advection) και τη διασπορά** των ρύπων από τους ανέμους και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.
- **Τους χημικούς μετασχηματισμούς** που υφίστανται οι ρύποι στην ατμόσφαιρα, όπως φωτοχημικές αντιδράσεις που μπορεί να οδηγήσουν στη δευτερογενή παραγωγή ρύπων, όπως το όζον.
- **Τους μηχανισμούς απομάκρυνσης** των ρύπων, είτε μέσω **ξηρής εναπόθεσης** (πρόσκρουση και απόθεση σε επιφάνειες) είτε μέσω **υγρής εναπόθεσης** (απομάκρυνση από τη βροχόπτωση).

Η αξιολόγηση των επιπτώσεων των δασικών πυρκαγιών στην ποιότητα του αέρα μπορεί να βασιστεί είτε σε **μετρήσεις** είτε σε **αριθμητικά μοντέλα**. Παρόλο που έχουν διεξαχθεί ειδικές εκστρατείες παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα (π.χ. **Miranda et al., 2005; Valente et al., 2007; Miranda et al., 2010**), οι περισσότερες μετρήσεις προέρχονται από υφιστάμενα δίκτυα παρακολούθησης και όχι από στοχευμένες μελέτες που εστιάζουν αποκλειστικά στις επιπτώσεις των πυρκαγιών.

Η χρήση **αριθμητικών μοντέλων ποιότητας αέρα** για την ανάλυση της συμβολής των δασικών πυρκαγιών στην ατμοσφαιρική ρύπανση καθίσταται όλο και πιο διαδεδομένη (π.χ. **Rea et al., 2016; Turquety et al., 2020; Osswald et al., 2023**). Αυτά τα μοντέλα εκτιμούν τα πεδία συγκέντρωσης **C(x,y,z,t)** ενός ατμοσφαιρικού ρύπου, προσομοιώνοντας τις διαδικασίες μεταφοράς, χημικών αντιδράσεων και απομάκρυνσης από την ατμόσφαιρα.

Η **Εικόνα 7** παρουσιάζει ένα σχηματικό διάγραμμα ενός αριθμητικού μοντέλου ποιότητας αέρα, το οποίο προσομοιώνει τις αλληλεπιδράσεις των ρύπων με την ατμόσφαιρα, τις μεταβολές στη σύνθεσή της και τις επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα. Τέτοιου είδους προσεγγίσεις είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της διασποράς των εκπομπών και την ανάπτυξη στρατηγικών μετριασμού των επιπτώσεών τους.



Εικόνα 7 Σχήμα μιας προσέγγισης μοντελοποίησης ποιότητας του αέρα (Εικονογράφηση των συγγραφέων).

Αριθμητικά Μοντέλα Ποιότητας του Αέρα

Υπάρχουν διάφορα αριθμητικά μοντέλα ποιότητας του αέρα, τα οποία επιλέγονται ανάλογα με τη χωρική και χρονική κλίμακα της ανάλυσης, καθώς και την προσέγγιση ή τη μαθηματική διατύπωση που εφαρμόζεται.

Κατηγοριοποίηση βάσει χωρικής κλίμακας:

- **Παγκόσμια (ή πλανητικά) μοντέλα**, τα οποία καλύπτουν εκτεταμένες περιοχές και χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της μακροπρόθεσμης επίδρασης των πυρκαγιών στην ατμόσφαιρα.
- **Μοντέλα μακροκλίμακας**, που αφορούν την περιφερειακή διασπορά ρύπων και είναι χρήσιμα για την κατανόηση των επιπτώσεων των εκπομπών πυρκαγιών σε εθνικό ή υπερεθνικό επίπεδο.
- **Μοντέλα μεσοκλίμακας**, τα οποία εστιάζουν σε περιοχές με εύρος από δεκάδες έως εκατοντάδες χιλιόμετρα, επιτρέποντας την εκτίμηση των επιπτώσεων των πυρκαγιών στην ποιότητα του αέρα σε επίπεδο πόλης ή ευρύτερης περιοχής.
- **Μοντέλα τοπικής ή μικροκλίμακας**, που αναλύουν φαινόμενα διασποράς σε πολύ μικρές χωρικές κλίμακες, όπως σε επίπεδο γειτονιάς ή μεμονωμένων υποδομών.

Κατηγοριοποίηση βάσει χρονικής κλίμακας:

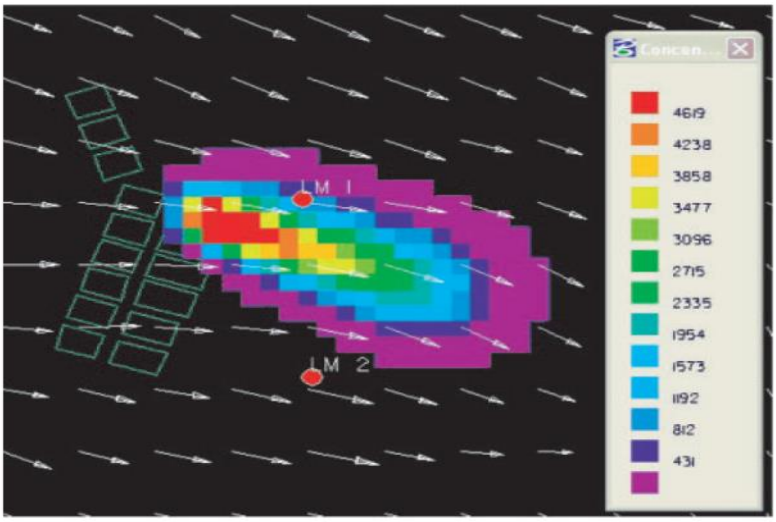
- **Βραχυπρόθεσμα μοντέλα**, τα οποία χρησιμοποιούνται για άμεσες επιχειρησιακές εφαρμογές, όπως η πρόγνωση της διασποράς του καπνού από μια πυρκαγιά σε πραγματικό χρόνο.
- **Μακροπρόθεσμα μοντέλα**, τα οποία εστιάζουν στις σωρευτικές επιπτώσεις των πυρκαγιών και άλλων πηγών ρύπανσης στην ατμοσφαιρική ποιότητα και τις κλιματικές αλλαγές.
- Η χωρική και η χρονική κλίμακα των μοντέλων είναι αλληλένδετες· για παράδειγμα, ένα μοντέλο τοπικής κλίμακας είναι συνήθως βραχυπρόθεσμο, καθώς επικεντρώνεται σε άμεσες επιπτώσεις σε μικρότερες γεωγραφικές περιοχές.

Παράδειγμα Μοντέλου Τοπικής Κλίμακας: DISPERFIRE

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αριθμητικού μοντέλου τοπικής διασποράς είναι το **DISPERFIRE** (**Miranda et al., 1994; Valente et al., 2007**), το οποίο χρησιμοποιεί προσέγγιση **Lagrange** για τη μοντελοποίηση της διασποράς ρύπων από δασικές πυρκαγιές. Το μοντέλο έχει εφαρμοστεί και επικυρωθεί με πραγματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν σε πειραματικές πυρκαγιές πεδίου, επιτρέποντας αξιόπιστες εκτιμήσεις της διασποράς των εκπομπών.

Η **Εικόνα 8** παρουσιάζει το πεδίο συγκέντρωσης PM10, όπως εκτιμήθηκε από το μοντέλο DISPERFIRE για την περίπτωση μιας πειραματικής καύσης. Το συγκεκριμένο μοντέλο αποδεικνύει τη σημασία των αριθμητικών προσομοιώσεων στη μελέτη των επιπτώσεων των δασικών πυρκαγιών στην ποιότητα του αέρα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη μέτρων μετριασμού των επιπτώσεων αυτών σε τοπικό επίπεδο.

Οι προσομοιωμένες τιμές του **DISPERFIRE** συγκρίθηκαν με μετρήσεις που ελήφθησαν από εξειδικευμένο εξοπλισμό σε ένα κινητό εργαστηριακό όχημα (**LM1**, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 8**). Το εύρος των εκτιμώμενων συγκεντρώσεων σωματιδίων **PM10** (431-812 μg/m³) παρουσίασε ικανοποιητική συμφωνία με την παρατηρούμενη τιμή για την ίδια χρονική περίοδο, η οποία ανήλθε στα **486 μg/m³**.



Εικόνα 8. Πεδίο συγκέντρωσης (μg.m-3) PM10 που προσομοιώθηκε από ένα τοπικό μοντέλο διασποράς (Valente et al., 2007).

Η κατανόηση της παραγωγής και διασποράς του καπνού από δασικές πυρκαγιές αποτελεί κρίσιμο ζήτημα, ιδιαίτερα για την προστασία της ανθρώπινης υγείας, τόσο των πυροσβεστών όσο και των εκτεθειμένων πληθυσμών. Οι επιπτώσεις του καπνού περιλαμβάνουν τόσο άμεσες συνέπειες, όπως αναπνευστικά προβλήματα, όσο και μακροπρόθεσμες επιδράσεις στην ποιότητα του αέρα και το κλίμα.

Σήμερα, η επιστημονική κοινότητα διαθέτει **αξιόπιστα δεδομένα, προχωρημένες μεθόδους τηλεπισκόπησης και εξειδικευμένα αριθμητικά μοντέλα** που επιτρέπουν την ακριβέστερη πρόγνωση και ανάλυση της συμπεριφοράς του καπνού. Αυτά τα εργαλεία είναι απαραίτητα τόσο για την εκπαίδευση των ενδιαφερόμενων φορέων όσο και για τη βελτίωση των στρατηγικών διαχείρισης πυρκαγιών και προστασίας της δημόσιας υγείας.

6. Μεθοδολογίες πυρόσβεσης

Οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν μέσω της έρευνας και των συνεντεύξεων αποτέλεσαν τη βάση για την ανάλυση των μεθοδολογιών πυρόσβεσης που ακολουθούνται σε διαφορετικές χώρες και επιχειρησιακά περιβάλλοντα. Οι ερωτηθέντες και οι ειδικοί ανέδειξαν τις κύριες προκλήσεις και στρατηγικές για την καταπολέμηση των δασικών πυρκαγιών, με έμφαση στους ακόλουθους τρεις βασικούς τομείς:

- **Αρχική επίθεση**: Καθοριστικής σημασίας για τον έλεγχο των αναφλέξεων στο αρχικό τους στάδιο και την αποφυγή της μετάβασής τους σε μεγάλες πυρκαγιές.
- **Καταπολέμηση ακραίων πυρκαγιών**: Αντιμετώπιση πυρκαγιών με έντονες συναγωγικές και δυναμικές συμπεριφορές που καθιστούν δύσκολη την καταστολή.
- **Διαχείριση πυρκαγιών στη Ζώνη Μίξης Δασών-Οικισμών (ΖΜΔΟ)**: Προστασία υποδομών και ανθρώπινων ζωών, με ιδιαίτερη έμφαση στη διαχείριση καύσιμης ύλης και στις στρατηγικές εκκένωσης.

Η έρευνα, που διεξήχθη από τον οργανισμό **SAFE**, συγκέντρωσε δεδομένα από 27 έμπειρους πυροσβέστες από **δέκα χώρες**: Ισπανία, Πορτογαλία, Ιταλία, Κροατία, Γαλλία, Ελλάδα, Ιρλανδία, Ρωσία, Γερμανία και Νότια Αφρική. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν συνεντεύξεις με **τέσσερις εμπειρογνώμονες**, εκπροσώπους κρίσιμων οργανισμών πυρόσβεσης:

- **Εθνική Αρχή Έκτακτης Ανάγκης και Πολιτικής Προστασίας της Πορτογαλίας** (δύο ειδικοί)
- **Πυροσβεστική και Διάσωση του Τμήματος Bouches du Rhone, Γαλλία**
- **Υπηρεσία Δασικών Πυρκαγιών της Καστίλης-Λα Μάντσα, Ισπανία**

Οι απαντήσεις και οι αναλύσεις που προέκυψαν από αυτή την έρευνα παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για τη βελτιστοποίηση των τακτικών πυρόσβεσης, την προσαρμογή στρατηγικών στις σύγχρονες προκλήσεις και τη διαμόρφωση βέλτιστων πρακτικών στην καταπολέμηση δασικών πυρκαγιών.

6.1. Στρατηγικές και τεχνικές καταστολής πυρκαγιάς

Σύμφωνα με την έρευνα, **το 89% των πυροσβεστών ανέφερε ότι οι στρατηγικές και οι τεχνικές που εφαρμόζουν έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές στην καταπολέμηση των πυρκαγιών** κατά τη φάση της αρχικής απόκρισης ή αρχικής επίθεσης.

Οι χρησιμοποιούμενες **τεχνικές και στρατηγικές** συνοψίζονται στην **Εικόνα 9**, με την **εναέρια στρατηγική να αποτελεί την πιο συχνά αναφερόμενη προσέγγιση** στις έρευνες. Αυτό υποδηλώνει ότι οι περισσότερες **ευρωπαϊκές χώρες βασίζονται σε εναέριους πόρους** ως κύριο εργαλείο για τη διαχείριση δασικών πυρκαγιών.

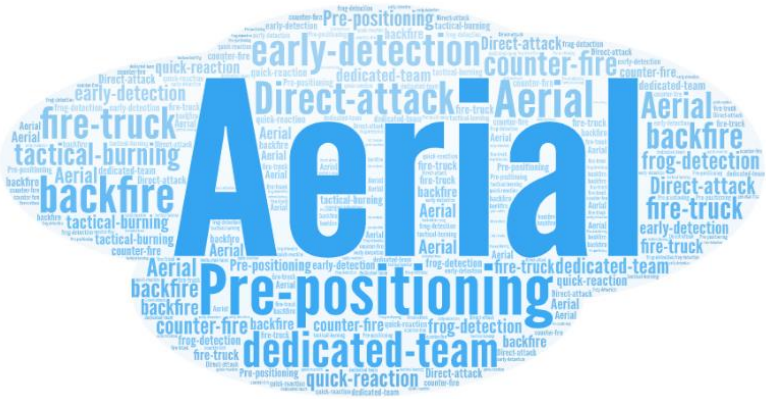
Η κυριαρχία των **εναέριων μέσων** στη στρατηγική καταστολής περιλαμβάνει:

- **Αεροπλάνα και ελικόπτερα πυρόσβεσης**, που χρησιμοποιούνται για την ταχεία κατάσβεση και τον περιορισμό της εξάπλωσης της φωτιάς.
- **Αεροπορικές αναγνωρίσεις**, οι οποίες συμβάλλουν στην εκτίμηση της εξέλιξης της πυρκαγιάς και στην καθοδήγηση των επίγειων δυνάμεων.
- **Συνδυασμό εναέριων και επίγειων επιχειρήσεων**, για μέγιστη αποτελεσματικότητα στην καταστολή της φωτιάς.

Ωστόσο, παρόλο που οι **εναέριες επιχειρήσεις διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο**, η αποτελεσματική καταπολέμηση των δασικών πυρκαγιών απαιτεί **ολιστική προσέγγιση**, η οποία συνδυάζει:

- **Δημιουργία αντιπυρικών ζωνών** με μηχανικά μέσα ή αντιπύρ.
- **Χρήση φυσικών και τεχνητών εμποδίων** για τον περιορισμό της εξάπλωσης.
- **Εφαρμογή τακτικών άμεσης και έμμεσης καταστολής**, όπως η χρήση νερού και επιβραδυντικών ουσιών.
- **Διαχείριση καύσιμης ύλης**, για τη μείωση του κινδύνου ανεξέλεγκτης πυρκαγιάς.

Η **ευρεία χρήση των εναέριων μέσων** στην Ευρώπη αναδεικνύει τη σημασία τους στη στρατηγική πυρόσβεσης, αν και οι επίγειες επιχειρήσεις και η προληπτική διαχείριση των καυσίμων παραμένουν καθοριστικές για την αποτελεσματικότητα της καταστολής.



Εικόνα 9. Συλλογή λέξεων σχετικών με τη στρατηγική και τις τεχνικές καταστολής πυρκαγιών που χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη (εικονογράφηση των συγγραφέων)

Αυτό το κεφάλαιο αποσκοπεί στη **σαφή διάκριση μεταξύ στρατηγικής και τεχνικής καταστολής πυρκαγιάς**.

Η στρατηγική καταστολής πυρκαγιάς αφορά μια **ευρύτερη προσέγγιση ή σχέδιο δράσης** που αναπτύσσεται για την καταπολέμηση και τον έλεγχο των πυρκαγιών. Περιλαμβάνει τον **σχεδιασμό, την οργάνωση των πόρων και τη λήψη αποφάσεων** για την επιλογή του βέλτιστου τρόπου διαχείρισης μιας πυρκαγιάς, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η τοπογραφία, οι καιρικές συνθήκες, η βλάστηση και η επικινδυνότητα της περιοχής.

Η τεχνική καταστολής πυρκαγιάς, αντίθετα, αναφέρεται στις **συγκεκριμένες μεθόδους και τακτικές** που εφαρμόζονται για την κατάσβεση ή τον έλεγχο της φωτιάς. Αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν **την άμεση ή έμμεση καταστολή, τη χρήση μηχανικών μέσων, τις εναέριες ρίψεις νερού ή επιβραδυντικών, τις αντιπυρικές ζώνες και την εφαρμογή αντιπυρός**.

Η διαφοροποίηση αυτών των δύο εννοιών είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική διαχείριση των δασικών πυρκαγιών, καθώς μια επιτυχημένη στρατηγική απαιτεί τον κατάλληλο συνδυασμό τεχνικών καταστολής, προσαρμοσμένων στις εκάστοτε συνθήκες.

6.1.1 Στρατηγική καταστολής πυρκαγιάς

a. Εναέρια Στρατηγική

- Οι **εναέριες στρατηγικές** στην καταστολή πυρκαγιών βασίζονται στη χρήση αεροσκαφών για τον **εντοπισμό, την αντιμετώπιση και τον έλεγχο δασικών πυρκαγιών**. Αυτές οι στρατηγικές αξιοποιούν τα επιχειρησιακά πλεονεκτήματα των αεροσκαφών, συμπεριλαμβανομένης της **εφαρμογής διαφόρων τεχνικών καταστολής** από αέρος, της **αναγνώρισης περιοχών υψηλού κινδύνου**, καθώς και της **υποστήριξης των επιχειρήσεων πυρόσβεσης εδάφους**.
- Οι εναέριες επιχειρήσεις περιλαμβάνουν:
- **Άμεση ρίψη νερού ή επιβραδυντικών ουσιών** στο μέτωπο της πυρκαγιάς.
- **Έμμεση καταστολή**, όπως η δημιουργία ζωνών επιβράδυνσης για τον περιορισμό της εξάπλωσης της φωτιάς.
- **Αναγνωριστικές πτήσεις** για την αξιολόγηση της εξέλιξης της πυρκαγιάς και την καθοδήγηση των επίγειων δυνάμεων.

b. Στρατηγική Προτοποθέτησης

Η **στρατηγική προτοποθέτησης** στη διαχείριση δασικών πυρκαγιών αφορά την **εκ των προτέρων τοποθέτηση πόρων και προσωπικού** σε περιοχές **υψηλού κινδύνου**, με σκοπό τη **βελτίωση της επιχειρησιακής ανταπόκρισης και την ταχύτερη καταστολή των πυρκαγιών**.

Η προτοποθέτηση:

- **Ελαχιστοποιεί τον χρόνο απόκρισης**, επιτρέποντας στις δυνάμεις να επεμβαίνουν αμέσως μετά την εκδήλωση μιας πυρκαγιάς.
- **Ενισχύει την αποτελεσματικότητα των επιχειρήσεων καταστολής**, περιορίζοντας τις πιθανότητες ανεξέλεγκτης εξάπλωσης.
- **Είναι προσαρμοσμένη στις εκάστοτε καιρικές συνθήκες και στις περιβαλλοντικές ιδιαιτερότητες** της περιοχής.
- Αυτή η στρατηγική εφαρμόζεται σε διάφορες χώρες, όπως η **Γαλλία**, όπου **οι πυροσβεστικές αρχές προτοποθετούν επίγειες δυνάμεις σε κομβικά σημεία με άμεση πρόσβαση στα δάση και τις κύριες οδούς**.

📌*Εμπειρία από τη Γαλλία:"Χρησιμοποιούμε προτοποθέτηση επίγειων δυνάμεων σε ειδικά σημεία που βρίσκονται κοντά στους κύριους δρόμους και κοντά στην πρόσβαση στο δάσος. Εάν έχουμε ανίχνευση πυρκαγιάς κάπου, απλά στέλνουμε πολλούς ανθρώπους και οχήματα." Πηγή:* Πυροσβεστική Υπηρεσία Bouches du Rhone (Γαλλία)

c. Χρήση ομάδων ελικοπτέρων/ στρατηγική ειδικών ομάδων

Η **στρατηγική χρήσης ομάδων ελικοπτέρων** αφορά την ταχεία μεταφορά **ειδικευμένων ομάδων πυρόσβεσης** σε απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες περιοχές μέσω **ελικοπτέρων**.

<u>Τι είναι οι Ομάδες Ελικοπτέρων;</u>

Πρόκειται για **άριστα εκπαιδευμένες μονάδες δασοπυρόσβεσης** που εξειδικεύονται στις **ταχείες επεμβάσεις** σε περιοχές όπου η πρόσβαση επίγειων δυνάμεων είναι δύσκολη ή αδύνατη. Οι ομάδες αυτές διαθέτουν **εξειδίκευση και εμπειρία** σε προηγμένες **τεχνικές κατάσβεσης πυρκαγιών**, όπως:

- **Καταρρίχηση (helirappelling) ή αερομεταφορά με ελικόπτερο**, για ταχεία ανάπτυξη σε κρίσιμες τοποθεσίες.
- **Δημιουργία αντιπυρικών ζωνών**, προκειμένου να περιορίσουν ή να ανακατευθύνουν την εξάπλωση της φωτιάς.
- **Χρήση εργαλείων χειρός** (Pulaski, McLeod, τσεκούρια, πριόνια κ.λπ.) για την εκκαθάριση της καύσιμης ύλης και τον έλεγχο των φλογών.
- **Συντονισμός με εναέριους και επίγειους πόρους** για βελτίωση της αποτελεσματικότητας της καταστολής.

Ρόλος και Σημασία της Στρατηγικής

Οι **ομάδες ελικοπτέρων** είναι συχνά **οι πρώτοι ανταποκριτές** σε δασικές πυρκαγιές που εκδηλώνονται σε **δυσπρόσιτες περιοχές**, όπως **ορεινά εδάφη, δάση μεγάλης κάλυψης, φαράγγια ή νησιωτικές τοποθεσίες**. Ο ρόλος τους είναι **κρίσιμος**, καθώς επιτρέπουν την **άμεση επέμβαση και περιορισμό της πυρκαγιάς πριν αυτή εξαπλωθεί** ανεξέλεγκτα.

Συντονισμός με άλλες μονάδες

Οι **ειδικευμένες ομάδες ελικοπτέρων** λειτουργούν **σε αγαστή συνεργασία** με:

- **Εναέρια μέσα** (ελικόπτερα και αεροσκάφη πυρόσβεσης)
- **Επίγειες δυνάμεις πυρόσβεσης**
- **Ομάδες στρατηγικού σχεδιασμού και επιχειρήσεων**

📌 *Η στρατηγική χρήσης ομάδων ελικοπτέρων ενισχύει την επιχειρησιακή ετοιμότητα, αυξάνει την αποτελεσματικότητα της καταστολής και προστατεύει κρίσιμους φυσικούς πόρους και υποδομές.*

6.1.2. Τεχνική καταστολής πυρκαγιάς

a. Άμεση κατάσβεση

Η **άμεση κατάσβεση** είναι μια μέθοδος πυρόσβεσης που εφαρμόζεται **κοντά στη γραμμή της φωτιάς**, όπου το προσωπικό επιχειρεί επιθετικά για την άμεση καταστολή της πυρκαγιάς.

Χαρακτηριστικά της Άμεσης Επίθεσης

Περιλαμβάνει **άμεση εφαρμογή νερού**, χρήση **εργαλείων χειρός** ή **συνδυασμό και των δύο**. Στόχος είναι η **ταχεία απόκτηση ελέγχου**, αποτρέποντας την περαιτέρω εξάπλωση της πυρκαγιάς. Ιδανική μέθοδος για **πυρκαγιές χαμηλής ή μέτριας έντασης**, όπου οι συνθήκες επιτρέπουν την ασφαλή προσέγγιση των πυροσβεστών στη φωτιά.

Μέθοδοι Άμεσης κατάσβεσης

- **Άμεση Κατάσβεση στο Μέτωπο**
  - Οι προσπάθειες πυρόσβεσης **εστιάζονται απευθείας στο μέτωπο** της φωτιάς, το πιο ενεργό και επικίνδυνο σημείο της πυρκαγιάς.
  - Χρησιμοποιείται **νερό, επιβραδυντικά πυρόσβεσης** ή **φυσική απομάκρυνση καύσιμης ύλης**.
  - Είναι η πιο **επικίνδυνη προσέγγιση**, καθώς το μέτωπο είναι δυναμικό και μπορεί να αλλάξει κατεύθυνση ή να ενταθεί γρήγορα.

- **Άμεση κατάσβεση από την Ουρά**

  - Περιλαμβάνει επίθεση στην πυρκαγιά από το πίσω μέρος και σταδιακή πρόοδο κατά μήκος των πλευρών προς το μέτωπο.
  - Είναι πιο ασφαλής μέθοδος, καθώς η θερμότητα και η ένταση της φωτιάς είναι χαμηλότερες στην ουρά.
  - Επιτρέπει σταδιακή πρόοδο και δημιουργία αντιπυρικών ζωνών πριν φτάσουν οι φλόγες.

- **Άμεση Πλευρική κατάσβεση**

  - Περιλαμβάνει επίθεση στις πλευρές της πυρκαγιάς, όπου η ένταση της φωτιάς είναι χαμηλότερη από το μέτωπο.
  - Οι πυροσβέστες προχωρούν παράλληλα με την εξάπλωση της πυρκαγιάς, επιχειρώντας να περιορίσουν τις φλόγες πριν αυτές φτάσουν σε κρίσιμα σημεία.
  - Συνδυάζει ταχύτητα και έλεγχο, καθιστώντας την πιο αποτελεσματική προσέγγιση στις περισσότερες περιπτώσεις.

Η άμεση επίθεση είναι μια τακτική που απαιτεί καλή εκπαίδευση, φυσική αντοχή και σωστή εκτίμηση των συνθηκών για τη διατήρηση της ασφάλειας των πυροσβεστών.

b. Έμμεση καταστολή

Η **έμμεση επίθεση** είναι μια προσέγγιση πυρόσβεσης όπου οι τακτικές καταστολής εφαρμόζονται **μακριά από το καιόμενο άκρο της πυρκαγιάς**. Αντί να επιχειρείται άμεση επέμβαση στις φλόγες, αυτή η μέθοδος στοχεύει στον **έλεγχο και περιορισμό της πυρκαγιάς** μέσω **γραμμών ελέγχου ή της προληπτικής χρήσης φωτιάς ως εργαλείου καταστολής**.

Μέθοδοι Έμμεσης καταστολής

- **Χρήση Γραμμών Ελέγχου**

  Οι **γραμμές ελέγχου** είναι φυσικά ή κατασκευασμένα εμπόδια που χρησιμοποιούνται για την επιβράδυνση ή την αναχαίτιση της εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Μπορούν να κατασκευαστούν με διάφορους τρόπους:

  - **Χειροκίνητα** (με εργαλεία όπως φτυάρια, αξίνες και αλυσοπρίονα).
  - **Μηχανικά** (με τη χρήση μηχανημάτων όπως μπουλντόζες ή τρακτέρ με σάρωθρα).
  - **Με νερό ή επιβραδυντικά** (δημιουργώντας υγρές γραμμές που μειώνουν τη δυνατότητα ανάφλεξης).

Οι γραμμές ελέγχου πρέπει να **διατηρούνται και να ενισχύονται διαρκώς** ώστε να παραμείνουν αποτελεσματικές κατά την εξέλιξη της πυρκαγιάς.

- **Παράλληλη Επίθεση**

  Η **παράλληλη επίθεση** είναι μια μέθοδος έμμεσης καταστολής, όπου οι **γραμμές ελέγχου δημιουργούνται κατά μήκος των πλευρών της πυρκαγιάς**, οδηγώντας προς και γύρω από το μέτωπο της φωτιάς. Αυτή η προσέγγιση **αποφεύγει την επικίνδυνη άμεση αντιπαράθεση με τις φλόγες**. Είναι πιο αποτελεσματική όταν **υπάρχει κατάλληλος εξοπλισμός**, όπως **μηχανήματα διάνοιξης αντιπυρικών ζωνών**.

- **Προδιαγεγραμμένη Καύση / Αντιπύρ**

Η **ελεγχόμενη καύση** είναι μια τακτική που χρησιμοποιεί **τη φωτιά ως εργαλείο καταστολής**, δημιουργώντας περιοχές χωρίς καύσιμο υλικό που λειτουργούν ως εμπόδιο στην πυρκαγιά. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι:

- **Αμυντική Καύση (ελεγχόμενη καύση)**

Περιλαμβάνει το **άναμμα μιας ελεγχόμενης φωτιάς** μπροστά από μια προελαύνουσα πυρκαγιά. Το **καύσιμο υλικό καίγεται εκ των προτέρων**, στερώντας από τη φωτιά τη δυνατότητα εξάπλωσης. Η **κατάσβεση της ελεγχόμενης φωτιάς ολοκληρώνεται πριν φτάσει η κύρια πυρκαγιά**. Αυτή η τεχνική απαιτεί **προσεκτικό σχεδιασμό** και εφαρμόζεται **σε κάποια απόσταση από το μέτωπο της φωτιάς**.

- **Επιθετική Καύση (αντίπυρ)**

Σε αυτή την τεχνική, **ανάβεται μια ελεγχόμενη φωτιά που κατευθύνεται προς το μέτωπο της πυρκαγιάς**. Ο συνδυασμός **της καύσης του διαθέσιμου καυσίμου** και της **δημιουργίας θερμικής ροής που εμποδίζει την προέλαση της πυρκαγιάς** ενισχύει την καταστολή. Αυτή η μέθοδος **απαιτεί εξαιρετικά προσεκτική εκτίμηση των συνθηκών και εκπαιδευμένους χειριστές**, καθώς υπάρχει κίνδυνος ανεξέλεγκτης εξάπλωσης αν οι συνθήκες δεν είναι ευνοϊκές.

Η έμμεση επίθεση είναι μια στρατηγική που χρησιμοποιείται κυρίως για μεγάλες, έντονες ή δυσπρόσιτες πυρκαγιές, επιτρέποντας πιο ελεγχόμενες και αποτελεσματικές επιχειρήσεις πυρόσβεσης.

c. Εναέρια καταστολή (αεροπυρόσβεση)

Τα αεροσκάφη διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην καταστολή δασικών πυρκαγιών, καθώς μπορούν να αναπτυχθούν τόσο για **άμεσες** όσο και για **έμμεσες** τακτικές καταστολής.

1. Άμεση Εναέρια καταστολή

Η **άμεση αεροπυρόσβεση** περιλαμβάνει τη χρήση αεροσκαφών για την **κατάσβεση της ενεργής πυρκαγιάς** με τη ρίψη νερού ή επιβραδυντικών πυρκαγιάς απευθείας στην καιόμενη περιοχή.

- Χρησιμοποιείται κυρίως όταν η πυρκαγιά **δεν έχει αναπτύξει ακραία συμπεριφορά** και υπάρχει **άμεση δυνατότητα ελέγχου**.
- Απαιτεί **συντονισμό** με τις επίγειες δυνάμεις, ώστε να υπάρξει **ταχεία παρέμβαση και διατήρηση του ελέγχου της φωτιάς**.
- Οι αερορίψεις είναι πιο αποτελεσματικές όταν **συνοδεύονται από επίγεια πυρόσβεση**, ώστε να διατηρηθεί η καταστολή του μετώπου και να αποτραπεί η αναζωπύρωση.

2. Έμμεση Εναέρια καταστολή

Η **έμμεση αεροπυρόσβεση** περιλαμβάνει **προληπτικές ρίψεις** νερού ή επιβραδυντικών πυρκαγιάς μπροστά από το μέτωπο της φωτιάς. Στόχος είναι η **δημιουργία γραμμών ελέγχου** ή η **ενίσχυση ήδη υπαρχουσων αντιπυρικών ζωνών**, ώστε να **περιοριστεί η εξάπλωση της πυρκαγιάς**.

Χρησιμοποιείται κυρίως σε **μεγάλες και ανεξέλεγκτες πυρκαγιές** όπου η άμεση καταστολή είναι αδύνατη λόγω της έντασης της φωτιάς. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε **δύσβατες περιοχές** όπου οι επίγειες δυνάμεις δεν μπορούν να φτάσουν γρήγορα. Η εναέρια καταστολή από μόνη της δεν μπορεί να εξαλείψει πλήρως μια πυρκαγιά, αλλά αποτελεί ένα κρίσιμο εργαλείο

υποστήριξης που μεγιστοποιεί την αποτελεσματικότητα των επίγειων επιχειρήσεων πυρόσβεσης.

6.2. Καταπολέμηση Πυρκαγιών στη Ζώνη Μίξης Δασών-Οικισμών

Όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4, οι πυρκαγιές στη **Ζώνη Μίξης Δασών-Οικισμών (ΖΜΔΟ)** είναι ένας ιδιαίτερα **πολύπλοκος** τύπος πυρκαγιάς, καθώς εμφανίζονται στη διεπαφή **φυσικού και δομημένου περιβάλλοντος**, όπου οι **δασικές εκτάσεις συναντούν ανθρώπινες κοινότητες**.

Ιδιαιτερότητες των Πυρκαγιών στη ΖΜΔΟ

- Συνδυάζουν **δασικά καύσιμα** με **ανθρωπογενή υλικά** (κτίρια, οχήματα, αγροτικές εγκαταστάσεις), δημιουργώντας **πολυδιάστατες προκλήσεις** στην καταστολή.
- Παρουσιάζουν **ακραία συμπεριφορά** λόγω της ύπαρξης εύφλεκτων υλικών που ενισχύουν τη θερμική φόρτιση και την ένταση της φωτιάς.
- Απειλούν **ανθρώπινες ζωές**, καθιστώντας τη διαχείρισή τους προτεραιότητα για τις επιχειρήσεις διάσωσης και εκκένωσης.
- Οι **εγγύτητα των κατοικιών στη βλάστηση** επιδεινώνει τον κίνδυνο και **περιορίζει τις επιλογές** καταστολής.

Δυσκολίες Αντιμετώπισης

Οι πυρκαγιές στη ΖΜΔΟ **εξαπλώνονται ταχύτατα**, ενώ η ύπαρξη **πολλών κατοικιών** καθιστά ανέφικτη την άμεση προστασία όλων των κτιρίων από τις δυνάμεις πυρόσβεσης. Όπως δήλωσε χαρακτηριστικά ένας Γάλλος πυροσβέστης σε συνάντηση του FirEUrisk:

"Στην περιοχή μας, η δυσκολία είναι ότι έχουμε πολλά σπίτια σε διαφορετικές περιοχές και δεν μπορούμε να υπερασπιστούμε κάθε σπίτι. Δεν μπορούμε να βάλουμε ένα όχημα μπροστά από κάθε σπίτι επειδή είναι πάρα πολλά σπίτια, οπότε είναι δύσκολο αν το δάσος είναι πολύ κοντά στο σπίτι."

Το κύριο σημείο της καταπολέμησης πυρκαγιών στη ΖΜΔΟ είναι η αναχαίτισή τους πριν φτάσουν στις κατοικίες, ουσιαστικά στο εξωτερικό όριο των αυλών ή στο σημείο όπου ξεκινούν τα δασικά καύσιμα (Ganteaume et al., 2021).

Βασικές Αρχές Καταπολέμησης Πυρκαγιών στη ζώνη μείξης Δασών-Οικισμών

- **Αναχαίτιση της πυρκαγιάς πριν φτάσει στις κατοικίες.**
  - Προτεραιότητα δίνεται στη **διατήρηση ανοιχτών ζωνών** μεταξύ των δασικών καυσίμων και των κτιρίων.
- **Στρατηγική τοποθέτηση πυροσβεστικών δυνάμεων.**
  - Τα πυροσβεστικά οχήματα δεν μπορούν να προστατεύσουν κάθε μεμονωμένο σπίτι, επομένως απαιτείται **τακτικός σχεδιασμός** και διαχείριση πόρων.
- **Δημιουργία ζωνών άμυνας.**
  - Οι επιχειρήσεις πυρόσβεσης εστιάζουν στην **περίμετρο των οικισμών**, κόβοντας τη φωτιά προτού εισέλθει στον αστικό ιστό.
- **Ανάλυση της κατεύθυνσης και της έντασης της φωτιάς.**
  - Η χρήση **ελεγχόμενων καύσεων** και **αντιπυρός** μπορεί να είναι αποτελεσματική, εφόσον το επιτρέπουν οι συνθήκες.

Η πρόληψη μέσω σωστού σχεδιασμού των κατοικιών και της διαχείρισης της βλάστησης γύρω από τις οικιστικές περιοχές είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση του κινδύνου καταστροφής από πυρκαγιές στη ΖΜΔΟ.

6.2.1. Καταστολή πυρκαγιάς στη ΖΜΔΟ

Ο Πίνακας 4 περιγράφει πώς οι τεχνικές καταστολής πυρκαγιάς που αναλύθηκαν προηγουμένως μπορούν να εφαρμοστούν στην αντιμετώπιση πυρκαγιών στη Ζώνη Μίξης Δασών-Οικισμών (ΖΜΔΟ). Η αποτελεσματική διαχείριση των πυρκαγιών σε αυτές τις περιοχές απαιτεί μια στοχευμένη προσέγγιση, προσαρμοσμένη στη σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ φυσικών και ανθρωπογενών καυσίμων.

Ο στόχος είναι να περιοριστεί η πυρκαγιά πριν προσεγγίσει τις κατοικίες, είτε μέσω άμεσης πυρόσβεσης στο εξωτερικό άκρο της αυλής είτε με τη δημιουργία ζωνών άμυνας όπου αρχίζουν τα δασικά καύσιμα (Ganteaume et al., 2021).

Πίνακας 4: Δυνατότητες και περιορισμοί των τεχνικών καταστολής πυρκαγιάς στη διεπαφή WUI

Α/Α	Τεχνική	Δράση
1	Κατάσβεση από αέρος	Στη ζώνη μείξης Δασών-Οικισμών, η χρήση επιβραδυντικών και νερού περιορίζεται λόγω ανησυχιών ασφαλείας για προσωπικό, πολίτες, περιουσίες και γραμμές ηλεκτροδότησης. Οι επιχειρήσεις κατάσβεσης γίνονται περιφερειακά ή εκτός της οικιστικής ζώνης, δημιουργώντας αντιπυρική ζώνη πριν η πυρκαγιά φτάσει σε κατοικημένες περιοχές. Αυτή η προσέγγιση ελαχιστοποιεί κινδύνους και προστατεύει τη διεπαφή WUI.
2	Άμεση κατάσβεση	Για την προστασία των κατασκευών στη ζώνη μείξης, οι πυροσβέστες εφαρμόζουν τακτικές άμυνας κατασκευών, οι οποίες είναι ενεργητικές όταν οι διαθέσιμοι πόροι κατευθύνουν το μέτωπο της φωτιάς σε ένα επιθυμητό τελικό σημείο. Εάν οι πυροσβέστες μπορούν με ασφάλεια να επιτεθούν άμεσα στη φωτιά, μπορούν να παρέμβουν με χειροκίνητα εργαλεία για την απομάκρυνση καυσίμων και την κατάσβεση των φλογών, χρησιμοποιώντας δίκτυ πυρόσβεσης με νερό για τη μείωση των φλογών και άλλα πυροσβεστικά μέσα. Η άμεση επίθεση μπορεί να είναι επικίνδυνη λόγω της δυναμικής των πυρκαγιών στη μεικτή ζώνη. Επιπλέον, η άμεση επέμβαση πρέπει να πραγματοποιείται χωρίς καθυστέρηση μόλις οι πυροσβέστες εντοπίσουν ενεργές εστίες.
3	Έμμεση κατάσβεση	Η δημιουργία αντιπυρικής ζώνης και η χρήση αντίπυρος κατά μήκος του δρόμου μπροστά από τη φωτιά μπορεί να αποτελέσει μια αποτελεσματική τακτική για την προστασία της ζώνης μείξης. Ωστόσο, πριν από την εφαρμογή αυτής της τακτικής, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να διασφαλιστεί ότι η αντίθετη καύση μπορεί να πραγματοποιηθεί με ασφάλεια και είναι εφικτή βάσει των επικρατουσών συνθηκών.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η χρήση βαρέος εξοπλισμού για πυρόσβεση ή άλλους σκοπούς δεν είναι εφικτή ή πρακτική. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, όπως περιορισμένος χώρος, δύσβατο έδαφος ή ανησυχίες για πιθανές ζημιές σε υποδομές και περιουσίες. Ως αποτέλεσμα, οι επιχειρησιακοί φορείς πυρόσβεσης χρειάζεται να χρησιμοποιούν εναλλακτικό εξοπλισμό κατάλληλο για τις ιδιαιτερότητες της **Ζώνης Μείξης Δασών-Οικισμών**. Τα εξειδικευμένα αυτά εργαλεία και οχήματα είναι σχεδιασμένα ώστε να

προσφέρουν ευελιξία, ευκινησία και αποτελεσματικότητα στην καταπολέμηση δασικών πυρκαγιών σε περιοχές **Ζώνης Μείξης Δασών-Οικισμών**. Παρακάτω αναφέρονται ορισμένοι κινητοί και τακτικοί εξοπλισμοί πυρόσβεσης που μπορούν να αξιοποιηθούν για την αντιμετώπιση πυρκαγιών στη **Ζώνη Μείξης Δασών-Οικισμών**:

- **Φορητές αντλίες**: Ελαφριές και εύκολα μεταφερόμενες αντλίες, σχεδιασμένες για επιχειρήσεις σε απομακρυσμένες περιοχές. Χρησιμοποιούνται για την άντληση νερού από κοντινές πηγές, όπως πισίνες, λίμνες, ταμιευτήρες ή φορητές δεξαμενές, παρέχοντας νερό στις ομάδες πυρόσβεσης.

- **Επινώτιοι πυροσβεστήρες**: Φορητές συσκευές που φοριούνται στην πλάτη, επιτρέποντας στους πυροσβέστες να κινούνται γρήγορα μέσα σε δύσβατο έδαφος, ενώ εφαρμόζουν νερό ή επιβραδυντικό πυρκαγιάς για την καταστολή φλογών. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι για περιοχές όπου μεγαλύτερος εξοπλισμός δεν έχει πρόσβαση.

- **Ελαφρά εξειδικευμένα οχήματα**: Οχήματα θάμνων ή εκτός δρόμου, πιθανώς εξοπλισμένα με εξοπλισμό πυρόσβεσης, σχεδιασμένα για πλοήγηση σε στενούς δρόμους, ανώμαλο έδαφος και περιοχές **Ζώνης Μείξης Δασών-Οικισμών**. Διαθέτουν μικρές δεξαμενές νερού, αντλίες, σωλήνες και άλλα εργαλεία πυρόσβεσης, επιτρέποντας ταχεία απόκριση και αποτελεσματική καταστολή των δασικών πυρκαγιών σε απαιτητικά περιβάλλοντα.

6.2.2. Προστασία πληθυσμού και κτιρίων

Αυτή η σημαντική ανησυχία διερευνάται πλήρως στο πλαίσιο άλλης εργασίας του έργου. Τα αποτελέσματα θα τεκμηριωθούν στο Παραδοτέο 2.8 "Κατευθυντήριες γραμμές για τη μείωση της ευπάθειας των κοινοτήτων σε ακραίες πυρκαγιές και πυρκαγιές στη ΖΜΔΟ.

Υπάρχουν 2 βασικές επιλογές:

- **Εκκένωση.** Είναι μερικές φορές η καλύτερη επιλογή, ειδικά σε περίπτωση ευάλωτων τύπων ΖΜΔΟ, π.χ. κάμπινγκ ή ελαφριές κατοικίες κατασκευασμένες από εύφλεκτα υλικά. Ωστόσο, πρέπει να σχεδιαστεί και να οργανωθεί αρκετά νωρίς πριν η πυρκαγιά πλησιάσει τη ΖΜΔΟ, καθώς μπορεί να χρειαστεί πολύς χρόνος. Ο αριθμός, η διαθεσιμότητα και η ασφάλεια των οδών διαφυγής είναι επίσης κρίσιμα να εξεταστούν πριν αποφασιστεί η εκκένωση.

- **Καταφύγιο επί τόπου.** Στις περισσότερες ευρωπαϊκές συνθήκες, τα κτίρια είναι κατασκευασμένα από μη εύφλεκτα υλικά που παρέχουν την καλύτερη προστασία, σε σύγκριση με την εκκένωση. Ωστόσο, μπορεί να απαιτείται προετοιμασία για να διασφαλιστεί ότι δεν υπάρχει ευπάθεια στο καταφύγιο, και οι άνθρωποι μπορούν να παραμείνουν μέσα χωρίς πανικό.

6.3. Καταπολέμηση Πυρκαγιών με Ακραία Συμπεριφορά

Όπως αναλύεται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3, η καταπολέμηση ακραίων δασικών πυρκαγιών είναι σαφώς πιο απαιτητική σε σύγκριση με την καταστολή τυπικών δασικών πυρκαγιών. Οι ακραίες πυρκαγιές χαρακτηρίζονται από έντονη θερμική ακτινοβολία, ταχύτατη εξάπλωση και απρόβλεπτη συμπεριφορά, αυξάνοντας σημαντικά τους κινδύνους για την ασφάλεια των πυροσβεστών και καθιστώντας ιδιαίτερα δύσκολη την πρόβλεψη της δυναμικής τους. Οι παραδοσιακές μέθοδοι καταστολής, που βασίζονται κυρίως στην άμεση επίθεση των φλογών, συχνά αποδεικνύονται αναποτελεσματικές λόγω των υψηλών θερμικών φορτίων και της ασταθούς συμπεριφοράς της πυρκαγιάς, καθιστώντας τον έλεγχο και τον περιορισμό της ιδιαίτερα δύσκολο.

Οι πυροσβέστες που συμμετείχαν στις συνεντεύξεις μας επισήμαναν ότι:

α) Ο συνδυασμός διαφορετικών τακτικών, συμπεριλαμβανομένης της ενσωμάτωσης βαρέων μηχανημάτων με τις επιχειρησιακές τεχνικές πυρόσβεσης, είναι ζωτικής σημασίας για την καταπολέμηση ακραίων πυρκαγιών.

β) Είναι αναγκαία η μετατόπιση της επιχειρησιακής νοοτροπίας από τις παραδοσιακές μεθόδους άμεσης επίθεσης προς τις τεχνικές έμμεσης προσέγγισης.

Στην έρευνά μας, διαπιστώθηκε ότι η πλειονότητα των ερωτηθέντων (89%) θεωρεί τις στρατηγικές που εφαρμόζονται στις αρχικές επιθέσεις αποτελεσματικές. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα αυτή δεν επεκτείνεται στις στρατηγικές καταπολέμησης ακραίων πυρκαγιών. Συγκεκριμένα, το 26% των ερωτηθέντων έκρινε τις υπάρχουσες στρατηγικές αναποτελεσματικές ή πολύ αναποτελεσματικές, ενώ μόλις το 30% τις αξιολόγησε ως αποτελεσματικές. Επιπλέον, το 40% παρέμεινε ουδέτερο όσον αφορά την αποτελεσματικότητα των στρατηγικών αυτών.

Αυτά τα ευρήματα αναδεικνύουν την επιτακτική ανάγκη για τη συγκέντρωση συστάσεων που βασίζονται σε επιστημονικά τεκμηριωμένες στρατηγικές, τις οποίες οι πυροσβέστες μπορούν να εφαρμόσουν για την αποτελεσματική διαχείριση και καταστολή ακραίων πυρκαγιών.

Αντλώντας δεδομένα από την έρευνα, τις συνεντεύξεις και τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, ο Πίνακας 5 συνοψίζει τις τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιμετώπιση των μορφών ακραίας συμπεριφοράς πυρκαγιάς που περιγράφηκαν προηγουμένως.

Πίνακας 5: Πλεονεκτήματα και περιορισμοί των διαφόρων τεχνικών απέναντι σε συμπεριφορές ακραίων πυρκαγιών

Κατηγορία πυρκαγιάς	**Άμεση επίθεση**	**Έμμεση επίθεση**	**Εναέρια επίθεση**	**Σχόλια**
Επιφανείας	Συνιστάται ιδιαίτερα να σταματά η εξάπλωση όσο το δυνατόν πιο σύντομα	Διεξαγωγή έμμεσης επίθεσης όταν η αρχική επίθεση αποτυγχάνει και η φωτιά ξεφεύγει.	Όταν η εναέρια ομάδα εντοπίσει τη φωτιά, συνιστάται άμεση επίθεση από ψηλά	Προτεραιότητα στην αρχική επίθεση
Επικόρυφη	Δεν συνιστάται, Άμεση επίθεση στην πρώτη γραμμή της φωτιάς είναι αδύνατη και επικίνδυνη	Συνιστάται η δημιουργία αντιπυρικών ζωνών και η αντίστροφη καύση	Συνιστάται άμεση και έμμεση εναέρια επίθεση	Εστίαση στον έλεγχο των πλευρών της φωτιάς αντί της άμεσης επίθεσης στο μέτωπο της φωτιάς

Εκρηκτική	Δεν συνιστάται	Συνιστάται ελεγχόμενη ή τακτική καύση	Οι εναέριες επιθέσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν, αλλά είναι δύσκολο να γίνουν σε τοποθεσίες όπως φαράγγια.	
Πυρκαγιές διασταυρώσεων	Συνιστάται πριν από τη διασταύρωση, με προσοχή	Δημιουργία αντιπυρικών ζωνών ή ελεγχόμενων γραμμών γύρω από την περιοχή της διασταύρωσης	Συνιστάται ιδιαίτερα να υποστηρίζονται οι επίγειες επιχειρήσεις και να προστατεύεται η διασταύρωση.	
Μεγάλες πυρκαγιές	Συνιστάται πριν η ένταση της φωτιάς αυξηθεί υπερβολικά, παραμονή σε ασφαλή ζώνη	Συνιστάται ελεγχόμενη καύση	Συνιστάται άμεση και έμμεση εναέρια επίθεση με χρήση νερού και επιβραδυντικών.	Μπορεί να απαιτηθεί προληπτική εκκένωση
Πύρινοι στρόβιλοι	Δεν συνιστάται	Δεν συνιστάται	Δεν συνιστάται	Απλώς περιμένετε και παρατηρήστε μέχρι να σταματήσει το φαινόμενο, διότι οι πυροστρόιλοι διαρκούν για μικρό χρονικό διάστημα.

Το επόμενο κεφάλαιο παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες που δικαιολογούν τις επιλογές που αναφέρονται στον Πίνακα 5

7. Ασφάλεια στο μέτωπο

7.1. Κατάσταση υγείας και πολύπλευρη απόδοση

Στη σύγχρονη εποχή, οι πυροσβέστες βρίσκονται αντιμέτωποι με ολοένα και πιο επικίνδυνες και έντονες δασικές πυρκαγιές, των οποίων η συχνότητα και η σφοδρότητα επιδεινώνονται λόγω της κλιματικής αλλαγής. Μέσα από τις συντονισμένες και εξαντλητικές προσπάθειές τους, προλαμβάνουν μαζικές καταστροφές και σώζουν ανθρώπινες ζωές. Ωστόσο, εκτίθενται σε ακραίες θερμικές συνθήκες, σωματική καταπόνηση και υπερφυσιολογικές επιβαρύνσεις, οι οποίες δύνανται να επηρεάσουν αρνητικά την απόδοσή τους, την κατάσταση της υγείας τους και τη συνολική τους ευημερία.

Μια άριστη φυσική κατάσταση και καλή κατάσταση υγείας μπορούν να βελτιώσουν τη συνολική ικανότητα πυρόσβεσης και την επιχειρησιακή ασφάλεια, ιδίως όταν οι συνθήκες στο πεδίο επιχειρήσεων είναι ιδιαίτερα αντίξοες. Επομένως, είναι κρίσιμης σημασίας η ενσωμάτωση στρατηγικών εκπαίδευσης που δίνουν έμφαση στη σωματική και ψυχολογική υγεία των πυροσβεστών, καθώς και η ενίσχυση των γνώσεων σχετικά με τη φυσιολογία του ανθρώπινου οργανισμού σε συνθήκες έντονης καταπόνησης.

Για την αποτελεσματικότερη προετοιμασία των πυροσβεστών που καλούνται να επιχειρήσουν σε ακραίες δασικές πυρκαγιές, θα πρέπει να προσαρμοστούν τα προγράμματα εκπαίδευσης ώστε να συμπεριλάβουν βασικές πτυχές που ενισχύουν τη σωματική και επιχειρησιακή ανθεκτικότητα. Ορισμένα από τα βασικά στοιχεία που πρέπει να προστεθούν στα εκπαιδευτικά προγράμματα παρατίθενται συνοπτικά στη συνέχεια.

<u>Ολοκληρωμένη κατάσταση υγείας και βελτίωση της φυσιολογίας για την ενίσχυση της απόδοσης</u>

- **Καρδιαγγειακή υγεία**

Η αντοχή και η καλή λειτουργία του καρδιαγγειακού συστήματος είναι ζωτικής σημασίας για τους πυροσβέστες, καθώς απαιτείται η εκτέλεση έντονης σωματικής δραστηριότητας υπό ακραίες συνθήκες. Η εκπαίδευση πρέπει να ενσωματώνει προγράμματα που βελτιώνουν τη φυσιολογία του καρδιαγγειακού συστήματος μέσω αερόβιων ασκήσεων, όπως τρέξιμο, ποδηλασία και κολύμβηση. Παράλληλα, είναι σημαντικό να δίνεται έμφαση σε υγιεινές συνήθειες που ενισχύουν την καρδιακή υγεία, όπως ισορροπημένη διατροφή, αποφυγή τοξικών παραγόντων (καπνός, ρύποι), διαχείριση του στρες και μείωση του λιπώδους ιστού.

- **Φυσική αξιολόγηση**

Για τη διασφάλιση της αποτελεσματικότητας και της ευεξίας των πυροσβεστών, είναι απαραίτητη μια εξατομικευμένη φυσική αξιολόγηση. Αυτή περιλαμβάνει παραμέτρους όπως η καρδιοαναπνευστική αντοχή, η μυϊκή δύναμη και η σύσταση σώματος. Αυτή η προσέγγιση βοηθά στην ανάπτυξη στοχευμένων προγραμμάτων βελτίωσης των φυσικών ικανοτήτων, μειώνοντας παράλληλα τον κίνδυνο τραυματισμών ή καρδιαγγειακών επεισοδίων.

- **Φυσική προετοιμασία**

Με βάση την αρχική αξιολόγηση, πρέπει να σχεδιαστούν εξατομικευμένα προγράμματα εκπαίδευσης που ενσωματώνουν διάφορες μορφές άσκησης, όπως τρέξιμο, άρση βαρών, κυκλική προπόνηση και λειτουργικές κινήσεις. Αυτές οι προπονήσεις πρέπει να προσομοιώνουν πραγματικές επιχειρησιακές συνθήκες, βελτιώνοντας τη μυϊκή συνεργασία και την απόδοση των πυροσβεστών υπό πίεση.

Η κατάλληλη φυσική προετοιμασία μειώνει τη συσσώρευση γαλακτικού οξέος στους μύες, αποτρέποντας τη μυϊκή εξάντληση και την πιθανότητα κατάρρευσης κατά τη διάρκεια μακροχρόνιων επιχειρήσεων.

Ψυχική υγεία και ανθεκτικότητα, ποιότητα ύπνου και διαχείριση άγχους

Οι πυροσβέστες εκτίθενται σε έντονα αγχωτικές και επικίνδυνες καταστάσεις, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν την ψυχική τους ανθεκτικότητα, τη λήψη αποφάσεων και τη συνολική επιχειρησιακή τους απόδοση. Η εκπαίδευση των πυροσβεστών πρέπει να περιλαμβάνει τεχνικές βελτίωσης της ηγετικής ικανότητας, της ψυχικής ανθεκτικότητας και της διαχείρισης άγχους.

Η ποιότητα του ύπνου παίζει επίσης κρίσιμο ρόλο, καθώς η έλλειψη ξεκούρασης μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη συγκέντρωση και ταχύτερη σωματική εξάντληση. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να προωθηθούν στρατηγικές βελτιστοποίησης του ύπνου, καθώς και να αναπτυχθούν μέθοδοι αντιμετώπισης διαταραχών ύπνου που σχετίζονται με τη βάρδια εργασία.

Διατροφή και ενυδάτωση

Η σωστή διατροφή και η επαρκής ενυδάτωση αποτελούν βασικούς παράγοντες για τη διατήρηση της απόδοσης και της φυσιολογικής ισορροπίας του οργανισμού. Τα προγράμματα εκπαίδευσης πρέπει να ενσωματώνουν οδηγίες για τον σχεδιασμό ισορροπημένων γευμάτων πριν, κατά τη διάρκεια και μετά από επιχειρησιακές αποστολές.

Οι δίαιτες που είναι εμπλουτισμένες με αντιοξειδωτικά και αποτοξινωτικά συστατικά μπορούν να βοηθήσουν στην ανάκαμψη από την αυξημένη έκθεση στον καπνό και στους ρύπους. Παράλληλα, η επαρκής ενυδάτωση είναι κρίσιμη, τόσο πριν όσο και κατά τη διάρκεια της έντονης σωματικής δραστηριότητας, προκειμένου να διατηρηθούν τα φυσιολογικά επίπεδα ηλεκτρολυτών και να προληφθεί η αφυδάτωση.

Η κατάλληλη εκπαίδευση σχετικά με τη σημασία της ενυδάτωσης πρέπει να περιλαμβάνει γνώσεις για την επιλογή και την περιοδικότητα κατανάλωσης υγρών, προκειμένου να εξασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοση των πυροσβεστών κατά τη διάρκεια παρατεταμένων επιχειρήσεων.

Η διατήρηση της φυσικής και ψυχικής ανθεκτικότητας των πυροσβεστών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επιχειρησιακή τους ικανότητα και ασφάλεια. Ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα εκπαίδευσης που συνδυάζει τη βελτίωση της φυσιολογίας, τη διαχείριση του στρες, τη διατροφή και την ενυδάτωση μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοσή τους και να μειώσει τον κίνδυνο τραυματισμών και εξάντλησης κατά τη διάρκεια επιχειρήσεων σε ακραίες δασικές πυρκαγιές.

7.2. Επιπτώσεις του καπνού στην ορατότητα και την υγεία

Η οξεία εισπνοή καπνού είναι ένα σύνθετο και δυνητικά θανατηφόρο σύνδρομο, το οποίο περιλαμβάνει μια πολυσυστηματική απόκριση – πέραν της αναπνευστικής – που προκύπτει από την έκθεση σε μια εκτεταμένη σειρά χημικών ουσιών και σωματιδίων που εκλύονται κατά την καύση διαφόρων υλικών. Μπορεί να συμβεί τόσο σε ανοιχτούς όσο και σε κλειστούς χώρους και μπορεί να συνοδεύεται ή όχι από εγκαύματα στο δέρμα (Gill et al., 2015; Walker et al., 2015; Herndon, 2018).

7.2.1. Αιτιοπαθογένεια

Οι τοξικοί κίνδυνοι που σχετίζονται με τις πυρκαγιές και η αδυναμία των θυμάτων να απομακρυνθούν από επικίνδυνες ατμόσφαιρες μπορούν να εξεταστούν σε τρεις κύριες διαστάσεις: (1) έκθεση σε θερμότητα, (2) εισπνοή καπνού και (3) προϊόντα καύσης. Η τοξικολογία των κύριων εκπομπών των πυρκαγιών έχει μελετηθεί εκτενώς και εξαρτάται από το περιβάλλον όπου εκδηλώνεται η πυρκαγιά (υπαίθριο ή εσωτερικό). Μεταξύ των επικίνδυνων ουσιών, διακρίνονται ασφυξιογόνα αέρια (π.χ. μονοξείδιο του άνθρακα, υδροκυάνιο), ερεθιστικοί παράγοντες (π.χ. βρωμιούχο οξύ, υδροχλωρικό οξύ, υδροφθορικό οξύ, διοξείδιο του θείου και οργανικές ερεθιστικές ουσίες, όπως ακεταλδεΰδη, ακρολεΐνη, βενζόλιο, κροτοναλδεΰδη, φορμαλδεΰδη, φαινόλη, τολουόλιο), καθώς και αέρια θερμοκηπίου (π.χ. διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο). Επιπλέον, οι ζώνες πυρκαγιάς συχνά χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλά επίπεδα οξυγόνου, γεγονός που αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για την επιβίωση (Gill et al., 2015; Herndon, 2018).

Η θερμική βλάβη από την έκθεση σε υπερβολική θερμότητα εντοπίζεται κυρίως στην ανώτερη αναπνευστική οδό, προκαλώντας οίδημα, το οποίο μπορεί να είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο για τη γλωττίδα και τις φωνητικές χορδές (Walker et al., 2015).

Οι πιο υδατοδιαλυτές χημικές ουσίες (π.χ. αμμωνία, διοξείδιο του θείου) προκαλούν άμεσο ερεθισμό των ανώτερων αεραγωγών. Αντίθετα, λιγότερο υδατοδιαλυτοί παράγοντες (π.χ. φωσγένιο, διοξείδιο του αζώτου) εισπνέονται βαθύτερα στους πνεύμονες, καθώς δεν προκαλούν έντονο βήχα, και μπορεί να οδηγήσουν σε σοβαρές βλάβες, όπως μη καρδιογενές πνευμονικό οίδημα, το οποίο μπορεί να εκδηλωθεί με καθυστέρηση και απαιτεί αυξημένη επαγρύπνηση (Stec, 2010; Demling, 2008).

Το διοξείδιο του άνθρακα και το μονοξείδιο του άνθρακα, δύο από τα κύρια συστατικά του καπνού, μειώνουν τη συγκέντρωση οξυγόνου στο περιβάλλον σε επίπεδα μεταξύ 5% και 10%. Το μονοξείδιο του άνθρακα και το υδροκυάνιο εμποδίζουν τη μεταφορά οξυγόνου από τις κυψελίδες στο αίμα, οδηγώντας σε σοβαρή και δυνητικά θανατηφόρα υποξαιμία. Αυτά τα αέρια θεωρούνται συστημικά ασφυξιογόνα, καθώς επηρεάζουν τη συνολική οξυγόνωση του οργανισμού. Το μονοξείδιο του άνθρακα, ένα άχρωμο, άοσμο και μη ερεθιστικό αέριο που παράγεται από ατελείς καύσεις –κυρίως υδρογονανθράκων και προϊόντων απόσταξης πετρελαίου– έχει συγγένεια με την αιμοσφαιρίνη πάνω από 200 φορές μεγαλύτερη από το οξυγόνο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση της καμπύλης διάστασης της αιμοσφαιρίνης προς τα αριστερά, τον σχηματισμό ελεύθερων ριζών οξυγόνου, την υπεροξείδωση λιπιδίων και τη διαταραχή της κυτταρικής αναπνοής και του μιτοχονδριακού μεταβολισμού. Οι πιο ευάλωτοι ιστοί περιλαμβάνουν τον εγκέφαλο και το μυοκάρδιο (Walker et al., 2015; Dries et al., 2013; Stec, 2010; Demling, 2008; Haponik, 1990; Lafferty, 2018).

Το μονοξείδιο του άνθρακα έχει ενοχοποιηθεί για περισσότερους θανάτους από εισπνοή καπνού από οποιαδήποτε άλλη μεμονωμένη ένωση. Επιπλέον, η μεθαιμοσφαιριναιμία μπορεί να προκληθεί από την εισπνοή καπνού, ιδιαίτερα από την καύση πλαστικών και άλλων συνθετικών υλικών. Η μεθαιμοσφαιρίνη, η οξειδωμένη μορφή της αιμοσφαιρίνης, αδυνατεί να μεταφέρει οξυγόνο, προκαλώντας κυάνωση, ενώ επίπεδα άνω του 70% είναι συνήθως θανατηφόρα. Η εισπνοή αιθάλης μπορεί επίσης να λειτουργήσει ως όχημα μεταφοράς αερίων και τοξικών ουσιών στην κατώτερη αναπνευστική οδό, όπου διαλύονται και σχηματίζουν όξινες και αλκαλικές ενώσεις, προκαλώντας σοβαρή βλάβη στις βρογχικές και κυψελιδικές δομές (Lafferty, 2018).

7.2.2. Διαγνωστική

Οι κλινικές εκδηλώσεις που σχετίζονται με την οξεία εισπνοή καπνού προκύπτουν κυρίως από την έκθεση σε άμεση ή μεταφερόμενη θερμότητα, την εισπνοή ασφυξιογόνων αερίων και την έκθεση σε νευρολογικούς και αναπνευστικούς ερεθιστικούς παράγοντες (ISBI Practice Guidelines for Burn Care, 2016). Γενικά, αναγνωρίζονται τέσσερις διακριτές φάσεις μετά από οξεία εισπνοή καπνού:

1. **Οξεία αναπνευστική δυσχέρεια** – Εκδηλώνεται εντός 1 έως 12 ωρών από την έκθεση και χαρακτηρίζεται από βρογχόσπασμο, λαρυγγικό οίδημα και βρογχόρροια.
2. **Μη καρδιογενές πνευμονικό οίδημα (σύνδρομο οξείας αναπνευστικής δυσχέρειας - ARDS)** – Εμφανίζεται 6 έως 72 ώρες μετά την έκθεση και οφείλεται σε αυξημένη διαπερατότητα των τριχοειδών αγγείων, με κλινική εικόνα που μπορεί να προσομοιάζει το οξύ καρδιογενές πνευμονικό οίδημα.
3. **Σύμπλεγμα τραχηλικού χώρου** – Αναπτύσσεται 60 έως 120 ώρες μετά την έκθεση και σχετίζεται με το σχηματισμό εσχάρας στον τράχηλο, ιδιαίτερα σε ασθενείς με περιμετρικά εγκαύματα στην περιοχή του λαιμού.
4. **Πιθανή εμφάνιση πνευμονίας** – Παρατηρείται περίπου 72 ώρες μετά την έκθεση, συχνά με τη συμμετοχή παθογόνων όπως *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* ή άλλων gram-αρνητικών βακτηρίων.

Η ακριβής διάγνωση απαιτεί προσεκτική κλινική αξιολόγηση και στενή παρακολούθηση, καθώς οι επιπλοκές μπορεί να εμφανιστούν με καθυστέρηση, επιδεινώνοντας την πρόγνωση.

Κλινικό ιστορικό και αντικειμενική εξέταση

Η κλινική εικόνα και οι πιθανοί κίνδυνοι από την εισπνοή καπνού εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη διάρκεια της έκθεσης, το είδος και το περιβάλλον της πυρκαγιάς, καθώς και από τη φύση των υλικών που καίγονται. Επιπλέον, σημαντικοί παράγοντες είναι η τοποθεσία της πυρκαγιάς (εσωτερικός ή εξωτερικός χώρος), η παρουσία συνοδών εγκαυμάτων δέρματος, καθώς και η γενική κατάσταση υγείας του ατόμου πριν από την έκθεση.

Οι πάσχοντες συχνά εμφανίζουν διάφορους βαθμούς δύσπνοιας, η οποία μπορεί να συνοδεύεται από δυσφωνία, βραχνάδα, συριγμό ή/και βρογχόσπασμο (Walker et al., 2015). Ο βήχας αποτελεί σύνηθες σύμπτωμα λόγω εισπνοής ερεθιστικών ουσιών, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις παρατηρείται ανθρακούχα απόχρεμψη.

Η μεταβολή της διανοητικής κατάστασης μπορεί να αποτελεί ένδειξη σοβαρής εισπνοής καπνού, καθώς αρκετές από τις προαναφερθείσες ουσίες προκαλούν νευρολογικές επιδράσεις, οδηγώντας σε προοδευτική ανικανότητα διαφυγής του θύματος. Σε σοβαρότερες περιπτώσεις, μπορεί να παρουσιαστούν επεισόδια σπασμών. Επιπλέον, άτομα με ηπιότερη έκθεση μπορεί να εμφανίσουν συμπτώματα όπως πονοκέφαλο, άγχος, διέγερση, εφίδρωση, ζάλη ή αίσθημα ίλιγγου.

Η υπόταση ενδέχεται να προκληθεί από περιφερική αγγειοδιαστολή, καταστολή του μυοκαρδίου, αρρυθμίες ή διαταραχές στα επίπεδα υγρών του οργανισμού.

Σε περιπτώσεις δηλητηρίασης από μονοξείδιο του άνθρακα (CO) ή/και μεθαιμοσφαιριναιμίας, η παλμική οξυμετρία μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες μετρήσεις. Η αιτία αυτού είναι η ομοιότητα στη χρωματομετρική απορρόφηση της καρβοξυαιμοσφαιρίνης

(COHb) και της οξυαιμοσφαιρίνης (O2Hb), με αποτέλεσμα τα οξύμετρα να αδυνατούν να διακρίνουν αξιόπιστα μεταξύ των δύο (Rehberg et al., 2009).

Οι κλινικές εκδηλώσεις που αντιστοιχούν στα επίπεδα καρβοξυαιμοσφαιρίνης (COHb) στο αίμα περιγράφονται παρακάτω (Lafferty, 2018; Rorison & McPherson, 1992):

- **0-10%** – Συνήθως ασυμπτωματικό.
- **10-20%** – Ήπιος πονοκέφαλος, ήπια δύσπνοια.
- **20-30%** – Έντονος πονοκέφαλος, μείωση συγκέντρωσης.
- **30-40%** – Σοβαρός πονοκέφαλος, σύγχυση στη σκέψη.
- **40-50%** – Σύγχυση, λήθαργος, πιθανή συγκοπή.
- **50-60%** – Αναπνευστική ανεπάρκεια, σπασμοί.
- **≥70%** – Κώμα, θάνατος.

Η έγκαιρη αναγνώριση και αντιμετώπιση των συμπτωμάτων είναι κρίσιμη για την πρόγνωση του ασθενούς.

Αναλυτική αξιολόγηση

Η ανάλυση των αερίων αρτηριακού αίματος μπορεί να παρέχει πολύτιμες διαγνωστικές πληροφορίες, ωστόσο, οι τιμές τους εξαρτώνται σημαντικά από τις εισπνεόμενες ουσίες. Στην περίπτωση δηλητηρίασης από αναθυμιάσεις που περιέχουν συστημικά ασφυξιογόνα, όπως το υδροκυάνιο και τα κυανίδια, μπορεί να παρατηρηθεί μεταβολική οξέωση συνοδευόμενη από αυξημένα επίπεδα γαλακτικού οξέος – με την υποξαιμία να εμφανίζεται δευτερογενώς (Dries et al., 2013).

Σε εξειδικευμένα εργαστήρια με την κατάλληλη τεχνολογία, είναι δυνατή η άμεση μέτρηση των επιπέδων καρβοξυαιμοσφαιρίνης (COHb) και μεθαιμοσφαιρίνης (MetHb), που αποτελούν βασικούς βιοδείκτες έκθεσης σε μονοξείδιο του άνθρακα και οξειδωτικούς παράγοντες, αντίστοιχα.

Για την ποσοτικοποίηση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στο αίμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν χρωματογραφικές ή φασματοφωτομετρικές τεχνικές. Ωστόσο, φορητές διαγνωστικές συσκευές επιτρέπουν την παρακολούθηση των επιπέδων CO στον εκπνεόμενο αέρα, παρέχοντας μια εκτίμηση της συγκέντρωσης καρβοξυαιμοσφαιρίνης στο αίμα (Rehberg et al., 2009).

Άλλες εξετάσεις

Η ακτινολογική απεικόνιση του θώρακα μπορεί να συμβάλει στην αξιολόγηση μεταγενέστερων πνευμονικών επιπλοκών, όπως μη καρδιογενές πνευμονικό οίδημα, ατελεκτασία ή πνευμονικές διηθήσεις. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι στα πρώιμα στάδια, η ακτινογραφία θώρακος μπορεί να εμφανίζεται εντελώς φυσιολογική, ακόμα και σε περιπτώσεις οξείας εισπνοής καπνού (Adams, 2013).

Σε ορισμένες περιπτώσεις που πρέπει να αξιολογούνται εξατομικευμένα, μπορεί να είναι αναγκαία η άμεση οπτική εξέταση των αεραγωγών μέσω λαρυγγοσκόπησης ή εύκαμπτης βρογχοσκόπησης. Αυτό κρίνεται ιδιαίτερα απαραίτητο, καθώς ορισμένοι ασθενείς, ακόμη και με ήπια αρχικά συμπτώματα, μπορεί να εμφανίσουν ταχεία εξέλιξη σε πλήρη απόφραξη των αεραγωγών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, απαιτείται πρώιμη τραχειακή διασωλήνωση και

εντατική παρακολούθηση για ικανό χρονικό διάστημα, καθώς το σχετικό οίδημα μπορεί να αναπτυχθεί ώρες μετά την έκθεση.

Η εύκαμπτη βρογχοσκόπηση μπορεί να επιβεβαιώσει την παρουσία και την έκταση της βλάβης από την εισπνοή καπνού. Τα πιο συχνά παρατηρούμενα βρογχοσκοπικά ευρήματα περιλαμβάνουν την παρουσία αιθάλης στους αεραγωγούς, οίδημα και ερύθημα του βλεννογόνου, αιμορραγία και εξέλκωση.

Οι **Endorf και Gamelli (2007)** πρότειναν **τα βρογχοσκοπικά κριτήρια διαβάθμισης της βλάβης από εισπνοή καπνού** (SIB – **Συνοπτική Βαθμολογία Τραυματισμού**), τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως:

- **Βαθμός 0 (Καμία βλάβη):** Απουσία ανθρακούχων εναποθέσεων, ερυθήματος, οιδήματος, βρογχόρροιας ή απόφραξης.
- **Βαθμός 1 (Ήπια βλάβη):** Ήπιες ή κηλιδώδεις περιοχές ερυθήματος, ανθρακούχες εναποθέσεις στους εγγύς ή απομακρυσμένους βρόγχους (ένα από αυτά ή συνδυασμός).
- **Βαθμός 2 (Μέτρια βλάβη):** Μέτριας έντασης ερύθημα, ανθρακούχες εναποθέσεις, βρογχόρροια, με ή χωρίς μερική απόφραξη των βρόγχων (ένα από αυτά ή συνδυασμός).
- **Βαθμός 3 (Σοβαρή βλάβη):** Έντονη φλεγμονή με ευθρυπτότητα ιστού, εκτεταμένες ανθρακούχες εναποθέσεις, έντονη βρογχόρροια και βρογχική απόφραξη (ένα από αυτά ή συνδυασμός).
- **Βαθμός 4 (Μαζική βλάβη):** Εμφάνιση απόπτωσης του βλεννογόνου, νέκρωση και πλήρης ενδοαυλική απόφραξη (ένα από αυτά ή συνδυασμός).

7.2.3. Θεραπεία

Το θύμα πρέπει να απομακρυνθεί άμεσα από την επικίνδυνη ατμόσφαιρα. Η πρώτη προτεραιότητα είναι η εξασφάλιση του αεραγωγού, της αναπνοής και της κυκλοφορίας (**ABC – Airway, Breathing, Circulation**). Σε σοβαρότερες περιπτώσεις, μπορεί να είναι αναγκαία η έγκαιρη τραχειακή διασωλήνωση και, ενδεχομένως, η έναρξη μηχανικού αερισμού. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η προοδευτική επιδείνωση του οιδήματος των ανώτερων αεραγωγών μπορεί να καταστήσει εξαιρετικά δύσκολη μια καθυστερημένη διασωλήνωση.

Συνιστάται η χορήγηση οξυγόνου υψηλής ροής μέσω μάσκας υψηλής απόδοσης, καθώς αυτό μπορεί να συμβάλει στην ταχύτερη απομάκρυνση των τοξικών αερίων από το αίμα (Toon et al., 2010; Sheridan, 2016; Herndon, 2018).

Σε περιπτώσεις δηλητηρίασης από **μονοξείδιο του άνθρακα** ή **κυανιούχα**, μπορεί να εξεταστεί η χρήση **υπερβαρικής οξυγονοθεραπείας**. Αυτή η προσέγγιση, διαθέσιμη μόνο σε εξειδικευμένα ιατρικά κέντρα, μειώνει σημαντικά τον χρόνο ημιζωής του μονοξειδίου του άνθρακα και μπορεί να συμβάλει στην ελάττωση του πνευμονικού διάμεσου οιδήματος (Herndon, 2018; Spinou & Koulouris, 2018).

Η συνεχής κλινική και ζωτική παρακολούθηση είναι απαραίτητη, καθώς και η διατήρηση της ισορροπίας των υγρών και των ηλεκτρολυτών, η οξεοβασική ρύθμιση και η φαρμακολογική υποστήριξη, συμπεριλαμβανομένης της διόρθωσης της **μεταβολικής οξέωσης**. Παράλληλα, η

αναπνευστική κινησιοθεραπεία μπορεί να βοηθήσει στη διατήρηση της πνευμονικής λειτουργίας.

Δεδομένης της πολυπλοκότητας των πιθανών επιπλοκών, η συντριπτική πλειοψηφία των περιστατικών απαιτεί **παραπομπή σε εξειδικευμένο ιατρικό κέντρο**, το οποίο διαθέτει τις αναγκαίες υποδομές για την ολοκληρωμένη και ενδελεχή αντιμετώπιση αυτών των καταστάσεων.

7.2.4. Συμπεράσματα

Η εισπνοή καπνού ευθύνεται για έως και **το 80% των θανάτων** που σχετίζονται με πυρκαγιές, καθιστώντας την έναν από τους σοβαρότερους κινδύνους που αντιμετωπίζουν τα θύματα πυρκαγιών. Επιπλέον, η εισπνοή καπνού μπορεί να αυξήσει σημαντικά τον κίνδυνο θανάτου σε ασθενείς με **συνυπάρχοντα εγκαύματα δέρματος** ή άλλες επιβαρυντικές καταστάσεις.

Η **έγκαιρη διάγνωση** και η **σωστή αρχική θεραπεία** είναι καθοριστικές για την επιβίωση και την αποφυγή μακροχρόνιων επιπλοκών. Σε σοβαρές περιπτώσεις, οι ασθενείς μπορεί να εμφανίσουν **αναπνευστικές επιπλοκές** που επιμένουν στο χρόνο, όπως:

- **Τραχειακή στένωση**
- **Τραχειομαλακία**
- **Βρογχεκτασίες**
- **Βρογχική υπεραντιδραστικότητα**
- **Αποφρακτική βρογχιολίτιδα**

Ως εκ τούτου, σε περιπτώσεις σοβαρής εισπνοής καπνού, συνιστάται η **μεταγενέστερη επαναξιολόγηση των ασθενών σε εξειδικευμένα εξωτερικά ιατρεία**, ώστε να εντοπιστούν και να αντιμετωπιστούν έγκαιρα τυχόν χρόνια αναπνευστικά προβλήματα.

7.3. Κανόνες ασφαλείας

Πολύ συχνά, τα ατυχήματα που σχετίζονται με δασικές πυρκαγιές προκύπτουν από **ανεπαρκή κατανόηση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς**. Η έλλειψη αυτής της γνώσης μπορεί να οδηγήσει σε **επικίνδυνες αποφάσεις**, αυξημένο κίνδυνο τραυματισμού ή ακόμα και απώλειες ζωών μεταξύ των πυροσβεστών και των ατόμων που επιχειρούν στον χώρο της πυρκαγιάς.

Ο σκοπός αυτού του εγγράφου είναι να καλύψει αυτό το **σημαντικό κενό γνώσης** και να βοηθήσει τους **διαχειριστές πυρκαγιών**, τους πυροσβέστες και όλα τα εμπλεκόμενα μέρη να κατανοήσουν **θεμελιώδεις αρχές ασφαλείας**. Αυτές οι αρχές μεταφράζονται σε **τυποποιημένες διαδικασίες** και **βασικούς κανόνες**, οι οποίοι πρέπει να αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της **εκπαίδευσης** και της **προετοιμασίας** κάθε ατόμου που συμμετέχει στη **διαχείριση και την καταστολή πυρκαγιών**.

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται **ορισμένοι από τους πλέον διαδεδομένους κανόνες και κατευθυντήριες γραμμές** που εφαρμόζονται σήμερα σε διεθνές επίπεδο για τη διασφάλιση της ασφάλειας των πυροσβεστών και των επιχειρήσεων διαχείρισης δασικών πυρκαγιών.

7.3.1. Τυποποιημένες εντολές δασοπυρόσβεσης και Καταστάσεις προειδοποίησης

Οι Ηνωμένες Πολιτείες υπήρξαν πρωτοπόρες όχι μόνο στη σύγχρονη επιστήμη των δασικών πυρκαγιών αλλά και στην ανάπτυξη **πρωτοκόλλων και διαδικασιών πυρασφάλειας**. Στα μέσα του 20ού αιώνα, μια σειρά **θανατηφόρων ατυχημάτων** στις ΗΠΑ, όπου **μεγάλες ομάδες πυροσβεστών** έχασαν τη ζωή τους, οδήγησαν στην ανάγκη θεσμοθέτησης αυστηρότερων κατευθυντήριων γραμμών για την **ασφάλεια των επιχειρήσεων δασοπυρόσβεσης**.

Ορισμένες από τις πλέον **διαβόητες δασικές πυρκαγιές**, που εξακολουθούν να μελετώνται και να χρησιμοποιούνται ως **εκπαιδευτικά παραδείγματα**, περιλαμβάνουν:

- **Πυρκαγιά Blackwater** στο Wyoming (1937) – 15 θάνατοι
- **Πυρκαγιά Bryant Canyon** στην Καλιφόρνια (1947) – 11 θάνατοι
- **Πυρκαγιά Man Gulch** στη Μοντάνα (1949) – 13 θάνατοι
- **Πυρκαγιά Rattlesnake** στην Καλιφόρνια (1953) – 15 θάνατοι
- **Πυρκαγιά Inaja** στην Καλιφόρνια (1956) – 11 θάνατοι

Η αλληλουχία αυτών των καταστροφών – ιδιαίτερα το συμβάν **Inaja του 1956** – οδήγησε την **Δασική Υπηρεσία των ΗΠΑ (USDA Forest Service)** στη συγκρότηση **Ομάδας Εργασίας** με σκοπό την **ανάλυση των αιτιών των ατυχημάτων** και τη διαμόρφωση προτάσεων για τη **μείωση του κινδύνου θανάτων από δασικές πυρκαγιές**.

Διαμόρφωση των 10 Τυποποιημένων Εντολών Καταπολέμησης Πυρκαγιάς & των 18 Καταστάσεων Προειδοποίησης

Η έκθεση που προέκυψε από αυτή την ανάλυση το **1957**, υπό την ηγεσία του **R.E. McArdle**, κατέληξε στη θέσπιση:

1. **Των 10 Τυποποιημένων Εντολών Καταπολέμησης Πυρκαγιάς**
2. **Των 13 Καταστάσεων Προειδοποίησης**, οι οποίες σήμερα έχουν αυξηθεί σε **18 Καταστάσεις Προειδοποίησης**

Αυτοί οι **κανόνες ασφαλείας**, που διαμορφώθηκαν από τα **διδάγματα των θανατηφόρων πυρκαγιών**, συνεχίζουν να εφαρμόζονται ευρέως στις ΗΠΑ και έχουν **υιοθετηθεί διεθνώς**.

Η ανάλυση της Ομάδας Εργασίας κατέληξε στο συμπέρασμα ότι **η πλειονότητα των θανάτων** θα μπορούσε να είχε αποφευχθεί εάν υπήρχε:

- ✔ **Καλύτερη γνώση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς**
- ✔ **Βελτιωμένη οργανωτική λειτουργία**
- ✔ **Αποτελεσματικότερη επίβλεψη των επιχειρήσεων**

Επιπλέον, υπογραμμίστηκε η **ανάγκη ενσωμάτωσης** της **πρόβλεψης της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς** και των **μετεωρολογικών δεδομένων** στον σχεδιασμό των επιχειρήσεων κατάσβεσης.

<u>Οι 10 Τυποποιημένες Εντολές Καταπολέμησης Πυρκαγιάς</u>

Οι **10 Εντολές Καταπολέμησης Πυρκαγιάς** είναι μια **σειρά βημάτων που πρέπει να ακολουθούν οι πυροσβέστες** για να **διασφαλίσουν την ασφάλεια** κατά τη διάρκεια των επιχειρήσεων.

Είναι οργανωμένες σε **τρία κύρια θέματα**:

- **Συμπεριφορά Πυρκαγιάς**

- **Πυρασφάλεια**
- **Οργάνωση & Συντονισμός**

Ο απώτερος στόχος αυτών των εντολών είναι να **δημιουργήσουν τις συνθήκες που επιτρέπουν την εφαρμογή της 10ης εντολής**, η οποία αφορά την **προστασία του προσωπικού και την αποτελεσματική διαχείριση κινδύνων**.

Οι **10 Τυποποιημένες Εντολές Καταπολέμησης Πυρκαγιάς** παρουσιάζονται **στον Πίνακα 6**.

Πίνακας 6. 10 Τυποποιημένες εντολές δασοπυρόσβεσης (NWCG, 2022)

Θέμα	Αρ.	Εντολή
Συμπεριφορά Πυρκαγιάς	1	Ενημερωθείτε ενδελεχώς για τις τρέχουσες καιρικές συνθήκες και τις μετεωρολογικές προβλέψεις που επηρεάζουν την συμπεριφορά της πυρκαγιάς.
	2	Να έχετε διαρκή επίγνωση της εξέλιξης και της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς.
	3	Όλες οι επιχειρήσεις και οι ενέργειες σας να βασίζονται στην τρέχουσα και στην αναμενόμενη συμπεριφορά της πυρκαγιάς.
Ασφάλεια Πυρκαγιάς	4	Προσδιορίστε και γνωστοποιήστε εγκαίρως τις διαδρομές διαφυγής και τις τοποθεσίες ασφαλείας σε όλους τους εμπλεκόμενους.
	5	Τοποθετήστε έγκαιρα και σε κατάλληλες θέσεις παρατηρητές πυρκαγιάς, ιδιαίτερα σε περιοχές αυξημένου κινδύνου.
	6	Διατηρείτε διαρκώς υψηλό επίπεδο ετοιμότητας, ψυχραιμία, και επιχειρείτε με μεθοδικότητα και αποφασιστικότητα.
Οργανωτικός Έλεγχος	7	Εξασφαλίστε αδιάλειπτη και έγκαιρη επικοινωνία με το σύνολο των δυνάμεων, τον προϊστάμενό σας και τις όμορες δυνάμεις.
	8	Διατυπώστε σαφείς και κατανοητές εντολές και βεβαιωθείτε για την ορθή κατανόησή τους από τους αποδέκτες.
	9	Διατηρείτε ανά πάσα στιγμή τον έλεγχο και τη διοίκηση του συνόλου των δυνάμεών σας (προσωπικού).
	10	Αντιμετωπίστε την πυρκαγιά με αποφασιστικότητα, θέτοντας ως απόλυτη προτεραιότητα την ασφάλεια των πυροσβεστών.

<u>Επεξήγηση των 10 Τυποποιημένων Εντολών & των 18 Καταστάσεων Προσοχής</u>

Το σύνολο των **10 Τυποποιημένων Εντολών Καταπολέμησης Πυρκαγιάς** έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι **αυτοεξηγητικό**, προσφέροντας έναν σαφή και **άμεσα εφαρμόσιμο οδηγό** για την **ασφαλή και αποτελεσματική διαχείριση πυρκαγιών**.

Για περισσότερες λεπτομέρειες, οι πληροφορίες είναι διαθέσιμες στον ιστότοπο της **Εθνικής Ομάδας Συντονισμού Δασικών Πυρκαγιών (NWCG)**[1]

[1] https://www.nwcg.gov/publications/pms110 *(πρόσβαση στις 17/11/2023)*.

Οι 18 Καταστάσεις Προσοχής

Οι **18 Καταστάσεις Προσοχής (NWCG, 2022)** καταγράφουν **ειδικές καταστάσεις** που πρέπει να λειτουργούν ως **σημεία συναγερμού** για **όλους τους πυροσβέστες**.

Εάν ένας πυροσβέστης ή μια ομάδα πυρόσβεσης βρεθεί σε κάποια από αυτές τις καταστάσεις, πρέπει να **αναγνωρίσει** τον κίνδυνο και να **προσαρμόσει άμεσα τη στρατηγική και τις τακτικές του**.

Αυτές οι καταστάσεις λειτουργούν ως **προειδοποιητικά σημάδια** και αποτελούν μια **λογική επέκταση** των **10 Τυποποιημένων Εντολών Καταπολέμησης Πυρκαγιάς**.

Οι 18 Καταστάσεις Προσοχής παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.

Table 7. 18 Καταστάσεις προσοχής/προειδοποίησης (NWCG, 2022)

Αρ.	Καταστάσεις Προσοχής/Προειδοποίησης
1	Η πυρκαγιά δεν έχει διερευνηθεί σε όλη της την έκταση και δεν έχει εκτιμηθεί το μέγεθός της.
2	Η έκταση της πυρκαγιάς δεν είναι ορατή κατά τη διάρκεια της ημέρας.
3	Δεν έχουν καθοριστεί ζώνες ασφαλείας και διαδρομές διαφυγής.
4	Ανεπαρκής γνώση των τοπικών καιρικών συνθηκών και των τοπικών παραγόντων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς.
5	Έλλειψη πληροφόρησης για τη στρατηγική, τις τακτικές και τους κινδύνους.
6	Ασαφείς οδηγίες και καταμερισμός καθηκόντων.
7	Απουσία επικοινωνιακής σύνδεσης με τα μέλη της ομάδας ή τον επικεφαλής.
8	Κατασκευή γραμμής πυρόσβεσης χωρίς ασφαλές σημείο αγκύρωσης.
9	Κατασκευή γραμμής πυρόσβεσης με φορά προς την κατεύθυνση εξάπλωσης της πυρκαγιάς.
10	Απόπειρα μετωπικής προσέγγισης της πυρκαγιάς.
11	Άκαυτο υλικό ανάμεσα σε εσάς και την φωτιά.
12	Δεν είναι ορατή η κύρια φωτιά και δεν υπάρχει επαφή με κάποιον που μπορεί να την εντοπίσει.
13	Εργασία σε πρανές όπου κυλιόμενα υλικά ενδέχεται να προκαλέσουν ανάφλεξη καύσιμης ύλης σε χαμηλότερο υψόμετρο.
14	Οι καιρικές συνθήκες επιδεινώνονται, με αύξηση της θερμοκρασίας και μείωση της υγρασίας.
15	Η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται και/ή αλλάζει κατεύθυνση.
16	Εμφάνιση πολλαπλών σημειακών πυρκαγιών (κηλιδώσεων) κατά μήκος της περιμέτρου της πυρκαγιάς..
17	Η μορφολογία του εδάφους και η καύσιμη ύλη δυσχεραίνουν την πρόσβαση σε ασφαλείς τοποθεσίες
18	Ανάπαυση κοντά στη γραμμή πυρόσβεσης.

Παρόμοια με τις 10 Εντολές Καταπολέμησης Πυρκαγιάς, οι καταστάσεις προσοχής έχουν διατυπωθεί με τρόπο ώστε να είναι αυτοεξηγητικές. Περαιτέρω λεπτομέρειες και εξηγήσεις μπορούν να βρεθούν στον ιστότοπο της Εθνικής Ομάδας Συντονισμού Δασικών Πυρκαγιών (https://www.nwcg.gov/publications/pms118, πρόσβαση στις 17/11/2023).

Ένας από τους βασικούς σκοπούς αυτών των δύο εργαλείων είναι η εσωτερίκευσή τους από όλα τα άτομα που εμπλέκονται σε επιχειρήσεις διαχείρισης πυρκαγιών, ιδιαίτερα στην πυρόσβεση. Στόχος τους είναι να «τονίσουν τη σημασία του εντοπισμού σημείων ενεργοποίησης, που υπενθυμίζουν στους πυροσβέστες να επανεξετάσουν τις έννοιες LCES» (Zimmerman, 2020).

7.3.2. LCES - LACES

Το σύστημα LCES αναπτύχθηκε από τον Paul Gleason (1991), έναν έμπειρο Επόπτη Ομάδας Hotshot στη Δασική Υπηρεσία των ΗΠΑ, μετά την πυρκαγιά Dude το 1990 στην Αριζόνα. Παρά την εφαρμογή των 10 Τυποποιημένων Εντολών και των 18 Καταστάσεων Προσοχής, που ήδη είχαν εδραιωθεί, η συγκεκριμένη πυρκαγιά οδήγησε στον θάνατο έξι πυροσβεστών. Ο Gleason κλήθηκε να ερευνήσει το περιστατικό και να εξάγει διδάγματα. Στην αναφορά του ανέφερε:

"Καθ' όλη τη διάρκεια της καριέρας μου στην καταστολή δασικών πυρκαγιών, ως Επόπτης Ομάδας Hotshot, οι πυροσβέστες που επέβλεπα άμεσα είχαν υποστεί μόνο ελάσσονες τραυματισμούς. Αυτό οφείλεται κυρίως σε δύο λόγους: τύχη (η οποία δεν μπορεί να αγνοηθεί) και βασικά διδάγματα που έμαθα από εξαιρετικούς πυροσβέστες με τους οποίους είχα την ευκαιρία να συνεργαστώ."

Ακριβώς αυτά τα "βασικά διδάγματα" ενσωματώθηκαν στο ακρωνύμιο **LCES**, το οποίο αντιστοιχεί σε:

- **Lookouts** (Παρατηρητές)
- **Communications** (Επικοινωνίες)
- **Escape routes** (Διαδρομές διαφυγής)
- **Safety zones** (Ζώνες ασφαλείας)

Η βασική αρχή ήταν ότι όλοι οι πυροσβέστες στο μέτωπο της πυρκαγιάς θα έπρεπε να παρακολουθούν συνεχώς αυτούς τους τέσσερις κρίσιμους παράγοντες ασφαλείας. Η τήρηση του LCES θα πρέπει να αποτελεί προτεραιότητα πριν από οποιαδήποτε επιχειρησιακή δραστηριότητα σε μια δασική πυρκαγιά.

Ο **Οδηγός Τσέπης Απόκρισης σε Περιστατικά του NWCG** (NWCG, 2022) απαριθμεί τα στοιχεία που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε κάθε κατηγορία, τα οποία παραθέτουμε παρακάτω:

1. Παρατηρητής(-ές)

- Έμπειρος, ικανός, αξιόπιστος.
- Επαρκής αριθμός παρατηρητών, τοποθετημένοι σε στρατηγικά σημεία παρατήρησης.
- Γνώση των τοποθεσιών των πληρωμάτων.
- Γνώση των διαδρομών διαφυγής και των ζωνών ασφαλείας.
- Κατανόηση των σημείων ενεργοποίησης.
- Χάρτης, κιτ καιρού, ρολόι, Σχέδιο Δράσης Περιστατικού (IAP).

2. Επικοινωνία(-ες)

- Επιβεβαιωμένες ραδιοσυχνότητες.
- Καθιερωμένες εφεδρικές διαδικασίες και καθορισμένοι χρόνοι επικοινωνίας.
- Παροχή άμεσων ενημερώσεων σε περίπτωση αλλαγής συνθηκών.
- Έγκαιρη ενεργοποίηση συναγερμού – ποτέ καθυστερημένα.

3. Διαδρομές διαφυγής

- Περισσότερες από μία διαθέσιμες διαδρομές διαφυγής.
- Αποφυγή απότομων, ανηφορικών διαδρομών.
- Διερεύνηση για αστάθειες εδάφους, βράχια και πυκνή βλάστηση.
- Χρονομέτρηση λαμβάνοντας υπόψη τον πιο αργό πυροσβέστη, την κόπωση και τις θερμικές συνθήκες.
- Σαφής σήμανση για χρήση τόσο την ημέρα όσο και τη νύχτα.
- Εκτίμηση του χρόνου διαφυγής σε σύγκριση με τον ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς.
- Στρατηγική στάθμευση των οχημάτων για διευκόλυνση της διαφυγής.

4. Ζώνες ασφαλείας

- Επιβίωση χωρίς την ανάγκη χρήσης καταφυγίου πυρκαγιάς.
- Υποχώρηση σε ήδη καμένη, ασφαλή περιοχή.
- Χρήση φυσικών χαρακτηριστικών (π.χ. βραχώδεις εκτάσεις, υδάτινες περιοχές, λιβάδια).
- Αξιοποίηση κατασκευασμένων περιοχών (π.χ. αποψιλωμένες εκτάσεις, δρόμοι, χώροι προσγείωσης ελικοπτέρων).
- Προηγούμενη αξιολόγηση του μεγέθους και των κινδύνων των ζωνών ασφαλείας.
- Λήψη υπόψη παραγόντων όπως ανηφορικό έδαφος, υπήνεμες περιοχές και βαριά καύσιμα – καθένας από αυτούς τους παράγοντες αυξάνει την έκθεση στη θερμότητα, συνεπώς απαιτείται μεγαλύτερη ζώνη ασφαλείας.
- Με διάφορες προσαρμογές, το **σύστημα LCES** αποτελεί πλέον το **βασικό πρωτόκολλο ασφαλείας** που εφαρμόζεται παγκοσμίως. Θεωρείται ως μια **απλοποιημένη προσέγγιση** των **10 Τυποποιημένων Εντολών Καταπολέμησης Πυρκαγιάς**, επικεντρώνοντας την προσοχή στα **ουσιώδη στοιχεία ασφαλείας**.

Το **2001**, οι **Thorburn & Alexander** πρότειναν την προσθήκη ενός **"A"** στο πρωτόκολλο **LCES**, ενσωματώνοντας τα **Anchor Points** (Σημεία Αγκύρωσης), έπειτα από ένα θανατηφόρο ατύχημα στην **Αλμπέρτα του Καναδά το 1995**. Οι συγγραφείς ορίζουν το **σημείο αγκύρωσης** ως ένα **εμπόδιο στην εξάπλωση της πυρκαγιάς**, το οποίο χρησιμοποιείται ως σημείο εκκίνησης για τις επιχειρήσεις καταστολής, με σκοπό τη **μείωση της πιθανότητας εγκλωβισμού** από τη φωτιά.

Αυτό το νέο πρωτόκολλο, το **LACES**, υιοθετήθηκε από την **Υπηρεσία Προστασίας από Πυρκαγιές της Αλμπέρτα**, καθώς και από πολλές άλλες πυροσβεστικές υπηρεσίες εκτός των **ΗΠΑ**, κυρίως σε **μεσογειακές χώρες**.

Το **LACES** ακολουθεί μια **διαδοχική εφαρμογή**:

- Οι **Lookouts** (**Παρατηρητές**) παρακολουθούν την πυρκαγιά από ένα **Anchor Point** (**Σημείο Αγκύρωσης**).
- Στη συνέχεια, **Communicate** (**Επικοινωνούν**) σημαντικές παρατηρήσεις στα πληρώματα.
- Σε περίπτωση κινδύνου, οι πυροσβέστες χρησιμοποιούν τις **Escape Routes** (**Διαδρομές Διαφυγής**) για να φτάσουν σε μια **Safety Zone** (**Ζώνη Ασφαλείας**).

Το **τελευταίο στοιχείο**, η **ζώνη ασφαλείας**, είναι **ύψιστης σημασίας** για τη διασφάλιση μιας **ασφαλούς υποχώρησης** σε περίπτωση κινδύνου. Θεωρητικά, μια **ζώνη ασφαλείας** είναι μια **προσχεδιασμένη περιοχή καταφυγίου**, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί **χωρίς την ανάγκη χρήσης καταφυγίων πυρκαγιάς**, σε περίπτωση εγκλωβισμού (**Page & Butler, 2017**).

Η **επιλογή μιας ζώνης ασφαλείας** δεν είναι πάντα εύκολη διαδικασία. Για τον σκοπό αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφορα **μοντέλα** (**Butler & Cohen, 1998; Butler, 2014**) και **κατευθυντήριες γραμμές** (**Green & Schimke, 1971; Butler & Cohen, 1998b**), που βοηθούν στον προσδιορισμό της **ασφαλούς απόστασης διαχωρισμού** (**Safe Separation Distance - SSD**).

Παραθέτουμε μία από τις **πιο πρόσφατες προτάσεις** του **Butler (2018)**, στην οποία συνδυάζει **κλίση, ταχύτητα ανέμου και ύψος καυσίμων**, ώστε να αξιολογηθεί η **SSD** που πρέπει να τηρείται για να θεωρείται μια περιοχή **ασφαλής**. Η **SSD** υπολογίζεται με τη **Δ εξίσωση**, όπου το **Δ** είναι ο **παράγοντας κλίσης-ανέμου**, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 8**.

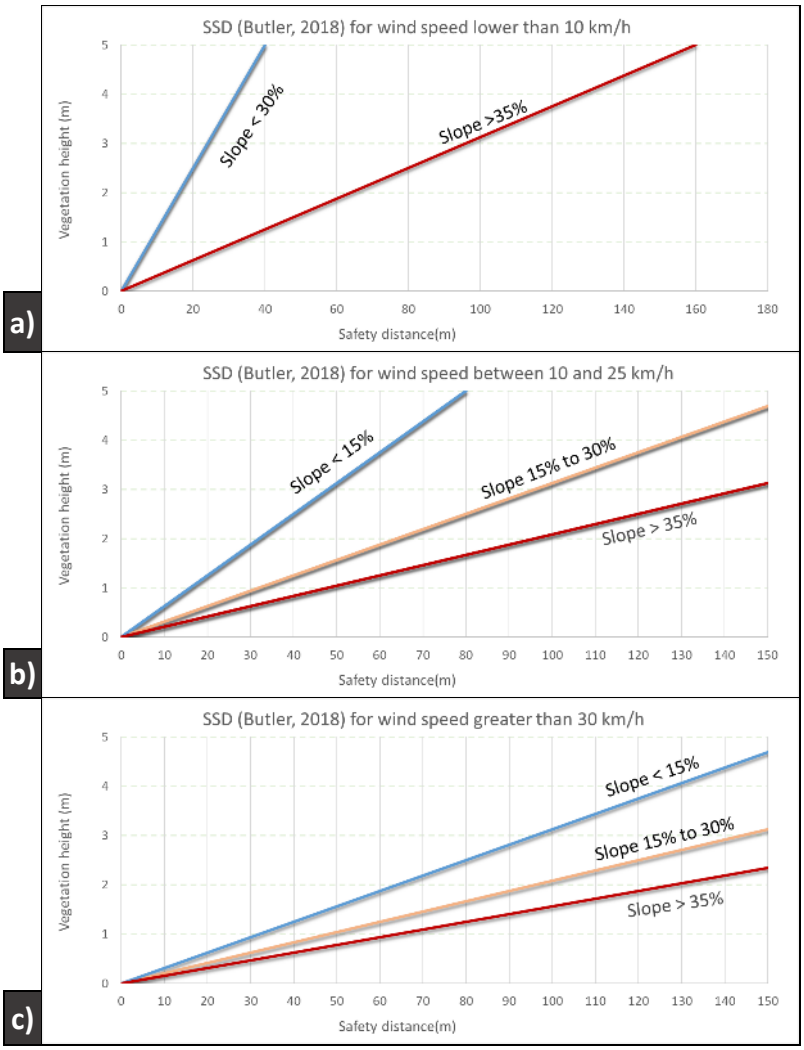
SSD (*Safe Separation Distance*) = 8 x fuel heigh x Δ Εξίσωση 2

Η Εικόνα 10 απεικονίζει τη διακύμανση της SSD με την κλίση και τον άνεμο, σύμφωνα με την παραπάνω διατύπωση.

Πίνακας 8. Παράγοντας κλίσης-ανέμου (Δ) για υπολογισμό SSD σε διαφορετικά ύψη βλάστησης (Butler, 2018).

Slope-Wind factor (Δ)	**Terrain slope (%)**		
Wind speed (km/h)	Flat (<15%)	15-30%	>35%
Weak (0-10)	**1/0.7/0.7**	**1/1/1**	**4/2/2**
Moderate (10-25)	**2/1/1**	**4/2/1**	**6/3/2**
Strong (>30)	**4/2/2**	**6/3/2**	**8/3/2**

Fuel < 3m / 3m > Fuel > 15m / Fuel > 15m



Εικόνα 10. SSD για α) ασθενή άνεμο, β) μέτριο άνεμο και γ) ισχυρό άνεμο, για τις 3 κατηγορίες κλίσης στη διατύπωση. (Butler, 2018)

7.3.3. Πρόσθετες συστάσεις για πυρκαγιές σε πλαγιές

Οι **Lahaye et al. (2018b)** ανέλυσαν **103 περιστατικά εγκλωβισμού** πυροσβεστών σε δασικές πυρκαγιές παγκοσμίως, με τη **μεγαλύτερη συγκέντρωση** περιστατικών στη **Νότια Ευρώπη** (**Lahaye et al., 2018c**) και στην **Αυστραλία** (**Lahaye et al., 2018d**). Διαπίστωσαν ότι το **40% των εγκλωβισμών** συνέβησαν όταν οι ομάδες επιχειρούσαν **σε πλαγιά με κλίση άνω των 20°**, πάνω από τη γραμμή της φωτιάς. Επιπλέον, η ίδια μελέτη έδειξε ότι το **30% των εγκλωβισμών** έλαβαν χώρα **σε πλαγιές επιρρεπείς σε πλευρική εξάπλωση της πυρκαγιάς** λόγω **στροβιλισμών**, ιδίως σε περιπτώσεις όπου η φωτιά εξαπλωνόταν **προς τα κάτω**, με **κλίση άνω των 20°** και **ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη από 20 km/h** (**J. J. Sharples et al., 2012**).

Ως αποτέλεσμα, αυτές οι **δύο κρίσιμες καταστάσεις προσοχής** έχουν πλέον ενσωματωθεί **στις εκπαιδεύσεις των αναλυτών συμπεριφοράς πυρκαγιών** σε **Νέα Νότια Ουαλία (Αυστραλία) και Γαλλία** από το **2023**.

Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί η **"Λίστα Ελέγχου Κατασκευής Αντιπυρικής Γραμμής σε Κατηφορική Κλίση"** του **NWCG των ΗΠΑ (NWCG, 2022)**. Η καταπολέμηση μιας δασικής πυρκαγιάς **σε κατηφορική πλαγιά**, με τη φωτιά να βρίσκεται **από κάτω**, αποτελεί **εξαιρετικά επικίνδυνη συνθήκη** και θα πρέπει **να αποφεύγεται εκτός αν είναι απολύτως**

απαραίτητο. Σε περιπτώσεις όπου δεν μπορεί να αποφευχθεί, απαιτείται **εφαρμογή επιπρόσθετων προληπτικών μέτρων**. Η λίστα ελέγχου βασίζεται στο **πρωτόκολλο LCES**, ενσωματώνοντας επίσης **Σημεία Αγκύρωσης (Anchor Points)** σε δύο σημεία. Με βάση αυτό, παραθέτουμε μια προσαρμογή της λίστας ελέγχου του **NWCG (2022)**

Βασικά Σημεία Ασφαλούς Εργασίας σε Κατηφορική Κλίση

Διασφάλιση σαφούς κατανόησης των αποστολών: Οι εργασίες πρέπει να συζητούνται εκ των προτέρων με τον επόπτη και τους επικεφαλής των ομάδων. Οι υπεύθυνοι θα πρέπει **να παραμείνουν στο σημείο** μέχρι την ολοκλήρωση των επιχειρήσεων.

Προσεκτική αξιολόγηση του σημείου εργασίας: Η τοποθεσία πρέπει **να διερευνηθεί λεπτομερώς** και η σκοπιμότητα της εργασίας να επιβεβαιωθεί **από τον επόπτη ή τους επικεφαλής των ομάδων** πριν από την έναρξη οποιασδήποτε επιχείρησης.

Εφαρμογή του LACES: Το πρωτόκολλο πρέπει **να συντονιστεί πλήρως** για όλο το εμπλεκόμενο προσωπικό.

Εξασφάλιση συνεχούς οπτικής επαφής με τη φωτιά: Ο επόπτης της ομάδας πρέπει **να βρίσκεται σε άμεση επικοινωνία** με τον παρατηρητή που έχει οπτική επαφή με τη φωτιά.

Αποτελεσματική επικοινωνία: Πρέπει να καθιερωθεί **συνεχής επικοινωνία** μεταξύ όλων των επιχειρησιακών μονάδων.

Πρόσβαση σε ζώνες ασφαλείας: Θα πρέπει **να εξασφαλίζεται γρήγορη διαφυγή** σε περίπτωση που η φωτιά εξαπλωθεί **κάτω από την ομάδα**.

Διατήρηση σημείου αγκύρωσης: Οι επιχειρήσεις θα πρέπει **να ξεκινούν από αγκυρωμένο σημείο**, ιδίως όταν κατασκευάζεται **αντιπυρική γραμμή από την κορυφή προς τα κάτω**.

Χρήση άμεσης επίθεσης: Εφόσον είναι **εφικτό**, συνιστάται **άμεση επίθεση στη φωτιά**. Εάν αυτό δεν είναι δυνατό, η αντιπυρική γραμμή **θα πρέπει να ολοκληρωθεί πλήρως μεταξύ των σημείων αγκύρωσης πριν από την καύση**.

Αποφυγή επικίνδυνων μορφολογικών χαρακτηριστικών: Αντιπυρικές γραμμές **δεν πρέπει** να κατασκευάζονται **εντός ή κοντά σε χοάνες ή καμινάδες**, καθώς αυτές οι περιοχές μπορούν **να ενισχύσουν την εξάπλωση της φωτιάς**.

Επιτήρηση του κάτω μέρους της φωτιάς: Εάν υπάρχει πιθανότητα η φωτιά να εξαπλωθεί, θα πρέπει να ληφθούν **προληπτικά μέτρα** για την ασφάλιση του άκρου της φωτιάς.

Για να **συνοψίσουμε**, παρά τους **κανόνες, τις λίστες ελέγχου και τα εργαλεία** που έχουν αναπτυχθεί για την ασφάλεια των επιχειρήσεων, η **ατομική και συλλογική ασφάλεια** πρέπει να αποτελεί πάντα **την ύψιστη προτεραιότητα**. Σε αυτό το πλαίσιο, είναι σημαντικό να υπενθυμίσουμε **τρεις από τους πιο σημαντικούς "Κανόνες Εμπλοκής για την Επιβίωση των Πυροσβεστών"**, οι οποίοι έχουν εκδοθεί από το **Τμήμα Ασφάλειας, Υγείας και Επιβίωσης της Διεθνούς Ένωσης Αρχηγών Πυροσβεστικής των ΗΠΑ (IAFC, 2016)**.

Κανόνες Επιβίωσης για Πυροσβέστες (IAFC, 2016)

- **Μην διακινδυνεύετε τη ζωή σας για ζωές ή περιουσίες που δεν μπορούν να σωθούν.**
- **Επεκτείνετε περιορισμένο ρίσκο για την προστασία σημαντικών περιουσιακών στοιχείων.**
- **Επεκτείνετε επαγρύπνηση και μετρημένο ρίσκο για τη διάσωση ανθρώπινων ζωών.**

Αυτές οι αρχές αποτυπώνουν το **πνεύμα της επιχειρησιακής ασφάλειας**, διασφαλίζοντας ότι **οι ζωές των πυροσβεστών προστατεύονται** κατά τη διάρκεια επιχειρήσεων κατάσβεσης δασικών πυρκαγιών.

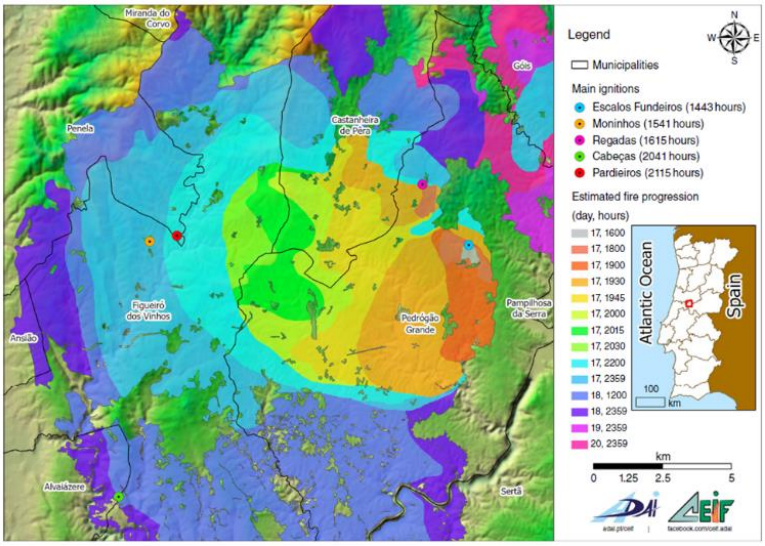
8. Μελέτες Περιπτώσεων

8.1. Μεγάλες πυρκαγιές

8.1.1. Πυρκαγιά Pedrógão Grande

Η καταστροφική πυρκαγιά που ξέσπασε το **απόγευμα της 17ης Ιουνίου 2017** κοντά στο **Pedrógão Grande (PG)** καταγράφηκε ως η **χειρότερη δασική πυρκαγιά στην ιστορία της Πορτογαλίας**. Η φωτιά κατέκαψε περίπου **45.000 εκτάρια βλάστησης και δασικής γης**, προκαλώντας **τον θάνατο 66 ανθρώπων**. Η περιγραφή αυτού του γεγονότος βασίζεται στις μελέτες των **Viegas et al. (2017) και Viegas et al. (2023)**.

Η πυρκαγιά προκλήθηκε από **ηλεκτρική γραμμή 15 kV** και ξέσπασε **σε δύο ξεχωριστές τοποθεσίες**, οι οποίες **απείχαν 3 km μεταξύ τους** (**Εικ. 11**). Η **αλληλεπίδραση μιας καταιγίδας** με αυτές τις δύο εστίες αποτέλεσε κρίσιμο παράγοντα στην **ταχεία εξάπλωση** της πυρκαγιάς. Η αλληλεπίδραση αυτή έχει αναλυθεί διεξοδικά από τους **Pinto et al. (2022)**, οι οποίοι χρησιμοποίησαν δεδομένα από **μετεωρολογικούς σταθμούς, δορυφόρους και ραντάρ**.



Εικόνα 11. Χάρτης της Πορτογαλίας και της περιοχής της πυρκαγιάς του Pedrógão Grande με τα σημεία έναρξης της πυρκαγιάς και την εξάπλωση της πυρκαγιάς. (εικονογράφηση των συγγραφέων))

Ως αποτέλεσμα αυτής της αλληλεπίδρασης, οι δύο **ανεπαρκώς επανδρωμένες** πυρκαγιές **τέθηκαν εκτός ελέγχου**. Οι **εξαιρετικά ασυνήθιστες μετεωρολογικές συνθήκες** που προέκυψαν οδήγησαν στη **συγχώνευση των δύο εστιών πυρκαγιάς** κατά τη διάρκεια της **νύχτας** της ίδιας ημέρας, ένα φαινόμενο που είναι γνωστό ως **"Πυρκαγιά Συμβολής" (Junction Fire)** (**Viegas et al., 2012; Raposo et al., 2018**).

Αυτό το φαινόμενο συνοδεύεται από **ισχυρές διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας**, που επιταχύνουν σημαντικά την **εξάπλωση της πυρκαγιάς**. Στην περίπτωση του **Pedrógão Grande**,

η συγχώνευση των δύο πυρκαγιών **είχε τραγικές συνέπειες**, καθώς **66 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους μέσα σε μόλις δύο ώρες**.

Η επέκταση της πυρκαγιάς συνοδεύτηκε από την **ανάπτυξη μιας ιδιαίτερα υψηλής στήλης καπνού** και **βίαιες ατμοσφαιρικές μεταφορές θερμότητας**, όπως αναλύθηκε στους **Viegas et al. (2017)**. Αυτή η μελέτη υπογραμμίζει τη **σημαντική επίδραση της συγχώνευσης** των δύο εστιών στη συνολική εξέλιξη της πυρκαγιάς **PG**. Πιο συγκεκριμένα, αποδεικνύει ότι **η εξέλιξη της πυρκαγιάς θα ήταν εντελώς διαφορετική αν είχε εκδηλωθεί μόνο μία από τις δύο εστίες**.



Εικόνα 12. Απόψεις της στήλης της πυρκαγιάς του Escalos Fundeiros στις 18:00 και στις 18:15, δείχνοντας την αλληλεπίδραση με την καθοδική ροή που παράγεται από τη mesoscale ατμοσφαιρική ροή μεταφοράς.

Έναρξη και Εξάπλωση της Πυρκαγιάς

Η **πυρκαγιά του Pedrógão Grande (PG)** ξέσπασε στην περιφέρεια **Leiria**, στην **κεντρική Πορτογαλία** (**Εικ. 11**), κατά τη διάρκεια μιας **έντονης ξηρασίας**, με **θερμοκρασίες αέρα που ξεπερνούσαν τους 40°C** και **εξαιρετικά χαμηλή σχετική υγρασία**. Ο άνεμος στην περιοχή **έπνεε από τα βορειοδυτικά (ΒΔ)**, αλλά **δεν ήταν ιδιαίτερα ισχυρός**.

Ένα **ευρείας κλίμακας μεσοκλιματικό σύστημα μεταφοράς** αναπτύχθηκε πάνω από τη **δυτική Ιβηρική Χερσόνησο**, κινούμενο **δυτικά-βορειοδυτικά (Δ-ΒΔ)**. Αυτό το σύστημα προκάλεσε **πολλαπλές πυρκαγιές** λόγω **κεραυνών**, αλλά **στις 14:30** (τοπική ώρα, UTC+1), όταν ξεκίνησε η πυρκαγιά PG, το πιο ενεργό τμήμα του συστήματος βρισκόταν ακόμα **περίπου 100 km μακριά**. Επιπλέον, **δεν καταγράφηκαν ηλεκτρικές εκκενώσεις στην περιοχή της πυρκαγιάς μέχρι τις 18:00** (**Pinto et al., 2022**).

Η **πυρκαγιά PG** πυροδοτήθηκε από **δύο εστίες**:

- Η πρώτη εμφανίστηκε **κοντά στο Escalos Fundeiros (EF) στις 14:30**
- Η δεύτερη **κοντά στο Regadas (RE) στις 15:40**

Και οι δύο εστίες **προκλήθηκαν από επαφή ηλεκτρικής γραμμής με το φύλλωμα δέντρων** κάτω ή πολύ κοντά σε αυτές. Οι δύο τοποθεσίες **απέχουν 3,2 km**, όμως ο δρόμος που τις συνδέει **δεν ήταν προσβάσιμος σε βαριά πυροσβεστικά οχήματα**.

Δεδομένου ότι στην περιοχή **υπήρχαν και άλλες εστίες πυρκαγιάς**, οι πυροσβεστικοί πόροι ήταν **κατακερματισμένοι**, με αποτέλεσμα να **μην υπάρχουν επαρκή επίγεια και εναέρια μέσα** για να ανακόψουν την **ταχεία εξάπλωση της πυρκαγιάς EF**. Μέχρι τις **15:30**, η φωτιά **παρήγαγε καύτρες** και **απειλούσε σπίτια στο χωριό EF**.

Όταν η πυρκαγιά RE εντοπίστηκε, **δεν υπήρχαν διαθέσιμοι πόροι** για να επιχειρήσουν εκεί, με αποτέλεσμα **η φωτιά να αφεθεί ανεξέλεγκτη**.

Μεταξύ **18:00 και 18:15**, μια **καθοδική ροή** από το **μεσοκλιματικό σύστημα (MSC)**—το οποίο **δεν είχε ακόμη φτάσει στην περιοχή της πυρκαγιάς**—προκάλεσε **κλίση της στήλης καπνού προς τα νοτιοδυτικά (ΝΔ)**, **επιταχύνοντας την εξάπλωση των φλογών** σε μια **ευρεία περιοχή**. Από εκείνη τη στιγμή, **ο έλεγχος της πυρκαγιάς κατέστη πρακτικά αδύνατος**.

Αυτή η διαδικασία **καταγράφηκε διαρκώς** από **κάμερες βίντεο** εγκατεστημένες στον **Πυροσβεστικό Σταθμό του PG**. Στην **Εικ. 2**, παρουσιάζονται **δύο καρέ** από την κάμερα με **προσανατολισμό προς βορρά**, που καταγράφηκαν στις **18:00 και 18:15**. Η **σύνθετη αλληλεπίδραση της καταιγίδας και της πυρκαγιάς** μελετήθηκε διεξοδικά μέσω **μεθόδων όπως ραντάρ και αισθητήρες εδάφους** (**Pinto et al., 2022**).

Η πυρκαγιά **EF** κινήθηκε προς την **πόλη του Pedrógão Grande**, **σαρώνοντας** μεγάλο αριθμό χωριών. Ταυτόχρονα, η **πυρκαγιά RE**, παρότι μικρότερη, **βγήκε εντελώς εκτός ελέγχου** και εξαπλώθηκε **προς τα βορειοδυτικά (ΒΔ)**. Οι δύο φωτιές ενώθηκαν, σχηματίζοντας **μια μεγάλη λαβίδα** και ένα **καμπύλο μέτωπο μήκους άνω των 20 km**, το οποίο απειλούσε μια **κυκλική περιοχή διαμέτρου 10 km**. Στην περιοχή ζούσαν **εκατοντάδες άνθρωποι**, οι οποίοι βρέθηκαν **αντιμέτωποι με μια εξαιρετικά βίαιη και ισχυρή πυρκαγιά** (**Εικ. 11**).

Συγχώνευση των Δύο Πυρκαγιών

Υπάρχουν **ενδείξεις** ότι **μετά τις 19:30**, οι δύο πυρκαγιές **είχαν πλησιάσει η μία την άλλη σε πολύ κοντινή απόσταση**, σχηματίζοντας μια **μικρή γωνία μεταξύ τους**. Αυτή η **διάταξη** δημιούργησε τις **ιδανικές συνθήκες για συγχώνευση** μέσω του φαινομένου **Πυρκαγιάς Συμβολής (Junction Fire)**, το οποίο έχει μελετηθεί εκτενώς από τους **Viegas et al. (2012), Raposo et al. (2018) και Ribeiro et al. (2023)**.

Μεταξύ **19:30 και 20:30**, η **διαδικασία συγχώνευσης** προκάλεσε **πολύ ισχυρούς ανέμους** στην περιοχή μπροστά από το μέτωπο της φωτιάς. Ο **ρυθμός εξάπλωσης (Rate of Spread - ROS)** της πυρκαγιάς ήταν περίπου **14 km/h**.

Η **ταχεία καύση** ενός **τεράστιου όγκου βλάστησης** οδήγησε στη δημιουργία μιας **στήλης μεταφοράς καπνού** που **έφτασε τα 12.000 μέτρα ύψος** στις **20:10** και **παρέμεινε σε αυτό το επίπεδο για αρκετές ώρες**.

Καταγράφηκαν **φλόγες μήκους 50-100 μέτρων**, οι οποίες **διαχωρίζονταν από τη βλάστηση**, δημιουργώντας **θερμικές συνθήκες κοντά στο έδαφος παρόμοιες με εκείνες ενός φούρνου**.

Υπάρχουν **αναφορές** ότι **ομάδες δέντρων άρχισαν να καίγονται από τις κορυφές προς τα κάτω**, ενώ **άτομα που βρίσκονταν στην περιοχή βρέθηκαν σε απόλυτο σκοτάδι** και ανέφεραν ότι **ο αέρας ήταν γεμάτος από φλεγόμενες μπάλες φωτιάς**.

Επιπλέον, **κομμάτια ξύλου, κλαδιά και φλοιός δέντρων** εκσφενδονίζονταν ανεξέλεγκτα, προκαλώντας **νέες εστίες πυρκαγιάς**.

Σε τουλάχιστον **δύο περιοχές**, **ανεμοστρόβιλοι φωτιάς ξερίζωσαν και έσπασαν** πολλά δέντρα με **διάμετρο άνω των 20 εκατοστών**, σαν να επρόκειτο για **οδοντογλυφίδες**.

Η ταχύτητα του ανέμου που απαιτείται για να προκληθεί αυτό το φαινόμενο **εκτιμάται στα 200 km/h**.

Παρόμοια φαινόμενα παρατηρήθηκαν κατά τη συγχώνευση των πυρκαγιών **McIntyre και Bendora** κοντά στην **Καμπέρα**, στις **18 Ιανουαρίου 2003**. Σε εκείνη την περίπτωση, η φωτιά εξαπλώθηκε **με ρυθμό 27 km/h**, ενώ **ένας ανεμοστρόβιλος φωτιάς** έσπασε δέντρα **διαμέτρου άνω των 30 εκατοστών** (**Doogen, 2006**).

Η **ένταση της πυρκαγιάς** ήταν **εκκωφαντική**, καθώς **οι βροντερές φλόγες** που υψώνονταν απειλητικά δημιούργησαν **ακραίες θερμικές και ατμοσφαιρικές συνθήκες**.

Ο **θόρυβος** και το **απειλητικό θέαμα** ώθησαν πολλούς κατοίκους να **εγκαταλείψουν τα σπίτια τους**, **παρά το γεγονός ότι γνώριζαν πως τα περισσότερα από αυτά μπορούσαν να αντέξουν τη διέλευση της πυρκαγιάς**—κάτι που **όντως συνέβη** στην πλειονότητα των περιπτώσεων.

Κατά τη διάρκεια της **διαφυγής με αυτοκίνητα**, πολλοί πολίτες—μερικές φορές **ολόκληρες οικογένειες**—παγιδεύτηκαν στον **πυκνό καπνό**, την **απουσία ορατότητας** και τις **φλόγες**, χάνοντας τη ζωή τους.

Ιδιαίτερα **τραγική** ήταν η κατάσταση σε **τμήμα 200 μέτρων** του **δρόμου N326-1**, μεταξύ **Figueiró dos Vinhos** και **Castanheira de Pêra**, όπου **30 άτομα** σκοτώθηκαν **μέσα ή κοντά στα οχήματά τους**.

Η **έλλειψη συντήρησης της βλάστησης**—συμπεριλαμβανομένων των **δέντρων δίπλα στους κύριους οδικούς άξονες**—επέτεινε **τις συνθήκες υψηλού κινδύνου**, **μειώνοντας σημαντικά** τις πιθανότητες **επιβίωσης** των πολιτών.

Κατά την **ανάλυση του συμβάντος**, εντοπίστηκε **ένα συγκεκριμένο πεύκο**, το οποίο **ήταν πολύ κοντά στην άκρη του δρόμου** και **κατακρημνίστηκε λόγω των ισχυρών ανέμων** που προκλήθηκαν από την πυρκαγιά, **φράζοντας ολόκληρο το οδόστρωμα**.

Το πεσμένο **δέντρο**, σε συνδυασμό με **οχήματα που συγκρούστηκαν μεταξύ τους**, δημιούργησε **μια θανατηφόρα παγίδα**, καθιστώντας **αδύνατη** τη **διαφυγή των οδηγών**.

Σύμφωνα με **μαρτυρίες επιζώντων και διερχόμενων οδηγών**, τουλάχιστον **16 άτομα έχασαν τη ζωή τους εξαιτίας αυτού του συγκεκριμένου δέντρου**.

Η **κύρια πυρκαγιά τέθηκε υπό έλεγχο** στις **22 Ιουνίου, στις 23:50**, μετά από **έντονη προσπάθεια περισσότερων από 1.400 πυροσβεστών** και άλλων δυνάμεων, έχοντας **καταστρέψει συνολικά 45.328 εκτάρια γης**.

8.1.2. Πυρκαγιά Garrocho (Serra da Estrela)

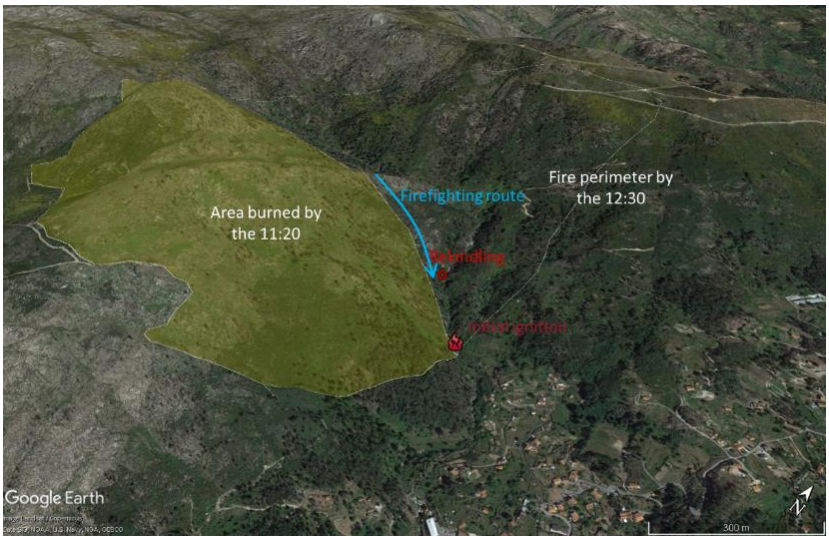
Η πυρκαγιά Garrocho/Serra da Estrela στην Πορτογαλία είναι αξιοσημείωτη για τα επιχειρησιακά μαθήματα που προσφέρει. Αυτή η δασική πυρκαγιά ξεχωρίζει για το μέγεθός της, καλύπτοντας περίπου 25.000 εκτάρια, και τη διάρκειά της, παραμένοντας ενεργή για 12 ημέρες, από τις 6 Αυγούστου έως τις 17 Αυγούστου 2023, με πλήρη κατάσβεση στις 3 Σεπτεμβρίου 2023. Ευτυχώς, δεν υπήρξαν θύματα, αλλά οι κύριες επιπτώσεις περιελάμβαναν ζημιές σε αρκετά κτίρια και την επίδραση σε μια μεγάλη προστατευόμενη φυσική περιοχή.

Ο συναγερμός για την πυρκαγιά δόθηκε στις 01:18 στις 6 Αυγούστου 2023, και από την αρχή, οι προσπάθειες πυρόσβεσης αντιμετώπισαν σημαντικές προκλήσεις λόγω της

περιορισμένης πρόσβασης στο έδαφος, ιδιαίτερα επιδεινωμένη κατά τη διάρκεια της νύχτας. Παρά το γεγονός ότι φαινόταν σχεδόν υπό έλεγχο σε διάφορες περιπτώσεις, απρόβλεπτα περιστατικά διέκοψαν την εφαρμοσμένη στρατηγική. Δύο από αυτά τα περιστατικά θα περιγραφούν εν συντομία, με πολύτιμα μαθήματα προς εκμάθηση.

Εκρηκτική πυρκαγιά σε φαράγγι, που πυροδοτήθηκε από επιχείρηση ελικοπτέρου

Γύρω στις 10:23 της πρώτης ημέρας, ένα ελικόπτερο πυρόσβεσης έφτασε στη σκηνή της πυρκαγιάς, αποβιβάζοντας μια ομάδα οκτώ μελών. Με την υποστήριξη εναέριων ρίψεων νερού από το ελικόπτερο, η ομάδα ξεκίνησε την επίγεια πυρόσβεση, κατεβαίνοντας την πλαγιά με σκοπό να ελέγξει αυτή την πλευρά στη βάση του φαραγγιού (Εικόνα 13).



Εικόνα 13. Επιχειρησιακή κατάσταση στις 11:30 στις 6 Αυγ 23. (εικονογράφηση των συγγραφέων)

Η δεξαμενή ανεφοδιασμού του ελικοπτέρου βρισκόταν μόλις 5 χιλιόμετρα από το σημείο ρίψης, αλλά σε υψόμετρο περίπου 600 μέτρα υψηλότερα, γεγονός που περιόριζε σημαντικά την αυτονομία και τον χρόνο λειτουργίας του ελικοπτέρου. Μετά από περίπου μία ώρα, η επίγεια ομάδα, με την υποστήριξη του ελικοπτέρου, είχε σχεδόν φτάσει στον πυθμένα της πλαγιάς. Το υπόλοιπο της περιμέτρου της πυρκαγιάς ήταν σχεδόν ελεγχόμενο, με μόνο ένα μικρό τμήμα κοντά στη βάση του φαραγγιού να παραμένει ενεργό. Ωστόσο, το ελικόπτερο χρειαζόταν ανεφοδιασμό πριν από την ολοκλήρωση της αποστολής.

Σύμφωνα με το επιχειρησιακό δόγμα, το ελικόπτερο έπρεπε να ανακτήσει την ομάδα του πριν αποχωρήσει για ανεφοδιασμό. Αυτή η ανάκτηση πραγματοποιήθηκε κοντά στη γραμμή του νερού στη βάση του φαραγγιού, όπου βρισκόταν η επίγεια ομάδα, αποφεύγοντας έτσι την ανάγκη ανάβασης της πλαγιάς. Μαρτυρίες ανέφεραν ότι η αναταραχή που προκλήθηκε από το ελικόπτερο κατά την ανάκτηση της ομάδας αναζωπύρωσε την πυρκαγιά στην περιοχή, μεταφέροντας το μέτωπο της φωτιάς στην απέναντι πλαγιά του φαραγγιού. Σε αυτό το σημείο, σημειώθηκε ένα επεισόδιο εκρηκτικής συμπεριφοράς της πυρκαγιάς (Εικόνα 14), οδηγώντας στην απώλεια ελέγχου της κατάστασης που ήταν σχεδόν υπό έλεγχο.

Αυτό το περιστατικό παρείχε δύο κύρια μαθήματα. Πρώτον, ο καθορισμός της αυτονομίας των εναέριων μέσων θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο την απόσταση μεταξύ των σημείων ανεφοδιασμού και της ζώνης επέμβασης στην πυρκαγιά, αλλά και τη διαφορά υψομέτρου μεταξύ αυτών των τοποθεσιών. Δεύτερον, οι χειριστές των εναέριων μέσων πρέπει να επιδεικνύουν προσοχή στις επιχειρήσεις τους, ώστε να αποτρέπουν την ατμοσφαιρική

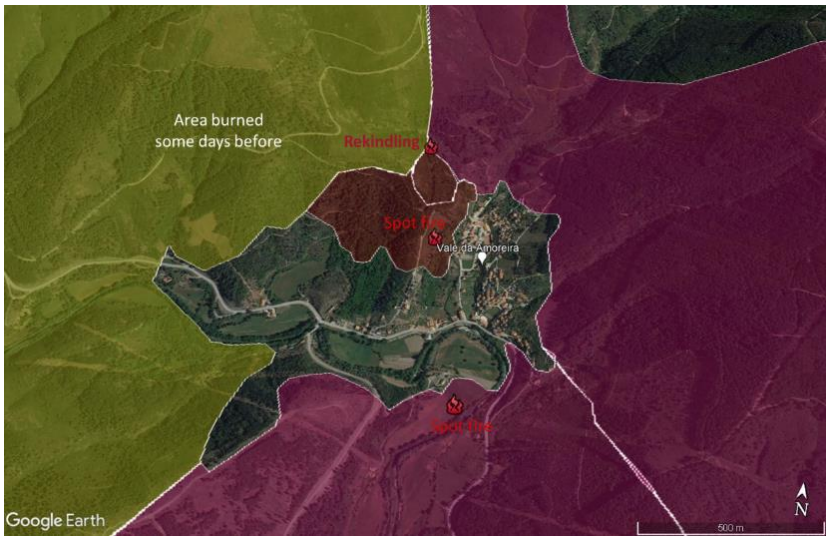
αναταραχή που προκαλείται φυσικά από το αεροσκάφος, ειδικά τα ελικόπτερα, κοντά στο μέτωπο της πυρκαγιάς και σε ευαίσθητα ή κρίσιμα σημεία.

Αναζωπύρωση στο Vale da Amoreira

Μεταξύ 12 και 14 Αυγούστου 2023, η πυρκαγιά είχε επεκταθεί, περιβάλλοντας μια καμένη έκταση 9.000 εκταρίων, και εξαπλωνόταν αργά, σχεδόν υπό έλεγχο. Όλα τα μέτωπα βρίσκονταν υπό ενεργή επιτήρηση και υπολειμματική συντήρηση κατάσβεσης, εκτός από ένα θερμό σημείο στα βορειοανατολικά, όπου η πυρόσβεση προχωρούσε ευνοϊκά. Στις 15 Αυγούστου, στις 15:44, η πυρκαγιά ταξινομήθηκε ως "υπό επίλυση".

Το χωριό Vale da Amoreira ήταν μία από τις κρίσιμες περιοχές λόγω αρκετών αναζωπυρώσεων που καταγράφηκαν εκεί και της πιθανότητας επέκτασης του μετώπου της πυρκαγιάς. Στη βορειοδυτική πλαγιά του χωριού, όπου αργότερα σημειώθηκε απότομη αναζωπύρωση, η πυρκαγιά είχε φτάσει λίγες μέρες νωρίτερα, σταματώντας στα μισά της πλαγιάς και αφήνοντας το κατώτερο μέρος άκαυτο. Για την ενοποίηση της καμένης περιμέτρου, δημιουργήθηκε μια αντιπυρική ζώνη στα μισά της πλαγιάς με τη χρήση μπουλντόζας. Υπήρχε επίσης ένα σημείο συγκέντρωσης πυροσβεστών στο Vale da Amoreira, οδηγώντας σε αυξημένους πόρους στην περιοχή.

Στις 15:47 της 15ης Αυγούστου, μόλις τρία λεπτά μετά την ταξινόμηση του περιστατικού ως επιλυμένου, σημειώθηκε ισχυρή αναζωπύρωση στο Vale da Amoreira, ανοίγοντας γρήγορα τρία μέτωπα πυρκαγιάς που προχωρούσαν σε διαφορετικές κατευθύνσεις, κυρίως λόγω των ετερογενών τοπικών ανέμων που προκαλούνταν από την τραχεία τοπογραφία της περιοχής. Σύμφωνα με τη μαρτυρία ενός πολίτη που παρατήρησε την εξέλιξη αυτού του επεισοδίου από την απέναντι πλαγιά, η αναζωπύρωση συνέβη σε μια περιοχή με σημαντική συσσώρευση ξηρής βλάστησης. Ως απάντηση, ένα ελικόπτερο αιωρήθηκε κοντά στην τοποθεσία, με αποτέλεσμα την ξαφνική διεύρυνση του μετώπου της φλόγας και την εμφάνιση σπινθήρων που προβάλλονταν κάτω από την πλαγιά, πέρα από την αντιπυρική ζώνη που είχε δημιουργηθεί από τις μπουλντόζες, η οποία δεν είχε ακόμη καεί. Δεν υπάρχουν λεπτομέρειες για τον ελιγμό του ελικοπτέρου, αλλά άλλοι κάτοικοι του Vale da Amoreira επιβεβαίωσαν αυτή τη μαρτυρία. Από εκείνη τη στιγμή έως τις 17 Αυγούστου, η κατάσταση ξέφυγε και πάλι από τον έλεγχο, προκαλώντας την εξάπλωση της πυρκαγιάς με μεγάλη ένταση προς τα ανατολικά, προσθέτοντας άλλα 6.000 εκτάρια στην προηγουμένως καμένη περιοχή.



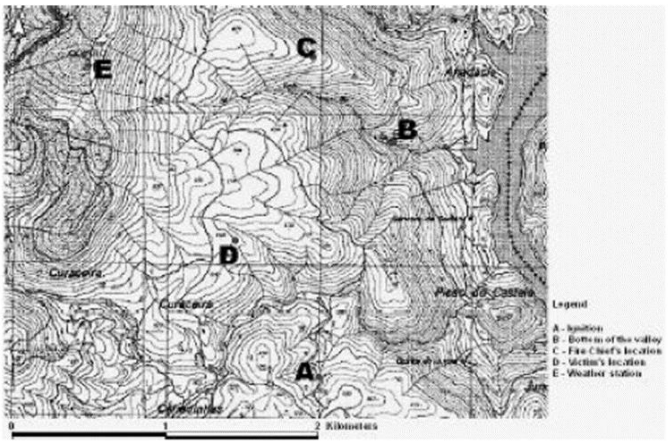
Εικόνα 14. Επιχειρησιακή κατάσταση στις 15 Αυγ 23. (εικονογράφηση των συγγραφέων)

Από το συγκεκριμένο επεισόδιο μπορούν να εξαχθούν διάφορα διδάγματα. Πρώτον, επιβεβαιώνεται και ενισχύεται το μάθημα από το προηγούμενο περιστατικό, υπογραμμίζοντας τον κίνδυνο που ενέχει η αναταραχή που προκαλείται από τα ελικόπτερα, γεγονός που απαιτεί επιχειρησιακές εκτιμήσεις αυτών των πιθανών επιπτώσεων. Δεύτερον, αφορά τη στάση των επιχειρησιακών δυνάμεων, οι οποίες, αν και βρίσκονταν πολύ κοντά στο σημείο της αναζωπύρωσης, ενδέχεται να είχαν χαλαρώσει λόγω της ευνοϊκής εξέλιξης της πυρόσβεσης και της μετάβασής της στη φάση επίλυσης. Τέλος, οι επιχειρήσεις ενοποίησης στα μισά της πλαγιάς θα πρέπει να αποφεύγονται, καθώς πυρακτωμένα καύσιμα, ωθούμενα από τον άνεμο, μπορεί να κυλήσουν προς τα κάτω, προκαλώντας νέες αναφλέξεις στο άκαυτο μέρος. Σε αυτή την περίπτωση, θα ήταν απαραίτητη είτε μια επιχείρηση τακτικής πυρκαγιάς για να επεκταθεί η καμένη περιοχή μέχρι τον πυθμένα της πλαγιάς είτε συνεχής και αποτελεσματική επιτήρηση της πλαγιάς για άμεση δράση, κάτι που δεν συνέβη.

8.2. Ατυχήματα

8.2.1 - Ατύχημα του Freixo de Espada a Cinta

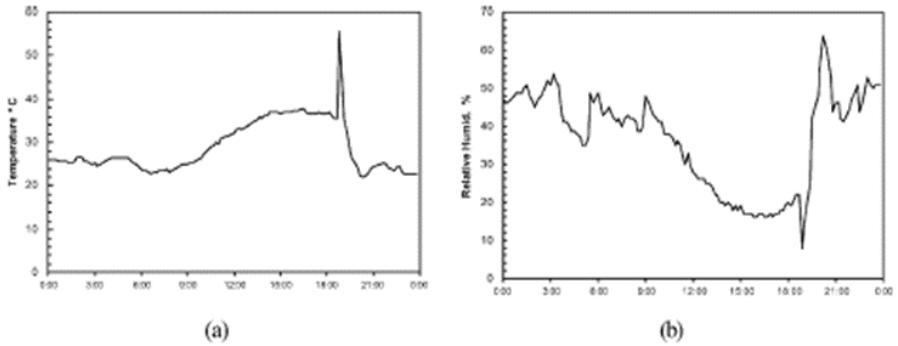
Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού του 2003, μεταξύ των διάφορων θανατηφόρων ατυχημάτων που συνέβησαν στην Πορτογαλία, σημειώνεται ένα στο Freixo de Espada-à-Cinta στις 5 Αυγούστου (βλ. Viegas, 2004a), όπου δύο άτομα έχασαν τη ζωή τους λόγω μιας ξαφνικής έκρηξης πυρκαγιάς στην ευρεία πλαγιά που αναπτύχθηκε στην όχθη του ποταμού Douro, στα βορειοανατολικά της Πορτογαλίας, ακριβώς στα σύνορα με την Ισπανία (Εικόνα 15). Η περιοχή ενδιαφέροντος για την παρούσα μελέτη καλυπτόταν από επιφανειακή βλάστηση, αποτελούμενη από μείγμα χόρτων, θάμνων και μερικών γεωργικών πεδίων. Η πυρκαγιά, που ξεκίνησε στις 14:30, σημειώνεται στο χάρτη ως σημείο Α. Οι πυροσβέστες προσπάθησαν να διατηρήσουν την πυρκαγιά στο κατώτερο μέρος της πλαγιάς, επιτρέποντάς της να καεί προς την κατεύθυνση της όχθης του ποταμού. Όταν έφτασε στο σημείο Β, η πυρκαγιά ήταν πρακτικά υπό έλεγχο, με μόνο ένα μικρό τμήμα, λιγότερο από 50 μέτρα της γραμμής πυρκαγιάς, να απομένει για κατάσβεση. Σε αυτό το στάδιο, ο επικεφαλής της πυρόσβεσης, που βρισκόταν στο σημείο C με ένα μηχάνημα δημιουργίας αντιπυρικής ζώνης, ενημέρωσε τους ανωτέρους του ότι η πυρκαγιά ήταν υπό έλεγχο. Ξαφνικά, η πυρκαγιά άρχισε να εξαπλώνεται πολύ γρήγορα προς τα πάνω στην πλαγιά ενός φαραγγιού πάνω από το σημείο Β (βλ. Εικόνα 15) και εξερράγη κατά μήκος ολόκληρης της πλαγιάς, φτάνοντας στην κορυφή μέσα σε λίγα λεπτά.



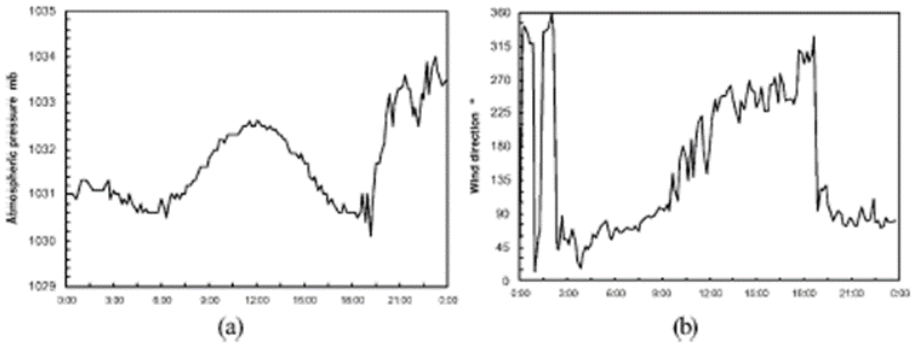
Εικόνα 15 Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής της πυρκαγιάς του Freixo. Ο βορράς υποδεικνύεται από το λευκό βέλος στην πάνω αριστερή γωνία της εικόνας

Ένα ζευγάρι, που επιθεωρούσε την ασφάλεια της περιουσίας του στο σημείο D, αρκετά μακριά από την πυρκαγιά και θεωρητικά εκτός κινδύνου, παγιδεύτηκε από την ξαφνική έκρηξη και έχασε τη ζωή του. Περισσότερες λεπτομέρειες για αυτό το ατύχημα υπάρχουν στη βιβλιογραφία (Viegas, 2004a). Στην κορυφή της πλαγιάς, στο σημείο E, υπήρχε ένας μετεωρολογικός σταθμός στην πορεία του μετώπου της πυρκαγιάς. Χάρη σε μια αντιπυρική ζώνη στην κορυφογραμμή, οι αισθητήρες του δεν καταστράφηκαν - αν και η θερμότητα έβλαψε τις προστασίες τους - και τα δεδομένα που καταγράφονταν κάθε 10 λεπτά ανακτήθηκαν.

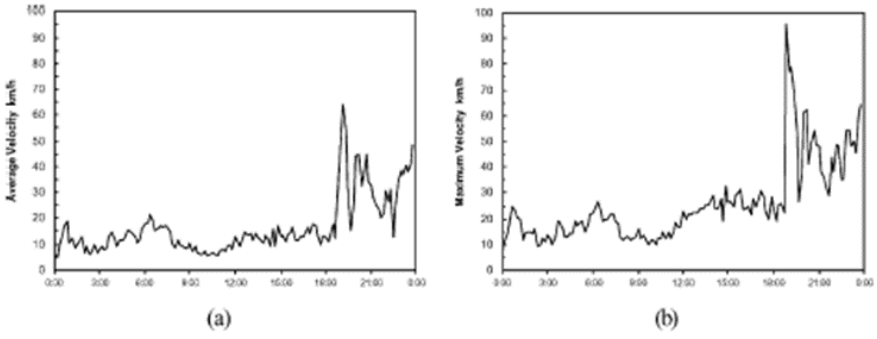
Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα, της σχετικής υγρασίας, της ατμοσφαιρικής πίεσης, της διεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου στις 5 Αυγούστου παρουσιάζονται στις Εικόνες 16-18. Όπως φαίνεται, γύρω στις 18:30, όλες οι καταγραφές δείχνουν πολύ ανώμαλη συμπεριφορά: η θερμοκρασία (μέσοι όροι 10 λεπτών) ανέβηκε στους 55,5°C, η σχετική υγρασία έπεσε στο 8%, η μέση ταχύτητα του ανέμου αυξήθηκε στα 63,8 χλμ/ώρα, ενώ η μέγιστη (σε περιόδους 10 λεπτών) έφτασε τα 96 χλμ/ώρα.



Εικόνα 16 (α) Θερμοκρασία αέρα και (β) σχετική υγρασία στο Freixo κατά τη διάρκεια της 5ης Αυγούστου 2003.



Εικόνα 17 - (α) Ατμοσφαιρική πίεση και (β) διεύθυνση ανέμου στο Freixo κατά τη διάρκεια της 5ης Αυγούστου 2003.



Εικόνα 18 - (α) Μέση ταχύτητα ανέμου δεκαλέπτου και (β) μέγιστη ταχύτητα ανέμου στο Freixo κατά τη διάρκεια της 5ης Αυγούστου 2003..

Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό αυτών των καταγραφών είναι η αιφνίδια αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου στις 18:40, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3β. Ο άνεμος, που προηγουμένως έπνεε από τα βορειοδυτικά (327º) προς τα κάτω της πλαγιάς με μέση ταχύτητα 12,2 χλμ/ώρα, στράφηκε ξαφνικά προς νότο-νοτιοδυτικά (95º έως 120º), δηλαδή προς τα πάνω της πλαγιάς από τον πυθμένα της κοιλάδας του ποταμού, και μέσα σε 30 λεπτά η ταχύτητά του αυξήθηκε σε περίπου 64 χλμ/ώρα, με ριπές που έφτασαν τα 96 χλμ/ώρα.

Αυτή η καταγραφή αποτελεί σαφή ένδειξη ότι η έκρηξη της πυρκαγιάς προκάλεσε ανέμους με ταχύτητες της τάξης των 100 χλμ/ώρα, οι οποίες δεν μπορούν να εξηγηθούν από άλλα ατμοσφαιρικά φαινόμενα, παρά μόνο από την αλληλεπίδραση μεταξύ της πυρκαγιάς και της ροής του αέρα που προκαλείται από την πλαγιά. Παρόλο που δεν υπάρχει οπτική καταγραφή του συμβάντος, οι περιγραφές των μαρτύρων συμφωνούν σε μια ξαφνική επιτάχυνση της πυρκαγιάς από τον πυθμένα του φαραγγιού προς την κορυφή της πλαγιάς και πέραν αυτής. Η προαναφερθείσα απώλεια δύο ζωών αποτελεί θλιβερή απόδειξη αυτής της απρόβλεπτης συμπεριφοράς της πυρκαγιάς.

Το μαθηματικό μοντέλο που πρότεινε ο Viegas (2005) χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της χρονικής εξέλιξης της πυρκαγιάς και της ταχύτητας του ανέμου που προκλήθηκε κατά τη διάρκεια της έκρηξης, με αποτελέσματα που έδειξαν ταχύτητες της τάξης των 113 χλμ/ώρα, πολύ κοντά στις παρατηρήσεις.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτό είναι ένα από τα ελάχιστα παραδείγματα πραγματικών περιστατικών ατυχημάτων σε φαράγγια, όπου υπάρχουν λεπτομερείς μετεωρολογικές καταγραφές πολύ κοντά στην πυρκαγιά, οι οποίες τεκμηριώνουν και επιβεβαιώνουν τις υποθέσεις που έγιναν κατά την ανάπτυξη του μοντέλου για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς σε φαράγγια.

8.2.2 - Ατύχημα του Famalicão da Serra (Πορτογαλία) 2006

Αυτή η αναφορά βασίζεται στους Viegas et al. (2009).

Εισαγωγή

Στις 9 Ιουλίου 2006, έξι πυροσβέστες έχασαν τη ζωή τους ενώ επιχειρούσαν να κατασβέσουν μεγάλη πυρκαγιά κοντά στο χωριό Famalicão da Serra, στην περιφέρεια Guarda, Κεντρική Πορτογαλία. Πέντε από τα θύματα ήταν Χιλιανοί επαγγελματίες πυροσβέστες που εργάζονταν για την Afocelca, ιδιωτική εταιρεία αφιερωμένη στην προστασία δενδροφυτειών που ανήκουν σε πορτογαλικές εταιρείες κυτταρίνης. Το έκτο θύμα ήταν Πορτογάλος εθελοντής πυροσβέστης από την τοπική πυροσβεστική υπηρεσία του Gonçalo, ο οποίος συνεργαζόταν με την ομάδα.

Το τραγικό αυτό συμβάν είχε τεράστιο αντίκτυπο, όχι μόνο λόγω του αριθμού των θυμάτων και των συνθηκών του ατυχήματος, αλλά και επειδή μια ολόκληρη ομάδα ξένων επαγγελματιών πυροσβεστών χάθηκε εξαιτίας της πυρκαγιάς

Περιγραφή του ατυχήματος

Περιβαλλοντικές συνθήκες

Η πυρκαγιά εκδηλώθηκε σε πλαγιά της Serra da Estrela, με θέα σε μια κοιλάδα όπου βρίσκεται το μικρό χωριό Famalicão. Το κατώτερο τμήμα της πλαγιάς καλυπτόταν από

γεωργικές εκτάσεις με χορτολιβαδική και άλλη ελαφριά καύσιμη βλάστηση, ενώ το ανώτερο τμήμα ήταν καλυμμένο με ώριμο πευκοδάσος, προστατευμένο από μια ευρεία αντιπυρική ζώνη. Οι καιρικές συνθήκες εκείνη την ημέρα ήταν ακραίες, με θερμοκρασίες στους 35°C, σχετική υγρασία 15% και ελαφρύ άνεμο από ανατολικο-νοτιοανατολική κατεύθυνση, σύμφωνα με τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού του Meimoa.



Εικόνα 19. Γενική άποψη της περιοχής της πυρκαγιάς του Famalicão. Η προέλευση της πυρκαγιάς ήταν κοντά στο κάτω κέντρο της εικόνας. Το ατύχημα συνέβη στο φαράγγι στο κέντρο της φωτογραφίας.(Viegas et al. 2009)

Εναρξη πυρκαγιάς και αρχική επέμβαση

Η πυρκαγιά εκδηλώθηκε σε μια πλαγιά της Serra da Estrela με θέα την κοιλάδα όπου βρίσκεται το μικρό χωριό Famalicão. Το κατώτερο τμήμα της πλαγιάς ήταν καλυμμένο με γεωργικές εκτάσεις, αποτελούμενες από χορτολιβαδική και άλλη ελαφριά καύσιμη βλάστηση, ενώ το ανώτερο τμήμα καλυπτόταν από ώριμο πευκοδάσος, το οποίο προστατευόταν από μια ευρεία αντιπυρική ζώνη.

Οι καιρικές συνθήκες την ημέρα εκείνη ήταν ακραίες, με θερμοκρασίες που έφταναν τους 35ºC, σχετική υγρασία 15% και ελαφρύ άνεμο που έπνεε από ανατολικές-νοτιοανατολικές διευθύνσεις, σύμφωνα με τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού του Meimoa.

Η πυρκαγιά ξεκίνησε κατά λάθος στις 12:30 σε ένα αγρόκτημα, λόγω σπινθήρων που προκλήθηκαν όταν οι λεπίδες μιας μηχανής κοπής χόρτων χτύπησαν σε πέτρες. Παρόλο που δύο άτομα στην περιοχή προσπάθησαν να κατασβέσουν την αρχική εστία χρησιμοποιώντας έναν πυροσβεστήρα αυτοκινήτου, οι προσπάθειές τους απέτυχαν, και η πυρκαγιά εξαπλώθηκε γρήγορα στο αγρόκτημα και ανέβηκε στην πλαγιά.

Ένα ελαφρύ όχημα του τοπικού τμήματος Εθελοντών Πυροσβεστών του Gonçalo στάλθηκε αμέσως και έφτασε σε έναν αγροτικό δρόμο πάνω από το σημείο εκκίνησης της πυρκαγιάς. Η έκταση της πυρκαγιάς ξεπέρασε τις δυνατότητές τους και διέσχισε τον δρόμο αυτό. Με τη βοήθεια της κλίσης της πλαγιάς και του ανέμου, η πυρκαγιά εξαπλώθηκε προς την κορυφή του βουνού. Αυτή η ομάδα αποχώρησε και κατευθύνθηκε προς την κορυφή, όπου μια άλλη ομάδα πυροσβεστών, καθώς και αρκετοί ιδιοκτήτες δασών και πολίτες, εργάζονταν ήδη προσπαθώντας να προστατεύσουν το πευκοδάσος.

Δόθηκε συναγερμός και, μεταξύ άλλων μέσων, στάλθηκαν δύο ομάδες ελικοπτέρων στην πυρκαγιά. Η μία ήταν της Εθνικής Πολιτικής Προστασίας και προσγειώθηκε κοντά στη βάση της πυρκαγιάς, στη δεξιά πλευρά της. Λόγω της τραχύτητας του εδάφους σε αυτή την περιοχή και της μεγάλης ποσότητας καυσίμου, η καταστολή αυτής της πλευράς δεν επιτεύχθηκε πλήρως.

Με την άφιξη περισσότερων πυροσβεστικών οχημάτων, αυτή η ομάδα αποχώρησε πρακτικά τη στιγμή που συνέβη το ατύχημα.

Η άλλη ομάδα, που μεταφέρθηκε με ελικόπτερο, ήταν της Afocelca και αποτελούνταν από πέντε Χιλιανούς πυροσβέστες. Προσγειώθηκαν σε έναν δρόμο κοντά στην κορυφή της πλαγιάς, στο όριο του πευκοδάσους που έπρεπε να προστατεύσουν.

Η πυρκαγιά είχε ήδη εισέλθει στο πευκοδάσος ως πλευρική πυρκαγιά που κινούνταν αντίθετα προς τον άνεμο και είχε κάψει την περιοχή που φαίνεται στην Εικόνα 1, η οποία σχηματίζεται από τις δύο αντιπυρικές ζώνες και τη σειρά των καμένων πεύκων.

Η ομάδα άρχισε να εργάζεται με χειροκίνητα εργαλεία, δημιουργώντας μια γραμμή προς τα κάτω από τον δρόμο, κατά μήκος της σειράς των καμένων πεύκων και στα αριστερά της. Ο διοικητής τους διέταξε έναν πυροσβέστη της τοπικής ταξιαρχίας του Gonçalo να βοηθήσει την ομάδα των Χιλιανών πυροσβεστών στην καταστολή της πυρκαγιάς. Η θέση τους φαινόταν ασφαλής, και η ομάδα προχωρούσε γρήγορα προς τα κάτω στην πλαγιά, σβήνοντας τις σχετικά μικρές φλόγες που προκαλούνταν από τις πευκοβελόνες που έκαιγαν αντίθετα προς τον άνεμο.

Εγκλωβισμός από την πυρκαγιά

Μετά από μερικά λεπτά, γύρω στις 13:30, σημειώθηκε μια ξαφνική αλληλουχία εκρήξεων πυρκαγιάς κάτω από τη θέση της ομάδας, με αποτέλεσμα η φωτιά να εξαπλωθεί στις κορυφές των δέντρων, σχηματίζοντας τρεις λωρίδες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 19. Ακολούθησε γενικός συναγερμός, και όσοι βρίσκονταν κοντά στον δρόμο διέφυγαν κατά μήκος της κορυφογραμμής προς τη δεξιά πλευρά. Κατά τη διαφυγή, υπήρξαν καύτρες, με μερικά άτομα να υφίστανται ελαφρά εγκαύματα.

Η ομάδα των έξι πυροσβεστών που βρίσκονταν στη μέση της πλαγιάς αποφάσισε να απομακρυνθεί από την κορυφιαία πυρκαγιά προς την αριστερή πλευρά της κύριας εστίας. Κατευθύνθηκαν κατά μήκος του δρόμου προς το κέντρο του μεγάλου φαραγγιού όπου βρίσκονταν.

Άγνωστο σε αυτούς, το κάτω μέρος της πυρκαγιάς δεν είχε κατασταλεί στο έδαφος λόγω της δυσκολίας πρόσβασης. Μόνο ένα ελικόπτερο έριχνε νερό στην αριστερή πλευρά της φωτιάς κοντά στον πυθμένα, χωρίς υποστήριξη από το έδαφος.

Ενώ η ομάδα απομακρυνόταν από την κύρια εστία, η αριστερή πλευρά της φωτιάς εισήλθε στη ρεματιά και στην πλαγιά στη δεξιά πλευρά του φαραγγιού. Μέσα σε λίγα λεπτά, η πυρκαγιά εξερράγη κατά μήκος αυτής της πλαγιάς, αποκόπτοντας τη διαδρομή διαφυγής της ομάδας. Όταν ο δρόμος φτάνει στη ρεματιά, υπάρχει μια ανοιχτή περιοχή χωρίς βλάστηση. Εκεί, η ομάδα χωρίστηκε στα δύο. Ο Πορτογάλος πυροσβέστης αποφάσισε να παραμείνει στην περιοχή και βρήκε καταφύγιο σε ένα χαντάκι στην άκρη της αντιπυρικής ζώνης.

Οι πέντε Χιλιανοί άφησαν τον εξοπλισμό που ακόμη κουβαλούσαν και, ακολουθώντας την εντολή του αρχηγού τους, κατευθύνθηκαν προς τα πάνω, προσπαθώντας να ξεφύγουν από τους δύο τοίχους φωτιάς που τους πλησίαζαν. Το έδαφος προς αυτή την κατεύθυνση ήταν αρκετά τραχύ, με αναβαθμίδες και εμπόδια ύψους τεσσάρων έως πέντε μέτρων. Ένας από τους πυροσβέστες κατάφερε να σκαρφαλώσει τέσσερις από αυτές και να φτάσει σε απόσταση 60 μέτρων από το σημείο εκκίνησης.

Η ισχυρή μεταφορά που προκλήθηκε από την εκρηκτική πυρκαγιά στην αριστερή πλαγιά ανάγκασε τη φωτιά στο πευκοδάσος να συγκλίνει πάνω από την ομάδα, η οποία είχε καταβληθεί εντελώς από τον καπνό και τη φωτιά.

Το σώμα του Πορτογάλου πυροσβέστη βρέθηκε άκαυτο, λόγω της προστατευτικής επίδρασης του πέτρινου χαντακιού όπου βρήκε καταφύγιο. Οι πέντε Χιλιανοί πυροσβέστες επίσης έχασαν τη ζωή τους στη μέση του πευκοδάσους. Μερικοί από αυτούς είχαν προσπαθήσει να χρησιμοποιήσουν αναπνευστικές συσκευές, αλλά μάταια.

Προσομοίωση Πυρκαγιάς

Υπήρχε η γενική πεποίθηση ότι η αιτία του εγκλωβισμού ήταν μια ξαφνική αλλαγή στην κατεύθυνση του ανέμου, όμως δεν υπήρχε απόδειξη γι' αυτό στις καταγραφές του ανέμου.

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της πυρκαγιάς στο φαράγγι του Famalicão στο Μεγάλο Τραπέζι Φαραγγιού DE4 του Εργαστηρίου Έρευνας Πυρκαγιών (LEIF) του Πανεπιστημίου της Coimbra στη Lousã. Η βασική γεωμετρία του φαραγγιού αναπαράχθηκε, χρησιμοποιώντας άχυρο ως στρώμα καυσίμου. Μια γραμμική πυρκαγιά ανάφλεξης τοποθετήθηκε για να προσομοιώσει τη θέση της αριστερής πλευράς της κύριας πυρκαγιάς όταν η Χιλιανή Ταξιαρχία εισήλθε στην περιοχή. Η πυρκαγιά εξαπλώθηκε αργά, διευρύνοντας τις πλευρές της μέχρι να φτάσει στη ρεματιά. Όταν αυτό συνέβη, εξερράγη και έκαψε την αριστερή πλευρά του φαραγγιού σε λίγα δευτερόλεπτα.

Αυτή η προσομοίωση έδειξε ότι η μεταφορά που προκλήθηκε από την πυρκαγιά προκάλεσε την ξαφνική αλλαγή στη συμπεριφορά της, η οποία ερμηνεύτηκε ως αποτέλεσμα αλλαγής του ανέμου. Η αλληλουχία εικόνων από τις δοκιμές δείχνει τη δραματική επιτάχυνση της πυρκαγιάς όταν εισέρχεται στην αριστερή πλαγιά του φαραγγιού, χωρίς να υπάρχουν επιδράσεις ανέμου μέσα στο εργαστήριο κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη περίπτωσης αφορά την τραγική απώλεια έξι πυροσβεστών, οι οποίοι παγιδεύτηκαν από μια πυρκαγιά που εξερράγη σε ένα φαράγγι. Μια κατάσταση που φαινόταν ασφαλής και μια σχεδόν συνηθισμένη επιχείρηση καταστολής πυρκαγιάς μετατράπηκε σε θανάσιμη παγίδα. Θα μπορούσε να υποστηριχθεί ότι η χρήση καταφυγίων πυρκαγιάς ενδέχεται να είχε σώσει τις ζωές αυτών των ανδρών, αλλά αυτό δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί με βεβαιότητα.

Η προσομοίωση του ατυχήματος στο Εργαστήριο Πυρκαγιών παρήγαγε πειστικά αποτελέσματα σχετικά με τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς κατά τη διάρκεια του εγκλωβισμού. Έδειξε ότι δεν απαιτούνταν καμία αλλαγή στην κατεύθυνση του ανέμου για να εξηγηθεί η ξαφνική επιτάχυνση της πυρκαγιάς στην αριστερή πλευρά του φαραγγιού, η οποία αιφνιδίασε την ομάδα των έξι πυροσβεστών.

Βιβλιογραφία

Abouali, A., Viegas, D. X., & Raposo, J. R. (2021). Analysis of the wind flow and fire spread dynamics over a sloped–ridgeline hill. *Combustion and Flame*, *234*, 111724. https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2021.111724

Adams J. Emergency medicine: clinical essentials. 2nd ed. ed. Philadelphia. Elsevier/Saunders; 2013.

Albini, F. A. (1976). *Estimating wildfire behavior and effects*. USDA Forest Service. General Technical Report GTR INT-30. https://www.fs.fed.us/rm/pubs_int/int_gtr030.pdf

Alexander, M. E. (2008). Latitude considerations in adapting the Canadian Forest Fire Weather Index System for use in other countries. In B. D. Lawson & O. B. Armitage (Eds.), *Weather guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System* (pp. 67–73). Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre.

Alexander, M. E., & Cruz, M. G. (2020). Fireline Intensity. In *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (pp. 453–460). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_52

Almeida, M., Ribeiro, L.M., Alves, D., Viegas, D.X., Vaz Pinto, V., Marques, R., Gomes, A.,

Ballereau, D., Lahaye, S., Romain, M., Salis, M., Arca, B., Bacciu, V., Canu, A., Del Giudice, L., Duce, P., Pellizzaro, G., Stroppiana, D., Ventura, A., Cabiddu, S., Casula, A., Cuccu, G., Pinna, T., Vaccargiu, M., Campesi, S., Casule, F., Chessa, M., Cinus, S., Massidda, P., Peddes, M., Soi, F., Tola, F., Usai, A., Castiglia, C., Dessy, C., Delitala, A., Trudu, P.L., Angotzi, S., Murtas, F., Barone, A.V., Erriu, N., Fresu, G., Melis, G., Fiorucci, P., Pampanoni, V., Laneve, G., Eftychidis, G., Varela, V., Gkotsis, I., Petrou, K., Boustras, G., Senekkis, I., Kirschner, J., Pandey, P., San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Liberta`, G., Boca, R., Maianti, P., Branco, A., Jacome Felix Oom, D., De Rigo, D., Roglia, E., Scionti, N. and Suarez-Moreno, M. (2023). Analysis of 2021 critical wildfire events in the Mediterranean region, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/562495, JRC133972.

Almeida, M., Modarres, M., Muñoz, J. A., & Ribeiro, L. M. (2022). Flammability characteristics of typical garden species. In *Advances in Forest Fire Research 2022* (pp. 602–609). Imprensa da Universidade de Coimbra. https://doi.org/10.14195/978-989-26-2298-9_92

Almeida, M., Porto, L., & Viegas, D. (2021). Characterization of Firebrands Released From Different Burning Tree Species. *Frontiers in Mechanical Engineering*, *7*, 651135. https://doi.org/10.3389/fmech.2021.651135

Alves, D., & et. al. (2018). Calibration of the Canadian FWI system for the territory of Europe. *Advances in Forest Fire Research 2018*, 33–43. https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_3

Alves C, Vicente A, Nunes T, Gonçalves C, Fernandes AP, Mirante F, Tarelho L, Sánchez de la Campa AM, Querol X, Caseiro A, Monteiro C, Evtyugina M, Pio C (2011) Summer 2009 wildfires in Portugal: Emission of trace gases and aerosol composition. Atmospheric Environment 45, 641–649. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.10.031.

Anderson, H. E. (1982). Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. In *USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-122*. lntermt. For. and Range Exp. Stn., Ogden, Utah 84401.

Andrews, P. L. (2014). Current status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System. *International Journal of Wildland Fire*, *23*(1), 21. https://doi.org/10.1071/WF12167

Aragoneses, E., García, M., Salis, M., Ribeiro, L. M., & Chuvieco, E. (2023). Classification and mapping of European fuels using a hierarchical, multipurpose fuel classification system. *Earth System Science Data*, *15*(3), 1287–1315. https://doi.org/10.5194/essd-15-1287-2023

Bradshaw, L. S., Deeming, J. E., Burgan, R. E., & Cohen, J. D. (1984). The 1978 National Fire-Danger Rating System: technical documentation. In *General Technical Report INT-169. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 44 p.* (Vol. 169). https://doi.org/10.2737/INT-GTR-169

Butler, B. W. (2014). A study of the impact of slope and wind on firefighter safety zone effectiveness. *Final Report for JFSP Project 07-2-1-10*, 21.

Butler, B. W. (2018). A review of current status of efforts to reduce firefighter entrapments in the US. *In V Short Course on Fire Safety: "Fire Safety at the WUI", Held at the VIII International Conference on Forest Fire Research*.

Butler, B. W., & Cohen, J. D. (1998a). Firefighter safety zones: A theoretical model based on radiative heating. *International Journal of Wildland Fire*, *8*(2), 73. https://doi.org/10.1071/WF9980073

Butler, B. W., & Cohen, J. D. (1998b). Firefighter safety zones: how big is big enough? *Fire*

Management Notes, *58*(1), 13–16. https://doi.org/10.2307/j.ctvx078wk.11

Byram, G. M. (1959). Combustion of forest fuels. In K. P. Davis (Ed.), *Forest Fire: Control and Use* (pp. 61–89). McGrawHill.

Byram, G. M., & Nelson, R. M. (2015). An analysis of the drying process in forest fuel material. In *e-Gen. Tech. Rep. SRS-200. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station. 45 p.* (Vol. 200). https://doi.org/10.2737/SRS-GTR-200

Carmo, M., Ferreira, J., Mendes, M., Silva, Á., Silva, P., Alves, D., Reis, L., Novo, I., & Xavier Viegas, D. (2022). The climatology of extreme wildfires in Portugal, 1980–2018: Contributions to forecasting and preparedness. *International Journal of Climatology*, *42*(5), 3123–3146. https://doi.org/10.1002/joc.7411

Carvalho A, Monteiro A, Flannigan M, Solman S, Miranda AI, Borrego C (2011) Forest fires in a changing climate and their impacts on air quality. Atmospheric Environment 45, 5545–5553. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.05.010.

Chandler, C. C., Williams, D., Trabaud, L., Thomas, P. H., & Cheney, P. (1983). *Fire in forestry, Volume II. Forest fire management and organization*. John Wiley and Sons.

Chuvieco, E., Aguado, I., Jurdao, S., Pettinari, M. L., Yebra, M., Salas, J., Hantson, S., de la Riva, J., Ibarra, P., Rodrigues, M., Echeverría, M., Azqueta, D., Román, M. V., Bastarrika, A., Martínez, S., Recondo, C., Zapico, E., & Martínez-Vega, F. J. (2014). Integrating geospatial information into fire risk assessment. *International Journal of Wildland Fire*, *23*(5), 606. https://doi.org/10.1071/WF12052

Chuvieco E, Yue C, Heil A, Mouillot F, Alonso-Canas I, Padilla M, Pereira JM, Oom D, Tansey K (2016) A new global burned area product for climate assessment of fire impacts. Global Ecology and Biogeography 25, 619–629. doi:10.1111/geb.12440.

Countryman, C. M. (1982). *Physical Characteristics of Some Northern California Brush Fuels*. 8.

Cruz, M. G. (2005). Guia Fotográfico para Identificação de Combustíveis Florestais - Região Centro de Portugal. *Centro de Estudos Sobre Incêndios Florestais. Associação Para o Desenvolvimento Da Aerodinâmica Industrial. Universidade de Coimbra*.

Cruz, M. G., & Viegas, D. X. (1995). *Forest fuels characterization and modelling. State of the art and methodology*. Deliverable 4.1. PROMETHEUS Project.

Darmenov A, da Silva AM (2015) The Quick Fire Emissions Dataset (QFED) - Documentation of versions 2.1, 2.2 and 2.4.

Davies GM, Gray A, Rein G, Legg CJ (2013) Peat consumption and carbon loss due to smouldering wildfire in a temperate peatland. Forest Ecology and Management 308, 169-177.

De Groot, W. J., Wardati, & Wang, Y. (2005). Calibrating the Fine Fuel Moisture Code for grass ignition potential in Sumatra, Indonesia. *International Journal of Wildland Fire*, *14*(2), 161–168. https://doi.org/10.1071/WF04054

Deeming, J. E., Burgan, R. E., & Cohen, J. D. (1978). *The National Fire Danger Rating System*.

Demling R. H. (2008). Smoke inhalation lung injury: an update. Eplasty, 8, e27.

Dennekamp M, Straney LD, Erbas B, Abramson MJ, Keywood M, Smith K, Sim MR, Glass DC, Del Monaco A, Haikerwal A, Tonkin AM (2015) Forest fire smoke exposures and out-of-hospital cardiac arrests in Melbourne, Australia: A case-crossover study. Environmental Health Perspectives 123, 959–964. doi:10.1289/ehp.1408436.

Doogen M (2006) 'The Canberra Firestorm Inquests and Inquiry into Four Deaths and Four Fires Between 8 and 18 January 2003.' (ACT Coroner's Court: Canberra, ACT)

Dowdy, A. J., Mills, G. A., Finkele, K., Groot, W. De, & De Groot, W. (2009). Australian fire weather as represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index. In *Citeseer* (Issue 10). The Centre for Australian Weather and Climate Research. Technical Report No. 10. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.307.8282&rep=rep1&type=pdf

Drury, S. (2020). Fuel Continuity. In *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (Issue 2009, pp. 513–516). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_239

Edgar, R. A., Sharples, J. J., & Sidhu, H. S. (2016). Examining the effects of convective intensity on plume attachment in threedimensional trenches. Chemeca 2016: Chemical Engineering-Regeneration, Recovery and Reinvention, 613–621.

EFFIS/JRC. (2023). *EFFIS Fire Danger Forecast*.

EFFIS. (2017). *European Fuel Map, 2017, based on JRC Contract Number 384347 on the "Development of a European Fuel Map."* European Commission.

Endorf FW, Gamelli RL. (2007) Inhalation injury, pulmonary perturbations, and fluid resuscitation. Journal of burn care & research: official publication of the American Burn Association. 28(1):80-3.

Fernandes, A. P., Lopes, D., Sorte, S., Monteiro, A., Gama, C., Reis, J., Menezes, I., Osswald, T., Borrego, C., Almeida, M., Ribeiro, L. M., Viegas, D. X., & Miranda, A. I. (2022). Smoke emissions from the extreme wildfire events in central Portugal in October 2017. *International Journal of Wildland Fire*, *31*(11), 989–1001. https://doi.org/10.1071/WF21097

Fernandes, P., Loureiro, C., & Fernandes, M. (2009). Modelos de Combustível Florestal para Portugal. *6º Congresso Florestal Nacional*, *January*, 348–354.

Fernandes, P. M., Botelho, H., Rego, F., & Loureiro, C. (2008). Using fuel and weather variables to predict the sustainability of surface fire spread in maritime pine stands. *Canadian Journal of Forest Research*, *38*(2), 190–201. https://doi.org/10.1139/X07-159

Finney, M. A. (2006). An Overview of FlamMap Fire Modeling Capabilities. *Fuels Management - How to Measure Success: Conference Proceedings*, 213–220.

FIREURISK project (2024). *D3.5 New Dimensions of future fire regimes, extremes and new fire-prone areas*, to be released

FUELMAP Project. (2011). *Final Classification and Mapping of EU Fuel Complexes. Deliverable 2*. FUELMAP Project: Development of a European Fuel Map Based on a Novel Classification Suited to EU Environments -The Fuelmap Project.

Fulton, M. (2024). Electricity pole sparks 'scary' wildfire which spread for five miles. STV News, January 29th 2024. https://news.stv.tv/highlands-islands/lochinver-wildfire-raged-for-five-miles-in-just-three-hours-after-damage-to-power-line-amid-high-winds [Verified February 23rd 2024]

Ganteaume, A., Barbero, R., Jappiot, M., & Maillé, E. (2021). Understanding future changes to fires in southern Europe and their impacts on the wildland-urban interface. Journal of Safety Science and Resilience, 2(1), 20-29. ISSN 2666-4496. doi: 10.1016/j.jnlssr.2021.01.001.

Gill P, Martin RV. (2015) Smoke inhalation injury. BJA Education. 15(3):143-8.

Gleason, P. (1991). LCES - a key to safety in the wildland fire environment. *Fire Management Notes*, *52*(4).

Green, L. R., & Schimke, H. E. (1971). *Guides for fuel-breaks in the Sierra Nevada mixed-conifer type*.

Haikerwal A, Akram M, Sim MR, Meyer M, Abramson MJ, Dennekamp M (2016) Fine particulate matter (PM2.5) exposure during a prolonged wildfire period and emergency department visits for asthma. Respirology 21, 88–94. https://doi.org/10.1111/resp.12613\

Haponik EF, Munster AM. (1990) Respiratory injury: smoke inhalation and burns. New York: McGraw-Hill, Health Professions Division.

Herndon DN. (2018) Total Burn Care (Fifth Edition), Elsevier, ISBN 9780323476614.

Hornby, L. G. (1936). *Fire control planning in the Northern Rocky Mountain Region*.

IAFC. (2016). *Rules of Engagement for Firefighter Survival (training poster)*. International Association of Fire Chiefs (United States Safety, Health and Survival Section). http://iafcsafety.org/image/ROE_Poster.pdf

Ichoku C, Ellison L (2014) Global top-down smoke-aerosol emissions estimation using satellite fire radiative power measurements. Atmospheric Chemistry and Physics 14, 6643–6667. doi:10.5194/acp-14-6643-2014.

ISBI Practice Guidelines Committee; Steering Subcommittee; Advisory Subcommittee. ISBI Practice Guidelines for Burn Care. Burns. 2016 Aug;42(5):953-1021.

Johnston FH, Henderson SB, Chen Y, Randerson JT, Marlier M, DeFries RS, Kinney P, Bowman DMJS, Brauer M (2012) Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. Environmental Health Perspectives 120, 695–701. doi:10.1289/ehp.1104422.

Jones, Matthew W., John T. Abatzoglou, Sander Veraverbeke, Niels Andela, Gitta Lasslop, Matthias Forkel, Adam J. P. Smith, et al. 2022. 'Global and Regional Trends and Drivers of Fire Under Climate Change'. *Reviews of Geophysics* 60 (3): e2020RG000726. https://doi.org/10.1029/2020RG000726.

Kaiser JW, Heil A, Andreae MO, Benedetti A, Chubarova N, Jones L, Morcrette JJ, Razinger M, Schultz MG, Suttie M, Van Der Werf GR (2012) Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. Biogeosciences 9, 527–554. doi:10.5194/bg-9-527-2012.

Keywood M, Cope M, Meyer CPM, Iinuma Y, Emmerson K (2015) When smoke comes to town: The impact of biomass burning smoke on air quality. Atmospheric Environment 121, 13–21. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.03.050.

Kunisaki T., Godwin S. A. (2013) Smoke Inhalation (Cap. 136). In: Emergency Medicine: Clinical Essentials. 2nd Ed. Ed: Adams J. G., Elsevier Saunders, Philadelphia. pp. 1178-1181.

Lafferty KA. Smoke Inhalation Injury 2018. Available from: https://emedicine.medscape.com/article/771194-overview#a3. (consulted September 2022).

Lahaye, S., Miralles, M., Garcia, C., Pages, J., Gallardo, C., Fresu, G., Goldammer, J. G., Pronto, L., Schneider, I., & Oslejsek, P. (2018a). *Fire-In D1.2 Report on current and future common capability challenges (CCCs and FCCCs) #1. Fire-In European project.*

Lahaye, S., Curt, T., Fréjaville, T., Sharples, J., Paradis, L., & Hély, C. (2018b). What are the

drivers of dangerous fires in Mediterranean France? *International Journal of Wildland Fire*, *27*(3), 155. https://doi.org/10.1071/WF17087

Lahaye, S., Sharples, J., Hély, C., & Curt, T. (2018c). Toward safer firefighting strategies and tactics. In D. X. Viegas (Ed.), *Advances in forest fire research 2018* (pp. 1311–1316). Imprensa da Universidade de Coimbra. https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_166

Lahaye, S., Sharples, J., Matthews, S., Heemstra, S., Price, O., & Badlan, R. (2018d). How do weather and terrain contribute to firefighter entrapments in Australia? *International Journal of Wildland Fire*, *27*(2), 85–98. https://doi.org/10.1071/WF17114

Lobert J, Warnatz J (1993) Emissions from the combustion process in vegetation. In P. Crutzen e J. Goldammer - Fire in the environment. The ecological atmospheric, and climatic importance of vegetation fires. Chichester, England: John Wiley and Sons, pp. 15–38.

Lopes, S., Viegas, X. D., Teixeira, L. L., & Viegas, M. T. (2014). Equilibrium moisture content and timelag of dead Pinus pinaster needles. *International Journal of Wildland Fire*, *23*, 721–732. https://doi.org/https://doi.org/10.1071/WF13084

Martins V, Miranda AI, Carvalho A, Schaap M, Borrego C, Sá E (2012) Impact of forest fires on particulate matter and ozone levels during the 2003, 2004 and 2005 fire seasons in portugal. Science of the Total Environment 414, 53–62. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.10.007.

Mayer, C., Mayr, S., Müller, M. M., Vacik, H., Vilà-Vilardell, L., Carrega, P., Duché, Y., & Lahaye, S. (2020). FOREST FIRES IN THE ALPS State of knowledge, future challenges and options for an integrated fire management. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:221758393

McArdle, R. E. (1957). Standard fire fighting orders. *Fire Control Notes*, *18*(4), 151.

McArthur, A. G. (1967). *Fire behaviour in eucalyptus forests*. Forest Research Institute, Forestry and Timber Bureau.

MCFIRE/ADAI. (2022). *Consulta de medições da humidade de combustíveis*.

Miranda, A. I. (2004). An integrated numerical system to estimate air quality effects of forest fires. *International Journal of Wildland Fire*, *13*(2), 217. https://doi.org/10.1071/WF02047

Miranda AI, Borrego C, Viegas D (1994) Forest fire effects on the air quality. In 'Air pollution II, computer simulation'. (Eds JM Baldasano, CABrebbia,HPower, P Zannetti) pp. 191–199. (Computational Mechanics Publications: Southampton, UK)

Miranda AI, Borrego C, Martins H, Martins V, Amorim JH, Valente J, Carvalho A (2009) Forest Fire Emissions and Air Pollution in Southern Europe. 'Earth Obs. Wildl. Fires Mediterr. Ecosyst.' (Ed E Chuvieco) pp. 171–187. (Springer: Berlin, Heidelberg) doi:10.1007/978-3-642-01754-4_12.

Miranda AI, Ferreira J, Valente J, Santos P, Amorim JH, Borrego C (2005) Smoke measurements during Gestosa-2002 experimental field fires. International Journal of Wildland Fire 14, 107–116. doi:10.1071/WF04069.

Miranda AI, Martins V, Cascão P, Amorim JH, Valente J, Tavares R, Borrego C, Tchepel O, Ferreira AJ, Cordeiro CR, Viegas DX, Ribeiro LM, Pita LP (2010) Monitoring of firefighters exposure to smoke during fire experiments in Portugal. Environment International 36, 736–745. doi:10.1016/j.envint.2010.05.009.

Miranda AI, Martins V, Casco P, Amorim JH, Valente J, Borrego C, Ferreira AJ, Cordeiro CR, Viegas DX, Ottmar R (2012) Wildland smoke exposure values and exhaled breath indicators in firefighters. Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues 75, 831–843. doi:10.1080/15287394.2012.690686.

Monteiro A, Corti P, San Miguel-Ayanz J, Miranda AI, Borrego C (2013) The EFFIS forest fire atmospheric emission model: Application to a major fire event in Portugal. Atmospheric Environment 84, 355–362. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.11.059.

Morton RD, Marston CG, O'Neil AW, Rowland CS (2020). Land Cover Map 2018 (20m classified pixels, GB). NERC Environmental Information Data Centre. Available at https://doi.org/10.5285/b3dfc4c7-c9bd-4a02-bed8-46b2a41be04a [Verified 23 February 2024]

Nguyen HM, He J, Wooster M (2023) Biomass burning CO, PM and fuel consumption per unit burned area estimates derived across Africa using geostationary SEVIRI fire radiative power and Sentinel-5P CO data. Atmos. Chem. Phys., 23, 2089–2118, doi.org/10.5194/acp-23-2089-2023.

Niklasson, M. & Granström, A. (2000). Numbers and sizes of fires: long-term spatially explicit fire history in a Swedish boreal landscape. Ecology, 81(6), 1484-1499.

NWCG. (2021a). *Fire Behavior Field Reference Guide*. *PMS 437*.

NWCG. (2021b). *Fuel Moisture Sampling*. National Wildfire Coordinating Group (NWCG).

NWCG. (2022). *NWCG Incident Response Pocket Guide (IRPG), PMS 461* (Issue January). National Wildfire Coordinating Group. https://www.nifc.gov/standards/guides/red-book

Osswald T, Gama C, Fernandes AP, Lopes D, Varela V, Miranda AI (2023). Effects of the wildfires in August 2021 on the air quality of Athens through a numerical simulation. International Journal of Wildland Fire. 32. 10.1071/WF22148.

Ottmar R, Miranda AI, Sandberg D (2009) Characterizing Sources of Emissions from Wildland Fires. In A. Bytnerowicz, M. Arbaugh, A. Riebau, C. Andersen - Wildland fires and air pollution. Developments in Environmental Science, Vol 8, Chapter 3. Amsterdam: Elsevier, pp. 61-78.

Page, W. G., & Butler, B. W. (2017). An empirically based approach to defining wildland firefighter safety and survival zone separation distances. *International Journal of Wildland Fire*, *26*(8), 655–667. https://doi.org/10.1071/WF16213

Patrick, B. (2009). Photo Guide for Estimating Fuel Loading and Fire Behavior in Mixed-Oak Forests of the Mid-Atlantic Region. *General Technical Report*, *NRS-45*. https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-45

Pausas, J. G., Keeley, J. E., & Schwilk, D. W. (2017). Flammability as an ecological and evolutionary driver. *Journal of Ecology*, *105*(2), 289–297. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12691

Peterson, J. 1987. Analysis and reduction of the errors of predicting prescribed burn emissions. Thesis. Seattle: University of Washington. 70 p.

Pinto P, Silva ÁP, Viegas DX, Almeida M, Raposo J, Ribeiro LM (2022) Influence of convectively driven flows in the course of a large fire in Portugal: the case of Pedrógão Grande. *Atmosphere* **13**, 414. doi:10.3390/atmos13030414

PROMETHEUS Project. (2000). *Management techniques for optimization of suppression and minimization of wildfire effects. System Validation. European Commission - Contract number ENV4-CT98-0716.*

Pyne, S. J., Andrews, P. L., & Laven, R. D. (1996). *Introduction to Wildland Fire*. Wiley, New York (USA).

Raposo, J. R., Cabiddu, S., Viegas, D. X., Salis, M., & Sharples, J. (2015). Experimental analysis of fire spread across a two-dimensional ridge under wind conditions. *International Journal*

of Wildland Fire, *24*(7), 1008. https://doi.org/10.1071/WF14150

Raposo, J. R., Viegas, D. X., Xie, X., Almeida, M., Figueiredo, A. R., Porto, L., & Sharples, J. (2018). Analysis of the physical processes associated with junction fires at laboratory and field scales. *International Journal of Wildland Fire*, *27*(1), 52. https://doi.org/10.1071/WF16173

Rea G, Paton-Walsh C, Turquety S, Cope M, Griffith D (2016) Impact of the New South Wales Fires during October 2013 on regional air quality in eastern Australia. Atmospheric Environment, 131, 150-163. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.01.034.

Rego, F. C., Morgan, P., Fernandes, P., & Hoffman, C. (2021). Fire Science. In *Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69815-7

Reid CE, Brauer M, Johnston FH, Jerrett M, Balmes JR, Elliott CT (2016) Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure. Environmental Health Perspectives 124, 1334–1343. doi:10.1289/ehp.1409277.

Rehberg S, Maybauer MO, Enkhbaatar P, Maybauer DM, Yamamoto Y, Traber DL. (2009) Pathophysiology, management and treatment of smoke inhalation injury. Expert review of respiratory medicine. 3(3):283-97.

Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., Palacios-Orueta, A., & Bastarrika, A. (2002). Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, *32*(8), 1301–1315. https://doi.org/10.1139/x02-052

Ribeiro, C., Xavier Viegas, D., Raposo, J., Reis, L., & Sharples, J. (2023). Slope effect on junction fire with two non-symmetric fire fronts. *International Journal of Wildland Fire*, *32*(3), 328–335. https://doi.org/10.1071/WF22152

Ribeiro, L. . (2011). Interface Urbano-Florestal. In D. X. Viegas (Ed.), *Incêndios Florestais*. Verlag Dasshöfer.

Ribeiro, L. M., & Almeida, M. (2020). *Report on real scale experiments. Deliverable D2.1. Wuiview Project*.

Ribeiro, L. M., Rodrigues, A., Lucas, D., & Viegas, D. X. (2020). The Impact on Structures of the Pedrógão Grande Fire Complex in June 2017 (Portugal). *Fire*, *3*(4), 57. https://doi.org/10.3390/fire3040057

Ribeiro, L. M., Viegas, D. X., Almeida, M., Alves, D., Barbosa, T., & Modarres, M. (2021). *Planeamento da gestão de combustíveis: Efeito da distância e da frequência das limpezas na proteção das estruturas e rede viária*. ForestWISE (Coord.) - Projetos AGIF 2021 (P32100231). Vila Real, 160p. https://www.agif.pt/app/uploads/2022/07/Relatório-Projeto-Distancia-e-frequencia-de-intervenções_FW_final_06072022.pdf

Ribeiro, L. M., Viegas, D. X., Almeida, M., McGee, T. K., Pereira, M. G., Parente, J., Xanthopoulos, G., Leone, V., Delogu, G. M., & Hardin, H. (2020). Extreme wildfires and disasters around the world: lessons to be learned. In F. Tedim, V. Leone, & T. McGee (Eds.), *Extreme Wildfire Events and Disasters* (pp. 31–51). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815721-3.00002-3

Rorison DG, McPherson SJ. (1992) Acute toxic inhalations. Emergency medicine clinics of North America. 10(2):409-35.

Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Research Paper INT-115*. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

Schroeder, M. J., & Buck, C. C. (1970). Fire Weather : A Guide for Application of Meteorological Information to Forest Fire Control Operations. In *USDA Forest Service, Agriculture Handbook 360*.

Scott, J. H., & Burgan, R. E. (2005). Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. In *USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR: Vol. RMRS-GTR-1* (Issues 153 RMRS-GTR). https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-153

Sebastião R, Sorte S, Valente J, Miranda AI, Fernandes JM (2019) Detecting changes in the heart rate of firefighters to prevent smoke inhalation and health effects. Evol. Syst. 10, 295–304. https://doi.org/10.1007/s12530-018-9241-0

Sharples, J. J., McRae, R. H. D., & Wilkes, S. R. (2012). Wind-terrain effects on the propagation of wildfires in rugged terrain: Fire channelling. *International Journal of Wildland Fire*, *21*(3), 282–296. https://doi.org/10.1071/WF10055

Sharples, J., Towers, I., Wheeler, G., Wheeler, V., & McCoy, J. (2013). Modelling fire line merging using plane curvature flow. *20th International Congress on Modelling and Simulation*, 256–262.

Sjöström, J. & Granström, A. (2023a). Human activity and demographics drive the fire regime in a highly developed European boreal region. Fire Safety Journal, 136, 103743. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103743

Sjöström, J., & Granström, A. (2023b). A phenology-driven fire danger index for northern grasslands. International journal of wildland fire, 32, 1332-1346.

Sjöström, J. & Granström, A. (2024). Analys av 160 års brandväder i Sverige: Skogsbrandsrisken sedan 1860 för nio lokaler. MSB2300. (Swedish Civil Contingencies Agency, Karlstad). ISBN 978-91-7927-468-9 (In Swedish)

Sofiev M, Vankevich R, Lotjonen M, Prank M, Petukhov V, Ermakova T, Koskinen J, Kukkonen J (2009) An operational system for the assimilation of the satellite information on wild-land fires for the needs of air quality modelling and forecasting. Atmospheric Chemistry and Physics 9, 6833–6847. doi:10.5194/acp-9-6833-2009.

Spinou A, Koulouris NG. (2018) Current clinical management of smoke inhalation injuries: a reality check. The European respiratory journal ; 52(6).

Stec A., Hull T.R. (2010), Fire Toxicity. 1st Ed. Woodhead Publishing Limited. Cambridge.

Thomas, C. ., Sharples, J. ., & Evans, J. . (2017). Modelling the dynamic behaviour of junction fires with a coupled atmosphere–fire model. *International Journal of Wildland Fire*, *26*, 331. https://doi.org/10.1071/WF16079

Thorburn, R. W., & Alexander, M. E. (2001). LACES versus LCES: adopting an "A" for "anchor points" to improve wildland firefighter safety. In Association of Wildland Fire (Ed.), *Proceedings of the 2001 International Wildland Fire Safety Summit* (p. 10). Association of Wildland Fire.

Toon MH, Maybauer MO, Greenwood JE, Maybauer DM, Fraser JF. (2010) Management of acute smoke inhalation injury. Critical care and resuscitation : journal of the Australasian Academy of Critical Care Medicine ; 12(1):53-61.

Turquety S, Menut L, Siour G, Mailler S, Hadji-lazaro J, George M, Clerbaux C, Hurtmans D, Coheur PF (2020) APIFLAME v2.0 biomass burning emissions model: impact of refined input parameters on atmospheric concentration in Portugal in summer 2016. Geoscientific Model Development, 13(7), 2981-3009. doi.org/10.5194/gmd-13-2981-

2020

Urbanski SP (2013) Combustion efficiency and emission factors for wildfire-season fires in mixed conifer forests of the northern Rocky Mountains, US. Atmospheric Chemistry and Physics 13, 7241–7262. doi:10.5194/acp-13-7241-2013.

USDA/Forest Service. (2023). *National Fire Danger Rating System*.

USDA Forest Service. (1957). *Report of Task Force to Recommend Action to Reduce the Chances of Firefighters Being Killed by Burning While Fighting Fire*. https://www.fs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb5393525.pdf

UNISDR. (2009). UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction. In *United Nations International Strategy for Disaster Reduction*. https://doi.org/10.1021/cen-v064n005.p003

Valente J, Miranda AI, Lopes AG, Borrego C, Viegas DX, Lopes M (2007) Local-scale modelling system to simulate smoke dispersion. International Journal of Wildland Fire 16, 196–203. doi:10.1071/WF06085.

van der Kamp, D. W., Moore, R. D., & McKendry, I. G. (2017). A model for simulating the moisture content of standardized fuel sticks of various sizes. *Agricultural and Forest Meteorology*, *236*, 123–134. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.01.013

Van Der Werf GR, Randerson JT, Giglio L, Collatz GJ, Mu M, Kasibhatla PS, Morton DC, Defries RS, Jin Y, Van Leeuwen TT (2010) Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009). Atmospheric Chemistry and Physics 10, 11707–11735. doi:10.5194/acp-10-11707-2010.

Van Wagner, C. E. (1977). Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research*, *7*(1), 23–34. https://doi.org/10.1139/x77-004

Van Wagner, C. E. (1987). Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. In *Forestry*. https://doi.org/19927

Vermina Plathner, F., Sjöström, J., & Granström, A. (2022). Influence of tree species on surface fuel structure in Swedish forests. Advances in Forest Fire Research, 14-18.

Vermina Plathner, F., Sjöström, J., & Granström, A. (2023). Garden structure is critical for building survival in northern forest fires–An analysis using large Swedish wildfires. Safety science, 157, 105928.

Vicente A, Alves C, Monteiro C, Nunes T, Mirante F, Cerqueira M, Calvo A, Pio C (2012) Organic speciation of aerosols from wildfires in central Portugal during summer 2009. Atmospheric Environment 57, 186–196. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.04.030.

Vicente A, Calvo A, Fernandes AP, Nunes T, Monteiro C, Pio C, Alves C (2017) Hydrocarbons in particulate samples from wildfire events in central Portugal in summer 2010. Journal of Environmental Sciences (China) 53, 122–131. doi:10.1016/j.jes.2016.02.022.

Viegas, D., & Viegas, M. (1994). 1994 - Viegas_Relationship between rainfall burne.pdf. *International Journal of Wildland Fire*, *4*(1), 11–16.

Viegas, D. X. (2004). A Mathematical Model For Forest Fires Blowup. *Combustion Science and Technology*, *177*(1), 27–51. https://doi.org/10.1080/00102200590883624

Viegas, D. X. (2004). *Cercados pelo Fogo*. (in Portuguese), Minerva Editora. Coimbra, Portugal.

Viegas, D. X. (2006). Parametric study of an eruptive fire behaviour model. *International Journal of Wildland Fire*, *15*(2), 169. https://doi.org/10.1071/WF05050

Viegas, D. X. (2009). *Cercados pelo Fogo, Parte 2*. (in Portuguese), Minerva Editora. Coimbra,

Portugal.

Viegas, D. X. (2013). *Cercados pelo Fogo em Armamar. O Acidente de Armamar em 8 de setembro de 1985*. (in Portuguese), Ediliber. Coimbra, Portugal.

Viegas, D. X. (2017). *Cercados pelo Fogo em Águeda - Relato do acidente ocorrido em Águeda em 14 de junho de 1986* (P. (in Portuguese), FIG – Indústrias Gráficas, SA., Coimbra (ed.)).

Viegas, D. X., Almeida, M. A., Ribeiro, L. M., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Rodrigues, A., Ribeiro, C., Lopes, S., Jorge, H., & Viegas, C. X. (2019). *Análise dos Incêndios Florestais Ocorridos a 15 de outubro de 2017*. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA). Coimbra, Portugal. https://www.portugal.gov.pt/pt/gc21/comunicacao/documento?i=analise-dos-incendios-florestais-ocorridos-a-15-de-outubro-de-2017

Viegas, D. X., Almeida, M. F., Ribeiro, L. M., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Jorge, H., Rodrigues, A., Lucas, D., Lopes, S., & Silva, L. F. (2017). *O complexo de incêndios de Pedrógão Grande e concelhos limítrofes, iniciado a 17 de junho de 2017*. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA).

Viegas, D. X., Almeida, M., Raposo, J., Oliveira, R., & Viegas, C. X. (2014). Ignition of Mediterranean Fuel Beds by Several Types of Firebrands. *Fire Technology*, *50*(1), 61–77. https://doi.org/10.1007/s10694-012-0267-8

Viegas, D. X. D., Bovio, G., Ferreira, A., Nosenzo, A., & Sol, B. (1999). Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe. *International Journal of Wildland Fire*, *9*(4), 235–246. https://doi.org/10.1071/WF00015

Viegas, D. X. D., & Pita, L. L. P. (2004). Fire spread in canyons. *International Journal of Wildland Fire*, *13*(3), 253–274. https://doi.org/dx.doi.org/10.1071/wf03050

Viegas, D. X. F. C., Raposo, J. R. N., Ribeiro, C. F. M., Reis, L. C. D., Abouali, A., & Viegas, C. X. P. (2021). On the non-monotonic behaviour of fire spread. *International Journal of Wildland Fire*, *30*(9), 702–719. https://doi.org/10.1071/WF21016

Viegas, D. X., Figueiredo Almeida, M., Ribeiro, L. M., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Jorge, H., Rodrigues, A., Lucas, D., Lopes, S., Silva, L. F., Almeida, M. F., Ribeiro, L. M., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., … Silva, L. F. (2017). *O complexo de incêndios de Pedrógão Grande e concelhos limítrofes, iniciado a 17 de junho de 2017* (Vol. 2017). Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA). Coimbra, Portugal. https://www.portugal.gov.pt/pt/gc21/comunicacao/documento?i=o-complexo-de-incendios-de-pedrogao-grande-e-concelhos-limitrofes-iniciado-a-17-de-junho-de-2017

Viegas, D. X., Pita, L. P., Ribeiro, L. M., & Palheiro, P. (2005). Eruptive Fire Behaviour in Past Fatal Accidents. *Eighth International Wildland Fire Safety Summit, April 26-28, 2005 Missoula, MT.*, 1–8.

Viegas, D. X., Raposo, J. R., Davim, D. A., & Rossa, C. G. (2012). Study of the jump fire produced by the interaction of two oblique fire fronts. Part 1. Analytical model and validation with no-slope laboratory experiments. *International Journal of Wildland Fire*, *21*(7), 843–856. https://doi.org/10.1071/WF10155

Viegas, D. X., Reis, R. M., Cruz, M. G., Viegas, M. T., Doutoramento, B. De, Silvicultora, E., Coimbra, U. De, Engenharia, D. De, & De, P. (2004). Calibração do Sistema Canadiano de Perigo de Incêndio para Aplicação em Portugal. *Silva Lusitana*, *12*(1), 77–93. http://www.scielo.oces.mctes.pt/pdf/slu/v12n1/12n1a07.pdf

Viegas, D. X., Ribeiro, L. M., Almeida, M. A., Oliveira, R., Viegas, M. T. P., Raposo, J. R., Reva, V.,

Figueiredo, A. R., & Lopes, S. (2013). *Os grandes incêndios florestais e os acidentes mortais ocorridos em 2013*. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA). https://www.historico.portugal.gov.pt/media/1281135/Relatório_IF2013_parte1.pdf

Viegas, D. X., Ribeiro, L. M., Gabbert, W., Viegas, M. T., Figueiredo, A. R., Oliveira, R., Reva, V., Raposo, J. R., & Almeida, M. A. (2012). *Relatório do Incêndio Florestal de Tavira/São Brás de Alportel, 18 a 22 de Julho de 2012*. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA). https://www.historico.portugal.gov.pt/media/730414/rel_incendio_florestal_tavira_jul2012.pdf

Viegas, D. X., Silva, A. M., & Cruz, M. G. (2001). Analysis of Three Fatal Accidents Involving Portuguese Firefighters. *Proc. 2001 Fire Safety Summit, Edmonton, Canada*.

Viegas, D. X., & Simeoni, A. (2011). Eruptive Behaviour of Forest Fires. *Fire Technology*, *47*(2), 303–320. https://doi.org/10.1007/s10694-010-0193-6

Viegas, D. X., Soares, J., & Almeida, M. (2013). Combustibility of a mixture of live and dead fuel components. *International Journal of Wildland Fire*, *22*(7), 992–1002. https://doi.org/10.1071/WF12031

Viegas, D. X., Stipanicev, D., Ribeiro, L., Pita, L. P., & Rossa, C. (2008). The Kornati fire accident – eruptive fire in relatively low fuel load herbaceous fuel conditions. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, *119*, 365–375. https://doi.org/10.2495/FIVA080361

Viney, N. R. (1991). A review of fine fuel moisture modelling. *International Journal of Wildland Fire*, *1*(4), 215–234. https://doi.org/10.1071/WF9910215

Walker PF, Buehner MF, Wood LA, Boyer NL, Driscoll IR, Lundy JB, et al. (2015) Diagnosis and management of inhalation injury: an updated review. Critical care. 19:351.

Zikeloglou, I., Lekkas, E., Lozios, S., Stavropoulou, M. (2023). Is early evacuation the best and only strategy to protect and mitigate the effects of forest fires in WUI areas? A qualitative research on the residents' response during the 2021 forest fires in NE Attica, Greece. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 88. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103612.

Zimmerman, T. (2020). Watch Out Situations. In S. L. Manzello (Ed.), *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (pp. 1051–1054). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_262

Zimmerman, T., & Parkinson, T. (2020). Standard Firefighting Orders. In *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (Vol. 21, Issue 5, pp. 958–962). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_221

Δίγλωσσο Γλωσσάρι Όρων Διαχείρισης Δασικών Πυρκαγιών

Όροι Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς (Fire Behavior Terms)

- **Βασικός Ρυθμός Εξάπλωσης** (Basic Rate of Spread - ROS): Η ταχύτητα με την οποία κινείται το μέτωπο της πυρκαγιάς, ιδιαίτερα απουσία ανέμου ή κλίσης
- **Παράγοντες Προετοιμασίας** (Conditioning Factors): Περιβαλλοντικά στοιχεία που επηρεάζουν την υγρασία των καυσίμων και το δυναμικό της πυρκαγιάς
- **Επικόρυφη Πυρκαγιά** (Crown Fire): Πυρκαγιά που εξαπλώνεται μέσω της κόμης των δέντρων
- **Καθοριστικοί Παράγοντες** (Determining Factors): Στοιχεία που επηρεάζουν άμεσα την εξάπλωση της πυρκαγιάς όπως ο άνεμος και η ατμοσφαιρική σταθερότητα
- **Δυναμική Συμπεριφορά Πυρκαγιάς** (Dynamic Fire Behaviour): Συμπεριφορά πυρκαγιάς που μεταβάλλεται με το χρόνο λόγω αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον
- **Εκρηκτική Πυρκαγιά** (Eruptive Fire): Πυρκαγιά που χαρακτηρίζεται από αιφνίδια επιτάχυνση και ταχεία εξάπλωση, συχνά σε φαράγγια ή απότομες πλαγιές
- **Ακραία Συμπεριφορά Πυρκαγιάς** (Extreme Fire Behaviour - EFB): Συμπεριφορά πυρκαγιάς που αποκλείει τις μεθόδους άμεσης καταστολής λόγω της έντασής της
- **Επιτάχυνση Πυρκαγιάς** (Fire Acceleration): Αύξηση του ρυθμού εξάπλωσης με την πάροδο του χρόνου
- **Ένταση Πυρκαγιάς** (Fire Intensity): Μέτρο του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας ανά μονάδα μήκους του μετώπου της πυρκαγιάς
- **Περίμετρος Πυρκαγιάς** (Fire Perimeter): Συνολικό εξωτερικό όριο ή σύνορο μιας πυρκαγιάς
- **Σφοδρότητα Πυρκαγιάς** (Fire Severity): Βαθμός περιβαλλοντικής αλλαγής που προκαλείται από την πυρκαγιά
- **Πύρινος Στρόβιλος** (Fire Whirl): Περιστρεφόμενη στήλη φωτιάς που προκαλείται από έντονη θέρμανση και στροβιλώδεις ανέμους
- **Γωνία Φλόγας** (Flame Angle): Γωνία των φλογών σε σχέση με το έδαφος, που επηρεάζει τη μεταφορά θερμότητας
- **Υπόγεια Πυρκαγιά** (Ground Fire): Πυρκαγιά που καίει σε καύσιμα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους
- **Οριζόντια Στροβιλότητα** (Horizontal Vorticity): Περιστροφική κίνηση αέρα παράλληλη προς το έδαφος που επηρεάζει την εξάπλωση της πυρκαγιάς
- **Θερμή Εστία** (Hotspot): Μικρή περιοχή υποβόσκουσας καύσης ή έντονης θερμότητας που παραμένει μετά από πυρκαγιά
- **Πυρκαγιά Συνένωσης** (Junction Fire): Συμπεριφορά συγχώνευσης δύο μετώπων πυρκαγιάς που συναντώνται υπό γωνία

Αλληλεπιδράσεις Πυρκαγιάς-Ατμόσφαιρας (Fire-Atmosphere Interactions)

- **Ατμοσφαιρική Σταθερότητα** (Atmospheric Stability): Συνθήκη που επηρεάζει την κατακόρυφη κίνηση του αέρα και τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς
- **Συμβάν Εκρηκτικής Ανάπτυξης Πυρκαγιάς** (Blow-Up Fire Event - BUFE): Κλιμάκωση

της πυρκαγιάς σε έναν ή περισσότερους τομείς λόγω σύζευξης πυρκαγιάς-ατμόσφαιρας

- **Μεγαλη πυρκαγιά-λαίλαπα** (Conflagration): Πυρκαγιές που εκδηλώνονται υπό ισχυρές μετεωρολογικές συνθήκες ανέμου οδηγώντας σε εκτεταμένη εξάπλωση
- **Επαγωγική στήλη** (Convection Column): Ανοδική στήλη καπνού, θερμού αέρα και υπολειμμάτων που παράγεται από την πυρκαγιά
- **Όριο επαγωγής** (Convective Cap): Ατμοσφαιρική συνθήκη που μπορεί να εμποδίσει ή να επιτρέψει την κατακόρυφη μεταγωγή

Όροι Σχετικοί με τα Καύσιμα (Fuel-Related Terms)

- **Συμπύκνωση** (Compactness): Απόσταση μεταξύ σωματιδίων καυσίμου σε μια στρώση καυσίμου
- **Νεκρό Καύσιμο** (Dead Fuel): Μη ζωντανό φυτικό υλικό
- **Αμυντικός Χώρος** (Defensible Space): Περιοχή γύρω από κατασκευή όπου η βλάστηση έχει τροποποιηθεί για μείωση του κινδύνου πυρκαγιάς

Όροι Καιρού και Περιβάλλοντος (Weather and Environmental Terms)

- **Καιρός Πυρκαγιάς** (Fire Weather): Καιρικές συνθήκες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς
- **Κίνδυνος Πυρκαγιάς** (Fire Danger): Συνδυασμός παραγόντων που επηρεάζουν την πιθανότητα και ένταση των πυρκαγιών
- **Επικινδυνότητα Πυρκαγιάς** (Fire Hazard): Συνδυασμός συνθηκών που αυξάνουν το δυναμικό ζημιάς από πυρκαγιά
- **Δείκτης Καιρού Πυρκαγιάς** (Fire Weather Index - FWI): Αξιολόγηση του δυναμικού έντασης πυρκαγιάς βάσει καιρικών συνθηκών
- **Σχετική Υγρασία** (Relative Humidity - RH): Ποσοστό υδρατμών στον αέρα σε σχέση με τον κορεσμό
- **Επίδραση Ανέμου-Εδάφους** (Wind-Terrain Effect): Συνδυασμένη επίδραση ανέμου και τοπογραφίας στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς

Επιχειρησιακοί Όροι και Όροι Καταστολής (Operational and Suppression Terms)

- **Σημείο Αγκύρωσης** (Anchor Point): Ασφαλές σημείο έναρξης επιχειρήσεων καταστολής
- **Αντιπύρ** (Backfire): Ελεγχόμενη φωτιά που τίθεται κατά μήκος γραμμής ελέγχου για κατανάλωση καυσίμων
- **Κάψιμο Ζώνης** (Burnout): Φωτιά που τίθεται εντός γραμμής ελέγχου για κατανάλωση καυσίμων
- **Γραμμή Ανάσχεσης** (Containment Line): Φυσικό ή τεχνητό εμπόδιο για διακοπή εξάπλωσης πυρκαγιάς
- **Άμεση Προσβολή** (Direct Attack): Μέθοδος καταστολής που εφαρμόζεται απευθείας στο μέτωπο της πυρκαγιάς
- **Διαδρομή Διαφυγής** (Escape Route): Προκαθορισμένη διαδρομή προς ζώνη ασφαλείας
- **Αντιπυρική Ζώνη** (Fire Break): Φυσικό ή τεχνητό εμπόδιο για διακοπή ή έλεγχο εξάπλωσης πυρκαγιάς

- **Πυρίμαχο Καταφύγιο** (Fire Shelter): Ατομική συσκευή προστασίας πυροσβεστών που αντανακλά τη θερμότητα
- **Γραμμή Πυρός** (Fireline): Διαμορφωμένη περιοχή από την οποία έχουν αφαιρεθεί τα εύφλεκτα υλικά
- **Έμμεση Προσβολή** (Indirect Attack): Μέθοδος καταστολής με χρήση γραμμών ελέγχου μακριά από το μέτωπο
- **Αρχική Προσβολή** (Initial Attack): Πρώτες ενέργειες καταστολής σε πυρκαγιά
- **LACES** (LACES): Πρωτόκολλο ασφαλείας (Παρατηρητές, Σημεία αγκύρωσης, Επικοινωνίες, Διαδρομές διαφυγής, Ζώνες ασφαλείας)

Όροι Διεπαφής και Διαχείρισης (Interface and Management Terms)

- **Ζώνη Μίξης Δάσους-Οικισμών** (Wildland-Urban Interface - WUI): Περιοχή όπου ανθρώπινες κατασκευές συναντούν ή αναμιγνύονται με δασική βλάστηση
- **Διεπαφή WUI** (Interface WUI): Σαφές όριο μεταξύ κατασκευών και δασικής έκτασης
- **Ζώνη Ανάμιξης WUI** (Intermix WUI): Περιοχή όπου κατασκευές και δασικά καύσιμα αναμιγνύονται
- **Εγκλωβισμένη WUI** (Occluded WUI): Δασική έκταση περιβαλλόμενη από αστική ανάπτυξη

Συστήματα Αξιολόγησης και Βαθμολόγησης (Assessment and Rating Systems)

- **Πρόβλεψη Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς** (Fire Behavior Prediction): Διαδικασία πρόβλεψης εξάπλωσης και έντασης πυρκαγιάς
- **Αξιολόγηση Κινδύνου Πυρκαγιάς** (Fire Danger Rating): Σύστημα αξιολόγησης και επικοινωνίας δυναμικού πυρκαγιάς
- **Καναδικό Σύστημα Δείκτη Καιρού Πυρκαγιάς** (Canadian Fire Weather Index System - CFWIS): Ολοκληρωμένο σύστημα αξιολόγησης κινδύνου πυρκαγιάς

Πόροι Καταστολής (Suppression Resources)

- **Εναέρια Μέσα** (Aerial Resources): Αεροσκάφη που χρησιμοποιούνται στην καταστολή πυρκαγιών
- **Επίγεια Μέσα** (Ground Resources): Προσωπικό και εξοπλισμός που επιχειρούν στο έδαφος
- **Ομάδα Χειρωνακτικών Εργαλείων** (Hand Crew): Ομάδα πυροσβεστών που χρησιμοποιεί χειρωνακτικά εργαλεία
- **Εναέρια Ομάδα** (Helitack): Ομάδες πυροσβεστών που μεταφέρονται με ελικόπτερο

Καπνός και Εκπομπές (Smoke and Emissions)

- **Συντελεστές Εκπομπών** (Emission Factors): Μάζα ρύπων που εκπέμπεται ανά μάζα καυσίμου που καίγεται
- **Ακτινοβολούμενη Ισχύς Πυρκαγιάς** (Fire Radiative Power - FRP): Μέτρο ακτινοβολούμενης ενέργειας από πυρκαγιά
- **Στήλη Καπνού** (Plume): Στήλη καπνού και θερμών αερίων που ανυψώνεται από πυρκαγιά
- **Διασπορά Καπνού** (Smoke Dispersion): Κίνηση και αραίωση καπνού στην ατμόσφαιρα

- **Μοντέλο Διασποράς Καπνού** (Smoke Dispersion Model): Αριθμητικό εργαλείο πρόβλεψης κίνησης και συγκέντρωσης καπνού
- **Διαχείριση Καπνού** (Smoke Management): Σχεδιασμός και διαχείριση διασποράς καπνού για ελαχιστοποίηση επιπτώσεων
- **Αιωρούμενα Σωματίδια** (Particulate Matter): Στερεά σωματίδια και υγρά σταγονίδια στον καπνό
- **Ορατότητα** (Visibility): Εύρος καθαρής όρασης, συχνά μειωμένο από καπνό

Ατμοσφαιρικά Φαινόμενα (Atmospheric Phenomena)

- **Πυροσωρείτης** (Pyrocumulonimbus - PyroCb): Νέφος καταιγίδας που δημιουργείται από έντονη θερμική ανύψωση από πυρκαγιά
- **Καταιγιστικές Ριπές** (Downbursts): Ισχυρά ρεύματα καθοδικού αέρα που συνδέονται με καταιγίδες
- **Άνεμος Φαιν** (Foehn Wind): Θερμός, ξηρός καταβατικός άνεμος στην υπήνεμη πλευρά ορεινών όγκων

Συμπεριφορά Πυρκαγιάς (Fire Behavior)

- **Εγκλωβισμός από Πυρκαγιά** (Burn-over): Κατάσταση όπου η πυρκαγιά υπερκαλύπτει το προσωπικό ή τον εξοπλισμό
- **Μέτωπο Κεφαλής** (Headfire): Το πιο ενεργό τμήμα της πυρκαγιάς που κινείται με τη φορά του ανέμου
- **Στροβιλότητα** (Vorticity): Περιστροφική κίνηση του αέρα που επηρεάζει τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς
- **Πυρκαγιά Συνένωσης** (Junction Fire): Φαινόμενο όπου δύο μέτωπα πυρκαγιάς συναντώνται υπό γωνία
- **Επιφανειακή Πυρκαγιά** (Surface Fire): Πυρκαγιά που εξαπλώνεται στην επιφανειακή βλάστηση
- **Εκρηκτική Πυρκαγιά** (Eruptive Fire): Πυρκαγιά με απότομη επιτάχυνση, συχνά σε απότομες πλαγιές
- **Μέτωπο Πυρκαγιάς** (Fire Front): Η ενεργή ζώνη καύσης της πυρκαγιάς
- **Παθητική Επικόρυφη Πυρκαγιά** (Passive Crown Fire): Πυρκαγιά όπου μεμονωμένα δέντρα ή μικρές ομάδες δέντρων αναφλέγονται στην κόμη
- **Ενεργή Επικόρυφη Πυρκαγιά** (Active Crown Fire): Συνεχής καύση στην κόμη των δέντρων υποστηριζόμενη από επιφανειακή πυρκαγιά
- **Σύζευξη Πυρκαγιάς-Ατμόσφαιρας** (Fire-Atmosphere Coupling): Αλληλεπίδραση μεταξύ πυρκαγιάς και ατμοσφαιρικών συνθηκών
- **Οπισθοπυρκαγιά** (Back-fire): Τμήμα πυρκαγιάς που κινείται αντίθετα στον άνεμο
- **Πλευρική Πυρκαγιά** (Flank-fire): Τμήμα πυρκαγιάς που κινείται πλευρικά του κύριου άξονα εξάπλωσης

Καύσιμα (Fuels)

- **Τύπος Καυσίμου** (Fuel Type): Κατηγοριοποίηση βλάστησης βάσει χαρακτηριστικών καύσης

- **Μοντέλο Καυσίμου** (Fuel Model): Τυποποιημένη περιγραφή ιδιοτήτων καυσίμου για πρόβλεψη συμπεριφοράς πυρκαγιάς
- **Στρώμα Καυσίμου** (Fuel Bed): Διάταξη καυσίμων στο χώρο
- **Ύψος Στρώματος Καυσίμου** (Fuelbed Height): Κατακόρυφη διάσταση της ζώνης καύσης
- **Λόγος Επιφάνειας-Όγκου** (Surface-to-Volume Ratio): Αναλογία εξωτερικής επιφάνειας προς όγκο σωματιδίου καυσίμου
- **Θερμικό Περιεχόμενο** (Heat Content): Διαθέσιμη ενέργεια ανά μονάδα μάζας καυσίμου
- **Υγρασία Κατάσβεσης** (Moisture of Extinction): Περιεχόμενο υγρασίας καυσίμου πάνω από το οποίο η πυρκαγιά δεν εξαπλώνεται
- **Λόγος Συσσώρευσης** (Packing Ratio): Αναλογία όγκου καυσίμου προς συνολικό όγκο στρώματος
- **Σωματίδιο Καυσίμου** (Fuel Particle): Μεμονωμένο στοιχείο καύσιμης ύλης
- **Υγρασία Λεπτών Καυσίμων** (Fine Fuel Moisture): Περιεχόμενο υγρασίας σε λεπτά καύσιμα

Δείκτες και Ζώνες (Indices and Zones)

- **Ζώνη Μίξης Δάσους-Οικισμών** (Wildland Urban Interface): Περιοχή όπου δομημένο περιβάλλον συναντά δασική βλάστηση
- **Δείκτης Αρχικής Εξάπλωσης** (Initial Spread Index): Δείκτης που συνδυάζει επιδράσεις ανέμου και υγρασίας λεπτών καυσίμων
- **Υγρασία Ισορροπίας** (Equilibrium Moisture Content): Υγρασία καυσίμου σε ισορροπία με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες
- **Δείκτης Ξηρασίας** (Drought Code): Δείκτης περιεχομένου υγρασίας βαθέων οργανικών στρωμάτων

Επιχειρησιακοί Ρόλοι (Operational Roles)

- **Πυρσός Ανάφλεξης** (Drip-torch): Εργαλείο για ελεγχόμενη ανάφλεξη βλάστησης
- **Αναλυτής Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς** (Fire Behaviour Analyst): Ειδικός που αναλύει και προβλέπει τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς
- **Υπεύθυνος Ασφαλείας** (Safety Officer): Αξιωματικός υπεύθυνος για την ασφάλεια του προσωπικού
- **Υπεύθυνος Κατάστασης** (Situation Officer): Αξιωματικός υπεύθυνος για την παρακολούθηση της εξέλιξης της πυρκαγιάς
- **Παρατηρητής Πεδίου** (Field Observer): Προσωπικό που παρακολουθεί και αναφέρει τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς
- **Υπεύθυνος Επιχειρήσεων** (Operations Officer): Αξιωματικός υπεύθυνος για τον συντονισμό των επιχειρήσεων καταστολής